

**T.C
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADININ MEKANİK TASARIM ESASLARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Kadir KAYA
12210924**

**HAZİRAN 2014
SAMSUN**



T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADININ MEKANİK TASARIM ESASLARI

YÜKSEKLİSANS TEZİ

Kadir KAYA

12210924

Tezin Savuma Tarihi : 25 Haziran 2014

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erdem KOÇ

**Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği
Anabilim Dalında Kadir KAYA Tarafından Hazırlanan**

RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADININ MEKANİK TASARIM ESASLARI

**başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından 25/06/2014 tarihinde yapılan sınav ile
YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.**

Başkan: **Prof. Dr. Erdem KOÇ**
Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK**
Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Doç. Dr. İbrahim KELEŞ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi

...../...../2014
Prof. Dr. Hüseyin DEMİR
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Lisansüstü eğitimim ve tez çalışmam sürecinde bilgi, birikim ve tecrübelerinden faydalanma imkanı bulduğum, akademik çalışma hayatıma başlamama vesile olan, bana disiplinli çalışmayı öğreten, akademik görevlerine rağmen zamanını ayırarak bu değerli çalışmanın ortaya çıkmasını sağlayan danışmanım sayın Prof. Dr. Erdem KOÇ'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Lisans eğitimim ve tez çalışmam sırasında yoğun akademik ve idari görevlerine rağmen bana zaman ayıran, tez çalışmamla ilgili önerilerde bulunan sayın Doç. Dr. Recep GÜNEŞ'e saygılarımla teşekkür ederim.

Değerli zamanlarını ayırarak tezimi değerlendiren jüri üyesi sayın Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK'e ve Doç. Dr. İbrahim KELEŞ'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Çalışmam boyunca her türlü yardım ve desteği esirgemeyen başta bölüm başkanım Doç Dr. Hakan ÖZCAN olmak üzere, Doç Dr. Bahattin TOPALOĞLU'na, Yrd. Doç. Dr. Lütfü Namlı'ya, Yrd. Doç Dr. Mustafa ÖZBEY'e, Yrd. Doç. Dr. Kemal YILDIZLI'ya, Yrd. Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ'e, Arş. Gör. Mahmut Can ŞENEL'e, Arş. Gör. Murat KAPUSUZ'a, Arş. Gör. Muhammet ÖZDOĞAN'a, Arş. Gör. Bilal SUNGUR'a, Arş. Gör. Erkan ÖZTÜRK'e, Arş. Gör. Onur YONTAR'a, Arş. Gör. Cengiz Gökem DENGİZ'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak sürekli destekleyen babam Mustafa KAYA'ya, annem Gülcan KAYA'ya ve kardeşim Merve KAYA ŞAN'a teşekkürlerimi sunarım

Mayıs 2014

Kadir KAYA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiii
KISALTMALAR.....	xix
RÜZGAR TÜRBİN KANADININ MEKANİK TASARIM ESASLARI	xxiii
ÖZET	xxiii
MECHANICAL DESIGN PRINCIPLES OF WIND TURBINE BLADE.....	xxv
ABSTRACT.....	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1. Enerji Çeşitleri.....	1
1.2. Dünya’da Enerji Durumu	2
1.3. Türkiye’de Enerji Durumu	5
1.4. Türkiye ve Dünyada Yenilenebilir Enerji Durumu	7
1.5. Enerji Üretim Santrallerinin Maliyet Analizi	10
1.6. Problemin Tanımı	16
1.7. Tez Düzeni	16
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	19
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ	27
3.1. Rüzgar Türbinlerinin Çalışma Prensipleri	27
3.2. Rüzgar Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi	27
3.3. Çeşitli Rüzgar Türbinleri ve Sınıflandırılması	29
3.3.1. Dönme yönüne göre sınıflandırma	29
3.3.2. Rüzgarı alışı yönüne göre sınıflandırma	33
3.3.3. Rüzgar hızına göre sınıflandırma	34
3.3.4. Güç kontrol sistemine göre sınıflandırma	35
3.3.5. Rotor dönüş hızına göre sınıflandırma	38
3.3.6. Kullanım yerine göre sınıflandırma	38
3.4. Türbin Kapasite Faktörü	39
3.5. Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Elemanları	40
3.5.1. Kanatlar	40
3.5.2. Göbek	41
3.5.3. Gövde	41
3.5.4. Düşük hızlı şaft	42
3.5.5. Dişli kutusu	42
3.5.6. Jeneratör	42

3.5.7. Kontrol kutusu	42
3.5.8. Anemometre	42
3.5.9. Rüzgar gülü	43
3.5.10. Yüksek hızlı şaft	43
3.5.11. Fren	43
3.5.12. Kule	43
3.5.13. Türbin Eğim (yaw) mekanizması	44
3.5.14. Kanat hareket (stall ve pitch) mekanizması	45
3.6. Yatay Eksenli Rüzgar Türbin Ekonomisi	45
4. RÜZGAR TÜRBİN KANATLARI VE OPTİMİZASYON	47
4.1. Kanat Profili ve Bölgeler	47
4.2. Kanat Özellikleri ve Tasarım Esasları	52
4.3. Rüzgar Türbin Kanadında Kullanılan Malzemeler ve İmalat Yöntemleri	55
4.3.1. Rüzgar türbin kanadında kullanılan malzemeler	55
4.3.2. Rüzgar türbin kanadı imalat yöntemleri	62
4.3.2.1. El yatırma yöntemi	62
4.3.2.2. Vakum torbalama yöntemi	63
4.3.2.3. Vakum infüzyon yöntemi	64
4.4. Rüzgar Türbini Kanadının Aerodinamik Tasarımı	65
4.4.1. Rüzgar türbinlerinin aerodinamik tasarım parametreleri	65
4.4.1.1. Enerji ve Temel Parametreler	66
4.4.1.2. Aerodinamik Teoriler	71
4.4.1.3. Rüzgar Türbinlerindeki Kayıplar	75
4.5. Rüzgar Türbini Kanadının Yapısal Tasarımı	77
4.5.1. Rüzgar Türbin Kanadına Etki Eden Yükler	78
4.5.1.1. Aerodinamik Yükler	79
4.5.1.2. Yerçekimi Yükleri	81
4.5.1.3. Santrifüj Yükleri.....	82
4.5.2. Rüzgar türbin kanadının zorlanma halleri ve gerilmeler	83
4.5.2.1. Aerodinamik yükler nedeniyle oluşan eğilme (Flapwise Bending) ..	83
4.5.2.2. Yerçekimi yükleri nedeniyle oluşan eğilme (Edgewise Bending)	85
4.6. Tasarım Optimizasyonu	87
4.6.1. Topoloji optimizasyonu	89
4.6.2. Şekil Optimizasyonu	90
4.6.3. Boyut Optimizasyonu	90
5. KANADIN KATI MODELLENMESİ, TASARIMI VE OPTİMİZASYONU	93

5.1. Statik Analiz ve Oluşturulan Modeller	93
5.2. Rüzgâr Türbin Kanadı ve Akış Ortamı Katı Modellerinin Oluşturulması	94
5.2.1. Kanat katı modelinin oluşturulması.....	94
5.2.2. Akış Ortamı Katı Modelinin Oluşturulması	105
5.3. Kanadın Aerodinamik Davranışı ve Teorik Model	106
5.3.1. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğiyle genel aerodinamik analiz.....	108
5.3.2. Kanadın akış analizi.....	109
5.4. Kanadın Mekanik Davranışı ve Tasarım Esasları	112
5.4.1. Statik Analiz	112
5.4.2. Sonlu elemanlar metoduyla mekanik analiz	116
5.4.3. Sonlu elemanlar metoduyla kanadın mekanik davranışı	119
5.5. Kanadın Tasarım Optimizasyonu	127
5.5.1. ANSYS yazılımında topoloji optimizasyonu	127
5.5.2. ANSYS yazılımında kanadın topoloji optimizasyonu.....	128
5.6. Kanat Tasarım Sistematiği	134
6. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	137
6.1. Kanadın Aerodinamik Performansı	137
6.1.1. Rüzgar hız dağılımı	138
6.1.2. Basınç dağılımı	144
6.2. Kanadın Mekanik Davranışı.....	150
6.2.1. Şekil Değişimi (Deformasyon)	150
6.2.2. Gerilmeler	156
6.2.2.1. Normal gerilme	156
6.2.2.2. Kayma gerilmesi	166
6.2.2.3. Eşdeğer Gerilme.....	172
6.3. Farklı Rüzgâr Hızlarında Kanadın Hasar Kontrolü	178
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	181
8. KAYNAKLAR.....	185
ÖZGEÇMİŞ	191

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1.1. Dünyada tüketilen birincil enerji kaynakları	4
Çizelge 1.2. Türkiye’de tüketilen birincil enerji kaynakları	6
Çizelge 1.3. Türkiye ve dünyada son on yıldaki hidrolik enerji tüketim miktarları....	7
Çizelge 1.4. Türkiye ve dünyada yenilenebilir enerji tüketimi.....	8
Çizelge 1.5. Enerji Santrali Maliyetleri	11
Çizelge 1.6. Enerji santrallerinin 2008 ve 2012 yıllarındaki ilk yatırım ve birim enerji üretim maliyetleri	14
Çizelge 3.1. Çeşitli rüzgar türbinlerin kapasite faktörleri	39
Çizelge 4.1. Çeşitli aerofoiller ve anlamları	51
Çizelge 4.2. Rüzgâr türbin kanatlarında kullanılan bazı malzemelerin rijitlik ve mukavemet parametreleri	55
Çizelge 4.3. Matris malzemelerinin mekanik özellikleri	57
Çizelge 4.4. Kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanları	59
Çizelge 5.1. D49 kanadının teknik özellikleri	96
Çizelge 5.2. Modellenen kanadın tasarım parametreleri	97
Çizelge 5.3. Modellenen akış ortamının geometrik özellikleri	106
Çizelge 5.4. E-Cam/Epoksi malzeme mekanik özellikleri	115

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Enerji kaynaklarının genel sınıflandırılması.....	1
Şekil 1.2. 2012 yılında dünyada tüketilen birincil enerji kaynaklarının dağılımı	3
Şekil 1.3. 2012 yılında Türkiye’de kullanılan birincil enerji kaynaklarının dağılımı	5
Şekil 1.4. Türkiye’de yenilenebilir enerji tüketiminin son on yıldaki değişimi.....	9
Şekil 1.5. Dünya’da yenilenebilir enerji tüketiminin son on yıldaki değişimi	10
Şekil 1.6. Belirlenen santrallerin ilk yatırım maliyetleri.....	12
Şekil 1.7. Belirlenen santrallerin sabit işletme maliyetleri	12
Şekil 1.8. Belirlenen santrallerin değişken işletme maliyetleri	13
Şekil 1.9. Santral Tipine göre ilk yatırım ve işletme maliyetleri	13
Şekil 3.1. Modern rüzgar türbinlerinde elektrik enerjisi üretimi	27
Şekil 3.2. Rüzgar türbin boyutlarının 1980-2011 yılları arası değişimi	28
Şekil 3.3. Rüzgar türbinlerinin genel sınıflandırılması	29
Şekil 3.4. Dönme eksenine göre rüzgar türbinleri	29
Şekil 3.5. Darrieus düşey eksenli rüzgar türbini	30
Şekil 3.6. Savanois düşey eksenli rüzgar türbini	31
Şekil 3.7. Yatay eksenli rüzgar türbini	31
Şekil 3.8. Tek (a), çift (b), üç (c) ve çok kanatlı (d) yatay eksenli rüzgar türbinleri	33
Şekil 3.9. Rüzgarı önden alan (a) ve arkadan alan (b) rüzgar türbinleri	34
Şekil 3.10. Modern rüzgar türbinlerinde kullanılan kanat ve yapısında kullanılan bir aerofoil	35
Şekil 3.11. Rüzgar türbin kanatlarının farklı pozisyonları	36
Şekil 3.12. Kanadın stall ile güç kontrolü	37
Şekil 3.13. Pitch kontrol sistemiyle kanat açısı değişimi	37
Şekil 3.14. Stall kontrollü (a) ve pitch kontrollü (b) türbinlere ait güç eğrileri	38
Şekil 3.15. Yatay eksenli bir rüzgar türbini ve elamanları	40
Şekil 3.16. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde kullanılan göbekler	41
Şekil 3.17. Rüzgar türbinlerinde kullanılan kule yapıları	43
Şekil 3.18. Kanat ve türbin kontrol mekanizmaları	44
Şekil 3.19. Rüzgar türbinlerinin yatırım maliyetleri	45
Şekil 3.20. Rüzgar türbinlerinin işletme-bakım maliyetleri	46
Şekil 4.1. Yatay eksenli rüzgâr türbin kanadı, kanat bölgeleri ve kanadı oluşturan aerofoil	48

Şekil 4.2. Aerofoil etrafındaki hava hareketi ve kaldırma kuvveti oluşumu	49
Şekil 4.3. NACA aerofoil serisindeki büyüklükler	50
Şekil 4.4. Çeşitli NACA profilleri	51
Şekil 4.5. Rüzgâr türbin kanat bileşenleri ve montajı	52
Şekil 4.6. Rüzgâr türbin kanadının kesit yapısı	53
Şekil 4.7. Kanatta kullanılan kiriş yapılar	53
Şekil 4.8. Kanat bileşenlerinin montajı	54
Şekil 4.9. Kompozit malzeme çeşitleri	57
Şekil 4.10. Farklı kanat tasarımlarının özgül ağırlıkları	60
Şekil 4.11. Modern rüzgâr türbin kanadı	61
Şekil 4.12. El yatırma yöntemi	63
Şekil 4.13. Vakum torbalama yöntemi	63
Şekil 4.14. Vakum infüzyon yöntemi	65
Şekil 4.15. Rüzgâr türbininin genel yapısı	66
Şekil 4.16. Pitch kontrollü rüzgâr türbininde güç üretimi	67
Şekil 4.17. Rüzgar türbini uç-hız oranı	67
Şekil 4.18. Rüzgâr türbinlerinde kanat açısı ve hücum açısı	69
Şekil 4.19. Rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılan kanat yapıları	69
Şekil 4.20. Farklı kanat yapılarında C_p - λ değişimi	70
Şekil 4.21. Farklı kanat sayısına sahip rüzgâr türbinlerinde C_p - λ değişimi	71
Şekil 4.22. Bir Boyutlu Lineer Momentum Teorisi için Disk Modeli	72
Şekil 4.23. Dönen Disk Modeli için Momentum Teorisi için geliştirilen model.....	73
Şekil 4.24. Aerofoile erki eden hızlar ve kuvvetler	74
Şekil 4.25. NACA 4415 aerofoilinin farklı hücum açılarındaki C_L ve C_D katsayıları	75
Şekil 4.26. $C_{pSchmitz}$ - λ değişimi	76
Şekil 4.27. 1.2 MW nominal güçteki bir rüzgâr türbinindeki kayıplar	77
Şekil 4.28. Kanat koordinat sistemi	78
Şekil 4.29. Kanatta meydana gelen hızlar	79
Şekil 4.30. Aerofoile etki eden kuvvetler	80
Şekil 4.31. Kanat koordinat sisteminde kanada etki eden normal ve teğetsel kuvvetler	81
Şekil 4.32. Kanat azimuth, koniklik ve eğim açıları	82
Şekil 4.33. Aerodinamik yükler nedeniyle kanadın eğilmesi	84
Şekil 4.34. Kanadın kesit görüntüsü	85
Şekil 4.35. Yerçekimi yükleri nedeniyle kanadın eğilmesi	86

Şekil 4.36. Kanadın kesit görüntüsü	87
Şekil 4.37. Bir ankastre kirişin tasarım optimizasyonu	88
Şekil 4.38. Bir kirişin topoloji optimizasyonu	89
Şekil 4.39. Bir kirişin şekil optimizasyonu	90
Şekil 4.40. Bir yapının topoloji ve şekil optimizasyonu	90
Şekil 4.41. Bir şişenin boyut optimizasyonu	91
Şekil 4.42. Bir kafes kirişin boyut optimizasyon	91
Şekil 5.1. Katı modeli oluşturulması düşünülen kanat resmi	94
Şekil 5.2. Yatay eksenli üç kanatlı rüzgâr türbini	95
Şekil 5.3. Kanat koniklik açısı, kanat uzunluğu ve maksimum profil	97
Şekil 5.4. Kanat uzunluğu boyunca kanat bağlama açısının değişimi	98
Şekil 5.5. Kanat uzunluğu boyunca kanat profil uzunluğunun değişimi	98
Şekil 5.6. Kanat tasarımı için belirlenen istasyon noktaları	99
Şekil 5.7. NACA 4415 aerofoil geometrisi	100
Şekil 5.8. İstasyon noktalarında oluşturulan aerofoiller	101
Şekil 5.9. Ön eğilmeli kanat için konumlandırılan istasyon noktaları	101
Şekil 5.10. Oluşturulan kanadının katı modeli	102
Şekil 5.11. İç destek elemanı olarak kullanılan I profilli kirişin profil boyutları ...	103
Şekil 5.12. İç destek elemanlarının (spar) katı modeli	103
Şekil 5.13. Kanat dış yapı ve iç destek elemanının katı modeli (birinci görüntü)...	104
Şekil 5.14. Kanat dış yapı ve iç destek elemanının katı modeli (ikinci görüntü)	104
Şekil 5.15. Akış ortamının dış sınırlarını oluşturan kare geometri	105
Şekil 5.16. Katı modeli oluşturulan akış ortamı	106
Şekil 5.17. Farklı yaklaşımlarla belirlenen 3,5 m’lik kanada etki eden aerodinamik yükler	107
Şekil 5.18. Akış analizi için tanımlanan bölgeler	108
Şekil 5.19. Akış ortamında oluşturulan ağ yapısı	110
Şekil 5.20. Akış analizi için belirlenen sınır koşulları	111
Şekil 5.21. Normal gerilme ve kayma gerilmeleri	113
Şekil 6.1. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki rüzgar hızlarının genel dağılımı	138
Şekil 6.2. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek rüzgar hızlarının kanat boyunca değişimi	139
Şekil 6.3. Kanadın hücum ve firar kenarlarındaki rüzgar hızlarının kanat boyunca değişimi	140
Şekil 6.4. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki rüzgar hızlarının genel dağılımı	141

Şekil 6.5. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek rüzgar hızlarının kanat boyunca değişimi.....	142
Şekil 6.6. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki rüzgar hızlarının genel dağılımı.....	142
Şekil 6.7. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek rüzgar hızlarının kanat boyunca değişimi.....	143
Şekil 6.8. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek basınçların etki eden basınçların genel dağılımı	144
Şekil 6.9. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek basınçların kanat boyunca değişimi	145
Şekil 6.10. Kanadın hücum ve firar kenarlarındaki basınçlar	146
Şekil 6.11. Kanadın üst ve alt yüzeylerine etki eden basınçların genel dağılımı	147
Şekil 6.12. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek basınçların kanat boyunca değişimi	147
Şekil 6.13. Kanadın üst ve alt yüzeylerine etki eden basınçların genel dağılımı.....	148
Şekil 6.14. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek basınçların kanat boyunca değişimi	148
Şekil 6.15. Kanadın toplam şekil değişimi	149
Şekil 6.16. Kanadın dört farklı bölgesinde kanat boyunca oluşan toplam şekil değişimleri	150
Şekil 6.17. Kanadın toplam şekil değişimi	151
Şekil 6.18. Kanadın dört farklı bölgesinde kanat boyunca oluşan toplam şekil değişimleri	152
Şekil 6.19. Kanadın toplam şekil değişimi	153
Şekil 6.20. Kanadın dört farklı bölgesinde kanat boyunca oluşan toplam şekil değişimleri	153
Şekil 6.21. Farklı rüzgar hızlarında kanatta oluşan en büyük şekil değişimleri	154
Şekil 6.22. Kanatta oluşan σ_x normal gerilmeleri	154
Şekil 6.23. Kanadın iç destek elemanlarında oluşan σ_x normal gerilmeleri	155
Şekil 6.24. Kanadın iç destek elemanının (spar) dört farklı bölgesinde oluşan σ_x normal gerilmeleri	156
Şekil 6.25. Kanatta oluşan σ_x normal gerilmeleri.....	157
Şekil 6.26. Kanadın üst ve alt yüzeyinde oluşan σ_x gerilmeleri.....	158
Şekil 6.27. Kanadın iç destek elemanlarında oluşan σ_x normal gerilmeleri	158
Şekil 6.28. Kanadın iç destek elemanının (spar) dört farklı bölgesinde oluşan σ_x normal gerilmeleri	159
Şekil 6.29. Kanadın iç destek elemanlarında oluşan σ_y normal gerilmeleri	160
Şekil 6.30. Kanadın üst ve alt yüzeyinde oluşan σ_y gerilmeleri.....	161
Şekil 6.31. Kanadın iç destek elemanlarında oluşan σ_z normal gerilmeleri	161

Şekil 6.32. Kanadın üst ve alt yüzeyinde oluşan σ_z gerilmeleri.....	162
Şekil 6.33. Kanatta oluşan σ_x normal gerilmeleri.....	162
Şekil 6.34. Kanadın iç destek elemanlarında oluşan σ_x normal gerilmeleri	163
Şekil 6.35. Kanadın iç destek elemanının (spar) dört farklı bölgesinde oluşan σ_x normal gerilmeleri.....	164
Şekil 6.36. Farklı rüzgar hızlarında kanatta oluşan en büyük σ_x normal gerilmelerinin kanat boyunca değişimi	164
Şekil 6.37. Kanatta oluşan τ_{xy} kayma gerilmesi	165
Şekil 6.38. Kanatta oluşan τ_{xy} kayma gerilmesinin kanat boyunca değişimi	166
Şekil 6.39. Kanatta oluşan τ_{xy} kayma gerilmesi	167
Şekil 6.40. Kanadın üst ve alt yüzeyinde oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri.....	167
Şekil 6.41. Kanatta oluşan τ_{yz} kayma gerilmesi	168
Şekil 6.42. Kanadın üst ve alt yüzeyinde oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri.....	168
Şekil 6.43. Kanatta oluşan τ_{xz} kayma gerilmesi	169
Şekil 6.44. Kanadın üst ve alt yüzeyinde oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri.....	169
Şekil 6.45. Kanatta oluşan τ_{xy} kayma gerilmesi	170
Şekil 6.46. Kanatta oluşan τ_{xy} kayma gerilmesinin kanat boyunca değişimi	170
Şekil 6.47. Farklı rüzgar hızlarında kanatta oluşan τ_{xy} kayma gerilmesinin kanat boyunca değişimi	171
Şekil 6.48. Kanatta oluşan Von-Mises Eşdeğer gerilmesinin genel dağılımı	171
Şekil 6.49. İç destek elemanında oluşan Von-Mises Eşdeğer gerilmesinin genel dağılımı	172
Şekil 6.50. İç destek elemanının dört farklı bölgesinde oluşan Von-Mises eşdeğer gerilmesinin kanat boyunca değişimi.....	173
Şekil 6.51. Kanatta oluşan Von-Mises Eşdeğer gerilmesinin genel dağılımı.....	173
Şekil 6.52. İç destek elemanında oluşan Von-Mises Eşdeğer gerilmesinin genel dağılımı	173
Şekil 6.53. İç destek elemanının dört farklı bölgesinde oluşan Von-Mises eşdeğer gerilmesinin kanat boyunca değişimi.....	174
Şekil 6.54. Kanatta oluşan Von-Mises Eşdeğer gerilmesinin genel dağılımı.....	174
Şekil 6.55. İç destek elemanında oluşan Von-Mises Eşdeğer gerilmesinin genel dağılımı	175
Şekil 6.56. İç destek elemanının dört farklı bölgesinde oluşan Von-Mises eşdeğer gerilmesinin kanat boyunca değişimi.....	176
Şekil 6.57. Farklı rüzgar hızlarında kanatta oluşan en büyük Von-mises gerilmesinin kanat boyunca değişimi.....	176
Şekil 6.58. Kanadın kırılma indeksinin (Kİ) genel dağılımı.....	177

Şekil 6.59. Kanadın dört farklı bölgesinde kırılma indeksinin kanat boyunca değişimi	178
Şekil 6.60. Farklı hızlarda kırılma indeksinin (Kİ) kanat boyunca değişimi	179

SİMGE VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge	Açıklama	Birim
a	Eksenel indükasyon faktörü	[-]
a'	Açısal indükasyon faktörü	[-]
c	Aerofoil referans hattı uzunluğu, kanat profil uzunluğu	[m]
d	Aerofoilde maksimum kalınlık	[m]
$\bar{d}$	Boyutsuz kanat kalınlık oranı	[-]
f	Aerofoilde maksimum kamburluk	[m]
$\bar{f}$	Boyutsuz aerofoil kamburluk oranı	[-]
m	Kanat kütlesi	[kg]
$\bar{m}$	Birim kanat kesit kütlesi	[kg/m]
r	Kanat kesitinin kanat bağlantı noktasına uzaklığı	[m]
r_N	Aerofoil hücum kenarının eğrilik yarıçapı	[m]
x_d	Aerofoilde maksimum kalınlığın konumu	[m]
x_f	Aerofoilde maksimum kamburluğun konumu	[m]
A	Kanadın süpürme alanı	[m ²]
A_B	Kanatların kapladığı alan	[m ²]
C_D	Sürüklenme kuvveti katsayısı	[-]
C_L	Kaldırma kuvveti katsayısı	[-]
C_P	Güç katsayısı	[-]
C_{pmaks}	Maksimum güç katsayısı	[-]
$C_{PSchmitz}$	Girdap etkisiyle oluşan kayıplar	[-]
F_D	Sürüklenme kuvveti	[N]
F_L	Kaldırma kuvveti	[N]
K	Katılık oranı	[-]
N	Rüzgar gücü	[Watt]
N_E	Elektriksel güç üretimi	[Watt]
R	Kanadın rotor yarıçapı	[m]
Re	Reynold sayısı	[-]
U_C	Rüzgar türbininin devreye giriş hızı	[m/s]
U_F	Rüzgar türbininin devreden çıkış hızı	[m/s]

Simge	Açıklama	Birim
U_R	Rüzgar türbininin nominal hızı	[m/s]
V	Rüzgar hızı	[m/s]
W	Bileşke (izafi) rüzgar hızı	[m/s]
α	Hücum açısı	[°]
β	Koniklik açısı	[°]
δ	Şekil değişimi (deformasyon)	[m]
η_{profil}	Kanat profil kayıpları	[-]
$\eta_{uç}$	Kanat uç kayıpları	[-]
λ	Uç-hız oranı	[-]
ρ	Hava yoğunluğu	[kg/m ³]
σ	Normal gerilme	[Pa]
σ_e	Eğilme gerilmesi	[Pa]
$\sigma_{eş}$	Eşdeğer gerilme	[Pa]
σ_x	Normal gerilmenin x eksenindeki bileşeni	[Pa]
σ_y	Normal gerilmenin y eksenindeki bileşeni	[Pa]
σ_z	Normal gerilmenin z eksenindeki bileşeni	[Pa]
τ	Kayma gerilmesi	[Pa]
τ_{xy}	X ekseninde oluşan y eksen yönündeki kayma gerilmesi	[Pa]
τ_{xz}	X ekseninde oluşan z eksen yönündeki kayma gerilmesi	[Pa]
τ_{yz}	Y ekseninde oluşan z eksen yönündeki kayma gerilmesi	[Pa]
ω	Kanat açısal hızı	[rad/s]
φ	Kanat bağlama açısı	[°]

KISALTMALAR

Kısaltma	Açıklama
BP	British Petroleum
BTEP	Bin Ton Eşdeğer Petrol
DERT	Düşey Eksenli Rüzgar Türbini
EWEA	Avrupa Rüzgar Enerjisi Ajansı
FSI	Akışkan-yapı Etkileşimi
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HES	Hidroelektrik Santral
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
KEM	Kanat Elemanı Momentum Teorisi
KF	Kapasite Faktörü
LPG	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
MTEP	Milyon Ton Eşdeğer Petrol
NACA	Ulusal Havacılık Danışma Komitesi
NREL	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
RES	Rüzgar Enerji Santrali
RT	Rüzgar Türbini
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
TUREB	Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği
WWEA	Dünya Rüzgar Enerji Kurumu
YERT	Yatay Eksenli Rüzgar Türbini

RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADININ MEKANİK TASARIM ESASLARI

ÖZET

Fosil yakıtların yakın bir gelecekte tükenecek olması ve dünyada enerjiye talebin giderek artması nedeniyle ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiş, yenilenebilir enerjiden daha fazla yararlanmak amacıyla Araştırma-Geliştirme (Ar-Ge) faaliyetlerine ağırlık vermişlerdir. Rüzgar türbinleriyle ilgili Ar-Ge faaliyetlerinden bazıları rüzgar türbinlerinden daha fazla yararlanmak amacıyla türbin boyutlarının arttırılması ile ilgilidir. Rüzgar türbin boyutları arttıkça rüzgarın enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren türbin elemanı olan kanatların boyutları da artmaktadır. Kanat boyutları arttıkça da kanatta çeşitli mukavemet problemleri ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, Rüzgar türbini tasarım sürecinde kanadın farklı rüzgar hızlarındaki mekanik davranışının (gerilme ve şekil değiştirmeler) tespiti önem arz etmektedir. Bu çalışmada yatay eksenli rüzgar türbinleri, rüzgar türbin kanatları ve kanat tasarım esasları ile ilgili genel bir değerlendirme yapılarak 2 MW'lık bir rüzgar türbin kanadının tasarımı yapılmış olup daha sonra bu kanadın farklı rüzgar hızlarındaki mekanik davranışı değerlendirilmiştir. Ayrıca dış yapı skin ve iç destek spar elemanı olmak üzere iki bileşenden oluşan rüzgar türbin kanadında iç destek elemanının optimum malzeme dağılımının belirlenmesi amacıyla topoloji optimizasyonu uygulaması yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Rüzgar türbini, kanat tasarımı, kanat mekanik davranış

MECHANICAL DESIGN PRINCIPLES OF WIND TURBINE BLADE

ABSTRACT

Due to fact that both fossil fuels will be consumed completely in the near future and increment in the demand of more energy in the world, countries have turned towards to renewable energy and have focused their attention on research and development (R&D) activities to get more benefit from renewable energy. In order to provide more advantages from the wind turbines, some R&D activities related to wind turbines are interested in the increase of the turbine dimensions. As the dimensions of the wind turbine rise, the dimensions of the blades that both transform wind energy into mechanic energy and also are the basic components of the wind turbine increase. Thus, the more increment of the blade dimensions, the more various strength problems can occur on blades. For this reason, determination of mechanical behaviour (stresses and deformations) on different wind velocities has a vital importance in the wind turbine desing process. In this study, a blade for 2 MW wind turbine was designed with making a general assessment related to horizontal axes wind turbine, wind turbine blades and the design principles of the wind turbine blades, then on different wind velocities, the mechanical behaviours of that blade was evaluated. Furthermore, owing to determine the optimum material distribution of spar, topology optimization was made on the wind turbine blade that consist of two components, namely, skin and spar.

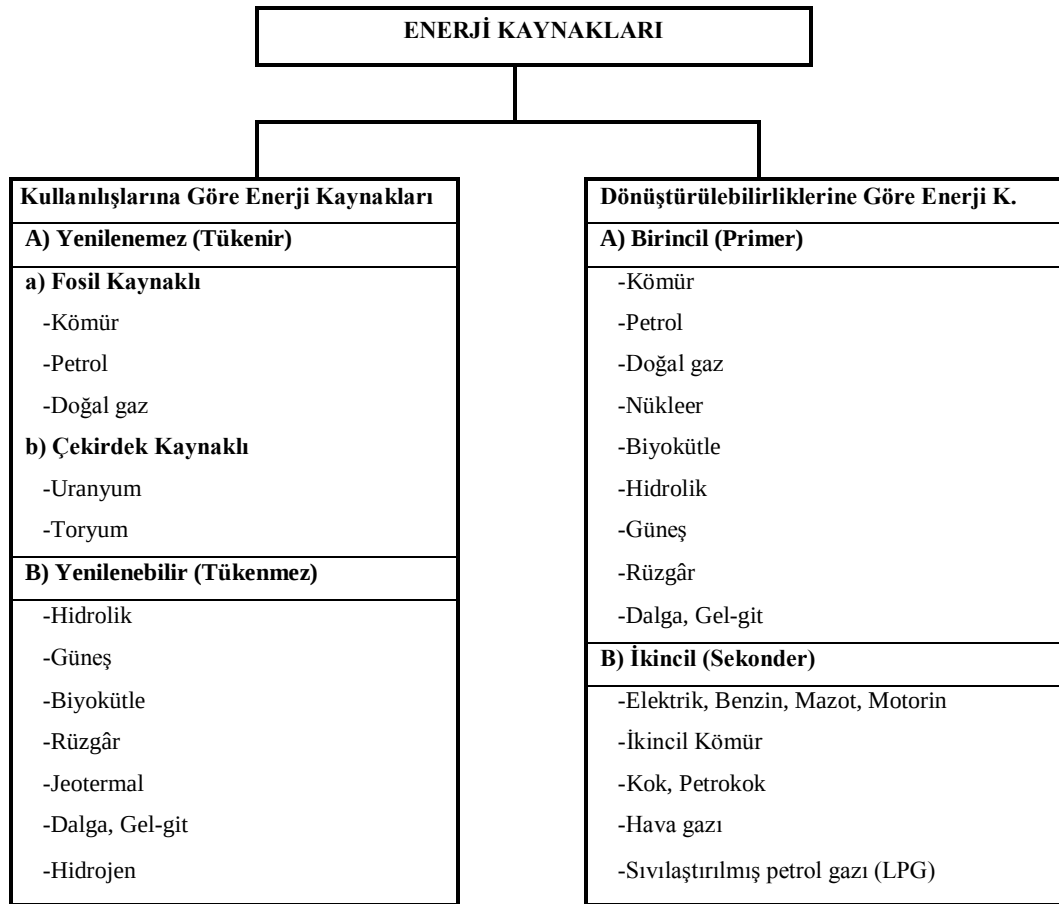
Keywords: Wind turbine, blade design, blade mechanical behaviour.

1. GİRİŞ

1.1 Enerji ve çeşitleri

Günlük hayatın hemen her alanında kullanılan **enerji**, kısaca iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Enerji, mekanik (potansiyel ve kinetik), ısı, elektrik, kimyasal ve nükleer gibi değişik türlerde bulunabilmekte, uygun yöntemlerle bir türden diğerine dönüştürülebilmekte ve farklı şekillerde sınıflandırılabilir (Şenel,2012).

Enerji kaynakları genel olarak kullanılışlarına ve dönüştürülebilirliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Kullanılışlarına göre yapılan sınıflandırmaya göre enerji kaynakları yenilenebilir ve yenilenemez olarak; dönüştürülebilirliklerine göre ise birincil ve ikincil enerji kaynakları olarak sınıflandırılmaktadır. Enerji kaynaklarının genel sınıflandırılması Şekil 1.1’de verilmiştir.



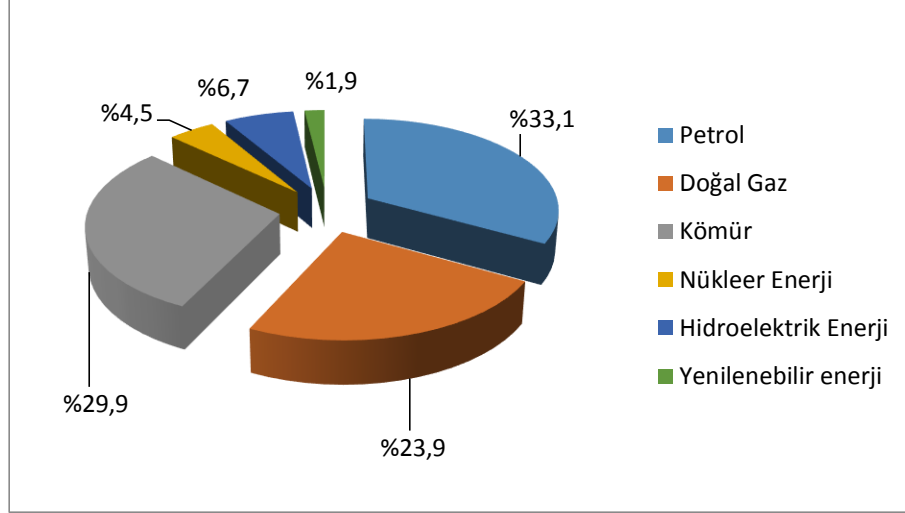
Şekil 1.1. Enerji kaynaklarının genel sınıflandırılması (Şenel,2012)

Şekilden görüldüğü gibi, en genel kullanılan sınıflandırmalardan biri enerji kaynaklarının dönüştürülebilirliklerine göre yapılan sınıflandırmadır. Bu sınıflandırmaya göre herhangi bir değişim ya da dönüşüme uğramamış kaynak **birincil (primer) enerji kaynağı**, birincil enerji kaynağının dönüşümü sonucu elde edilen enerji kaynağı ise **ikincil (sekonder) enerji kaynağı**dır. Bu sınıflandırmaya göre petrol, taş kömürü, linyit, hidrolik, nükleer, jeotermal, doğal gaz gibi enerji kaynakları birincil enerji kaynağı; elektrik, benzin, hava gazı ve sıkıştırılmış petrol gazı (LPG) gibi enerji kaynakları ise ikincil enerji kaynağıdır. Günümüzde sıklıkla kullanılan diğer bir sınıflandırma şekli ise enerji kaynaklarının kullanım sonunda tükenebilirlik ya da yenilenebilirlik özellikleri dikkate alınarak yapılan sınıflandırmadır. Bu sınıflandırmaya göre doğal bir çevrim sürecinde aynen kalabilen, kullanılmasına rağmen azalmayan, tükenmeyen enerji kaynaklarına **yenilenebilir enerji kaynakları**, bir kez kullanıldığında kendini yenileyemeyen enerji kaynakları ise **yenilenemez enerji kaynakları**dır. Yenilenemez enerji kaynakları, fosil kaynaklı ve çekirdek kaynaklı enerji kaynağı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kömür, petrol ve doğal gaz fosil kaynaklı yenilenemez enerji kaynağı olarak değerlendirilirken, uranyum ve toryum ise çekirdek kaynaklı yenilenemez enerji kaynağı grubunda yer almaktadır. Hidrolik, güneş, rüzgar, jeotermal, biyokütle ve dalga birer yenilenebilir enerji kaynağıdır (Şenel, 2012; Koltukçu, 2010).

1.2 Dünya’da Enerji Durumu

Bir ülkenin enerji üretimi ve tüketimi incelenerek ülkenin sosyal ve ekonomik yapısı hakkında bilgi edinilebilir. Bir ülkenin enerji tüketimi ile sosyal kalkınması arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bir ülke ekonomik olarak geliştikçe ve refah seviyesi yükseldikçe ülkenin enerji tüketiminin de arttığı görülmektedir. Teknolojik gelişmeler, sanayileşme, dünya nüfusundaki artış gibi sebepler dünyada enerjiye olan talebi giderek arttırmaktadır (Koç, 2008).

Dünyada kullanılan enerjinin çoğu birincil enerji kaynaklarından elde edilmektedir. 2012 yılı verilerine göre dünyada tüketilen toplam birincil enerji 12476,6 Mtep (milyon ton eşdeğer petrol) olarak gerçekleşmiş olup tüketilen enerjinin kaynaklara göre dağılımı Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2. 2012 yılında dünyada tüketilen birincil enerji kaynaklarının dağılımı (BP statistical review of world energy, 2013)

Şekilde görüldüğü gibi, 2012 yılında dünyada tüketilen birincil enerji dağılımında en büyük paya sahip kaynaklar sırasıyla; petrol (%33,1), kömür (%29,9), doğal gaz (%23,9), hidroelektrik enerji (%6,7), nükleer enerji (%4,5) ve yenilenebilir enerji (%1,9) şeklindedir. Burada yenilenebilir enerji kaynakları olarak rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, biyokütle enerjisi ve jeotermal enerji dikkate alınmıştır.

Yenilenemez ve yenilenebilir türlerde birincil enerji kaynaklarının 2011 ve 2012 yıllarındaki tüketimleri ile yüzde değişimleri Çizelge 1.1’de sunulmuştur. Çizelgeden görüldüğü gibi 2011 yılında dünyada en çok tüketilen enerji kaynakları sırasıyla; petrol (%33,4), kömür (%29,7) ve doğalgaz iken; 2012 yılında dünyada en çok tüketilen enerji kaynakları sırasıyla; petrol (%33,11), kömür (%29,90) ve doğal gazdır (%23,94).

Çizelge 1.1. Dünyada tüketilen birincil enerji kaynakları (BP statistical review of World energy, 2013)

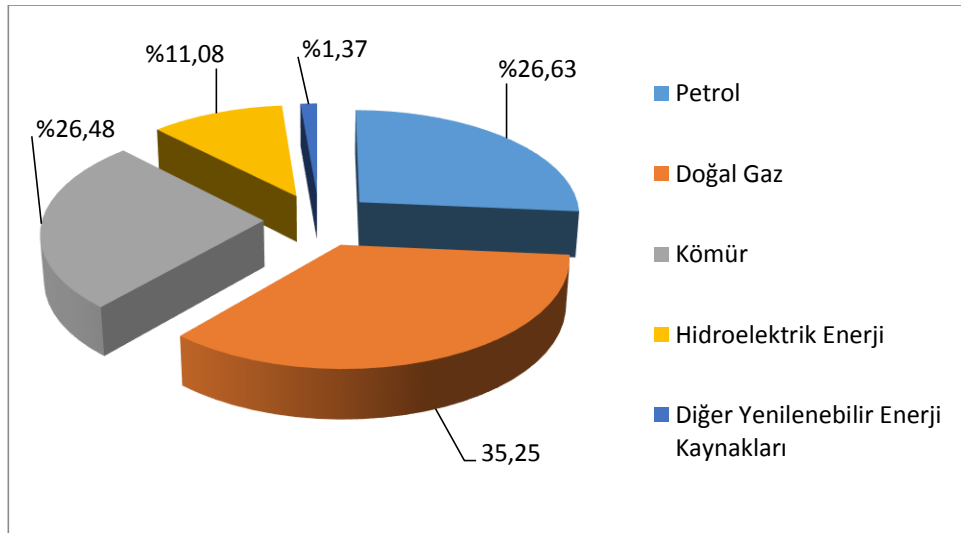
	Yenilenemez Enerji Kaynakları					Yenilenebilir Enerji Kaynakları			Genel Toplam
	Petrol	Doğal Gaz	Kömür	Nükleer Enerji	Toplam	Hidroelektrik Enerji	Diğer Yenilenebilir Enerji Kaynakları	Toplam	
2011 Yılı Tüketim Miktarı[Mtep]	4081,4	2914,2	3628,8	600,4	11224,7	794,7	205,6	1000,2	12224,97
2011 Yılındaki Tüketimin Toplam İçindeki Payı (%)	33,4	23,8	29,7	4,9	91,8	6,5	1,7	8,2	
2012 Yılı Tüketim Miktarı[Mtep]	4130,5	2987,1	3730,1	560,4	11408,1	831,1	237,4	1068,6	12476,63
2012 Yılındaki Tüketimin Toplam İçindeki Payı (%)	33,11	23,94	29,90	4,49	91,44	6,66	1,90	8,56	
2012 Yılı Tüketim Miktarının 2011 Yılı Tüketim Miktarına Göre Değişimi(%)	1,20	2,50	2,79	-6,66	1,63	4,59	15,49	6,83	2,06

2012 yılı tüketim miktarları değerlendirildiğinde yenilenebilir enerji kaynaklarından olan hidroelektrik enerji tüketim miktarının 2011 yılında 794,7 Mtep (toplam tüketimin %6,5'i), 2012 yılında ise 831,1 Mtep (toplam tüketimin %6,5'si) olduğu, 2012 yılında tüketimin bir önceki yıla göre %4,59 arttığı belirlenmiştir.

Dünyada tüketilen toplam enerji miktarları değerlendirildiğinde; 2011 yılında tüketilen enerjinin %91,8'lik kısmının (11224,7 Mtep) yenilenemez enerji kaynaklarından, %8,2'lik kısmının (1000,2 Mtep) ise yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılandığı, 2012 yılında tüketilen enerjinin % 91,44'ünün (11408,1 Mtep) yenilenemez enerji kaynaklarından, %8,56'sının (1068,6 Mtep) ise yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılandığı belirlenmiştir. Bu durum dünyada tüketilen enerjinin büyük bir kısmının yenilenemez enerji kaynaklarından karşılandığını ancak yenilenemez enerji kaynaklarının yakın bir gelecekte tükenecek olması ve çevreye verdiği zararlar nedeniyle yenilenebilir enerji kullanımı konusundaki bilincin arttığını ve yenilenebilir enerjinin giderek yaygınlaştığını göstermektedir.

1.3 Türkiye’de Enerji Durumu

Türkiye’de 2012 yılında toplam birincil enerji tüketim miktarı 119,2 Mtep olarak gerçekleşmiş olup, bu tüketimin yenilenebilir ve yenilenemez türdeki birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı Şekil 1.3’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi birincil enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımı sırasıyla doğalgaz (%35,25), petrol (%26,63), kömür (%26,48), hidroelektrik enerji (%11,08) ve yenilenebilir enerji (%1,37) şeklindedir. Burada yenilenebilir enerji kaynakları olarak rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, biyokütle enerjisi ve jeotermal enerji dikkate alınmıştır.



Şekil 1.3. 2012 yılında Türkiye’de kullanılan birincil enerji kaynaklarının dağılımı(BP statistical review of world energy, 2013)

Yenilenemez ve yenilenebilir türlerde birincil enerji kaynaklarının 2011 ve 2012 yıllarındaki tüketimleri ile yüzde değişimleri Çizelge 1.2’de verilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi 2011 yılında en çok tüketilen enerji kaynakları sırasıyla, doğal gaz (%34,9), kömür (%28) ve petrol (%26) iken; 2012 yılında sırasıyla doğal gaz (%35,25), petrol (%26,63) ve kömür (%26,48) şeklindedir.

Çizelge 1.2. Türkiye’de tüketilen birincil enerji kaynakları (BP statistical review of world energy, 2013).

	Yenilenemez Enerji Kaynakları					Yenilenebilir Enerji Kaynakları			Genel Toplam
	Petrol	Doğal Gaz	Kömür	Nükleer Enerji	Toplam	Hidroelektrik Enerji	Diğer Yenilenebilir Enerji	Toplam	
2011 Yılı Tüketim Miktarı[Mtep]	30,7	41,2	33,1	-	104,9	11,8	1,3	13,2	118,11
2011 Yılındaki Tüketime Toplam İçindeki Payı (%)	26,0	34,9	28,0	-	88,8	10,0	1,1	11,2	
2012 Yılı Tüketim Miktarı[Mtep]	31,5	41,7	31,3	-	104,5	13,1	1,6	14,7	119,17
2012 Yılındaki Tüketime Toplam İçindeki Payı (%)	26,63	35,25	26,48	-	88,37	11,08	1,37	12,45	
2012 Yılı Tüketim Miktarının 2011 Yılı Tüketim Miktarına Göre Değişimi(%)	2,61	1,21	-5,38	-	-0,46	10,55	21,91	11,70	0,90

Türkiye’deki hidroelektrik enerji tüketim miktarları değerlendirildiğinde; 2011 yılında tüketimin 11,8 Mtep (toplam tüketimin %10’u), 2012 yılında ise 13,1 Mtep (toplam tüketimin %11,8’i) olduğu, 2012 yılında tüketimin bir önceki yıla göre %10,55 arttığı belirlenmiştir.

Türkiye’de birincil enerji kaynaklarının 2012 yılı tüketim miktarı değerlendirildiğinde; toplam tüketimin büyük bir kısmının yenilenemez enerji kaynaklarından karşılandığı (%88,37), toplam tüketimin %0,9 artmasına rağmen; yenilenemez enerji tüketim miktarının azaldığı (2011 yılı 104,9 Mtep, 2012 yılı 104,5 Mtep), yenilenebilir enerji tüketim miktarının ise arttığı (2011 yılı 13,18 Mtep, 2012 yılı 14,72 Mtep) tespit edilmiştir. Bu durum

Türkiye'nin yenilenebilir enerji konusunda bilinçlendiği ve kullanılan enerji miktarının içinde yenilenebilir enerji kullanımının arttığını göstermektedir.

1.4 Türkiye ve Dünyada Yenilenebilir Enerji Durumu

Dünyada yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları; hidrolik enerji, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, güneş enerjisi ve rüzgar enerjisidir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en yaygın kullanılanlardan biri de **hidrolik enerjidir**. Bu enerjinin en yaygın kullanım şekli nehirler üzerine barajlar inşa ederek suyu rezervuarda biriktirmek, biriken suyun potansiyel enerjisinden yararlanarak türbinde elektrik enerjisi üretmektir. Bu amaçla hidroelektrik santrallerden (HES) yararlanılır (Şenel,2012).

Türkiye ve dünyada son on yıldaki hidrolik enerji tüketim miktarları Çizelge 1.3'de sunulmuştur. Çizelgeden de görüldüğü gibi hidrolik enerji kullanımı giderek artmaktadır. 2012 yılı tüketim miktarı bir önceki yıla karşılaştırıldığında Türkiye'de hidrolik enerji tüketiminin %11, dünyada hidrolik enerji tüketiminin ise %4.59 arttığı tespit edilmiştir.

Çizelge 1.3. Türkiye ve dünyada son on yıldaki hidrolik enerji tüketim miktarları[Mtep] (BP statistical review of world energy, 2013)

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Türkiye	8,0	10,4	9,0	10,0	8,1	7,5	8,1	11,7	11,8	13,1
Dünya	597,1	635,2	662,2	688,1	700,7	727,6	737,7	782,1	794,7	831,1

Jeotermal enerji, yerkürenin iç bölgesindeki magma tabakasının ısı enerjisidir. Bu ısı dünyanın merkezinden yeryüzüne doğru yayılarak elektrik enerjisi üretimi ya da ısıtma amacıyla kullanılmaktadır. Türkiye'nin jeotermal enerji potansiyeli 31500 MW olmasına rağmen, bu potansiyelden yeterince yararlanılmamaktadır (Koltukçu, 2010).

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde bulunan hidrojen gazını helyuma dönüştüren füzyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan çok güçlü bir enerjidir. Güneş ışınları vasıtasıyla dünyamıza gelen bu enerjiden yararlanmak için güneş kolektörleri, güneş santralleri ve güneş pilleri (fotovoltaik piller) gibi teknolojiler geliştirilmiştir. Bu teknolojiler sayesinde güneş enerjisi ısı enerjisi olarak doğrudan ya da elektrik enerjisine dönüştürülerek dolaylı olarak kullanılabilir. Türkiye'de güneş enerjisi yaygın olarak sıcak su ısıtma sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu sistemler yoğun olarak Akdeniz ve Ege bölgesinde bulunmaktadır. Türkiye'de ayrıca Güneydoğu Anadolu bölgesinin güneş enerjisi potansiyeli yüksek olmasına rağmen bu potansiyelden yeterince yararlanılmamaktadır (Koltukçu, 2010).

Biyokütle enerjisi, içerisinde karbonhidrat bileşikleri bulunan bitkisel ve hayvansal kökenli maddelerden elde edilen enerji kaynağıdır. Biyokütle enerjisi elde etmek için şeker

kamışı, şeker pancarı, mısır, dallı darı, arpa, keten tohumu, ayçiçeği, kolza ve soya fasulyesi gibi değişik bitkiler kullanılmaktadır. Biyokütle enerji kaynakları kullanılarak biyoetanol, biyodizel ve biyogaz gibi yakıtlar elde edilmektedir (Şenel, 2012). Türkiye’de organik atık, biyokütle ve biyogazdan enerji elde edilmesine yönelik kamu ve özel sektör yatırımları son zamanlarda artmıştır. Özellikle belediyeler atık çöplerin değerlendirilmesine yönelik atık yakma ve enerji üretim tesisleri kurmaya başlamışlardır.

Rüzgar enerjisi, güneş radyasyonunun yer yüzeylerini farklı ısıtmasından kaynaklanır. Denizlerin ve havanın farklı ısınması bir basınç farkı oluşmasına, bu basınç farkı ise havanın hareketine neden olur. Yüksek basınçtan alçak basınca doğru olan havanın bu hareketine **rüzgar** denir (Şenel, 2012). Rüzgar enerjisinden mekanik enerji veya elektrik enerjisi üretmek amacıyla yararlanılmaktadır. Elde edilen mekanik enerji genel olarak evlerde ve çiftliklerde sulama amacıyla kullanılmaktadır. Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretmek amacıyla Rüzgar Enerjisi Santrallerinden (RES) yararlanılmaktadır (Koltukçu, 2010)

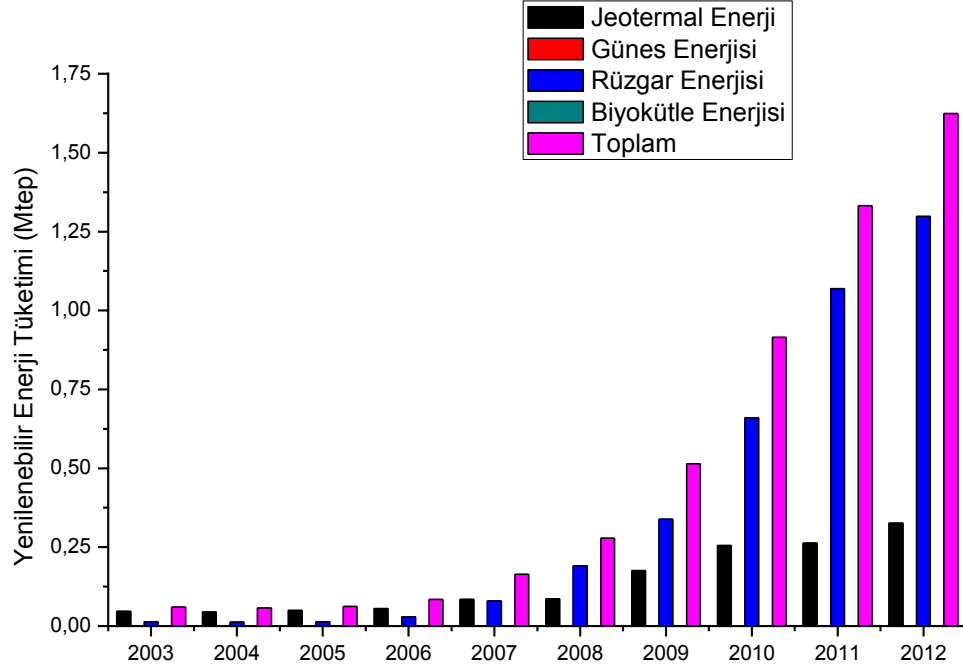
Türkiye ve dünyada son on yıldaki Mtep cinsinden jeotermal enerji, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve biyokütle enerjisi tüketim miktarları Çizelge 1.4’de gösterilmiş olup Türkiye ve dünyada yenilenebilir enerji tüketiminin giderek yaygınlaştığı belirlenmiştir.

Çizelge 1.4. Türkiye ve dünyada yenilenebilir enerji tüketimi[Mtep] (BP statistical review of world energy, 2013)

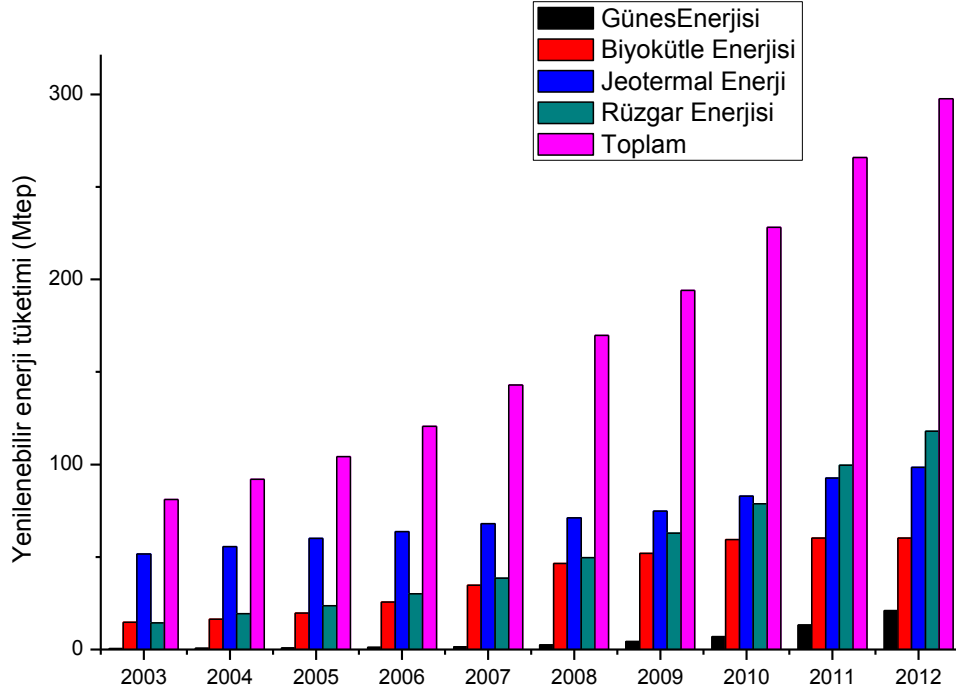
Yıllar	Jeotermal Enerji		Güneş Enerjisi		Rüzgar Enerjisi		Biyokütle Enerjisi		Toplam	
	Türkiye	Dünya	Türkiye	Dünya	Türkiye	Dünya	Türkiye	Dünya	Türkiye	Dünya
2003	0,05	51,56	-	0,45	0,01	14,34	-	14,68	0,06	81,04
2004	0,04	55,55	-	0,59	0,01	19,38	-	16,45	0,06	91,97
2005	0,05	60,13	-	0,83	0,01	23,63	-	19,70	0,06	104,29
2006	0,06	63,70	-	1,14	0,03	30,15	-	25,68	0,08	120,66
2007	0,08	67,93	-	1,53	0,08	38,62	-	34,79	0,16	142,87
2008	0,09	71,09	-	2,55	0,19	49,61	-	46,56	0,28	169,80
2009	0,18	74,79	-	4,32	0,34	62,89	-	51,99	0,51	193,99
2010	0,25	82,96	-	6,87	0,66	78,76	-	59,46	0,91	228,06
2011	0,26	92,72	-	13,28	1,07	99,57	-	60,29	1,33	265,86
2012	0,33	98,44	-	21,03	1,30	117,95	-	60,22	1,62	297,64
% Değişim Oranı (2012/2011)	23,69	6,16	-	58,44	21,48	18,45	-	-0,11	21,91	11,96

Türkiye’de son on yılda tüketilen yenilenebilir enerji miktarları değerlendirildiğinde, en yaygın kullanılan rüzgar enerjisi olduğu, enerji potansiyeli yüksek olan güneş enerjisinden ve dünyada yaygın olarak kullanılan biyokütle enerjisinden yararlanılmadığı tespit edilmiştir.

Türkiye ve dünyada yenilenebilir enerji tüketiminin son on yıldaki değişimi sırasıyla Şekil 1.4 ve Şekil 1.5'ten daha kolayca izlenebilmektedir.



Şekil 1.4. Türkiye'de yenilenebilir enerji tüketiminin son on yıldaki değişimi (BP statistical review of world energy, 2013).



Şekil 1.5. Dünya’da yenilenebilir enerji tüketiminin son on yıldaki değişimi (BP statistical review of world energy, 2013)

1.5 Enerji Üretim Santrallerinin Maliyet Analizi

Dünya’da en çok tüketilen ikincil enerji türü elektrik enerjisidir. Ülkemizde elektrik enerjisi; kömür, petrol yada doğal gaz yakıtlı termik santraller, hidroelektrik santraller, jeotermal ve rüzgar santrallerden elde edilmektedir. Enerji santrallerinde elektrik enerjisi üretimine etki eden faktörler, santralin ilk yatırım maliyeti ve işletme/bakım maliyetidir. **İlk yatırım maliyeti**, santralin işletmeye başlamadan önce enerji üretimine hazır hale getirilmesi için yapılan harcamalardır. İşletme/bakım maliyetleri ise santralden enerji üretimi için santral kurulumu sonrası yapılması gereken harcamalardır. İşletme maliyetleri, sabit işletme maliyeti ve değişken işletme maliyeti olmak üzere ikiye ayrılır. **Sabit işletme maliyeti** çalışanların maaşları ve primler, santral genel ve idari harcamaları, santral destek ekipmanları, planlanmış bakımlar gibi maliyetlerdir. **Değişken işletme maliyetleri** ise santralde kullanılan yakıtlar, enerji, su, kimyasallar, katalizörler, gazlar, yağlayıcılar, tükenen malzeme ve kaynaklar ile atıkların neden olduğu maliyetlerdir (Şenel,2012).

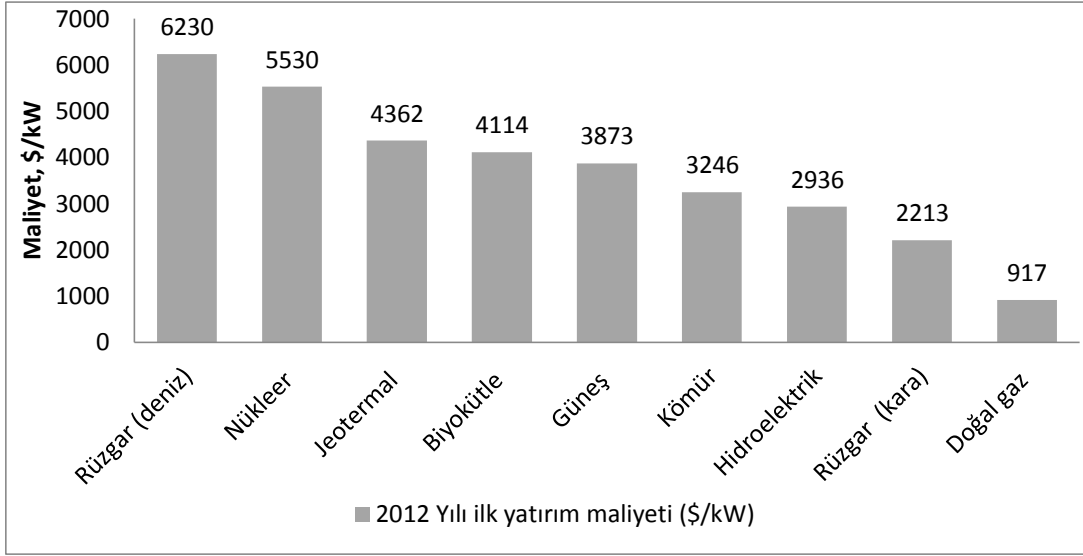
Kömür ve doğal gaz yakıtlı linyit santral, nükleer santral, hidroelektrik santral, rüzgar enerji santralleri (kara ve deniz üstü), güneş enerji santrali, jeotermal enerji santrali ve biyokütle enerji santrali için \$/kW cinsinden ilk yatırım maliyetleri, \$/kW-Yıl cinsinden sabit işletme maliyetleri ile \$/MWh cinsinden değişken işletme maliyetleri Çizelge 1.5’de verilmiştir.

Çizelge 1.5. Enerji Santrali Maliyetleri (Updated capital cost estimates for utility scale electricity generating plants, 2013)

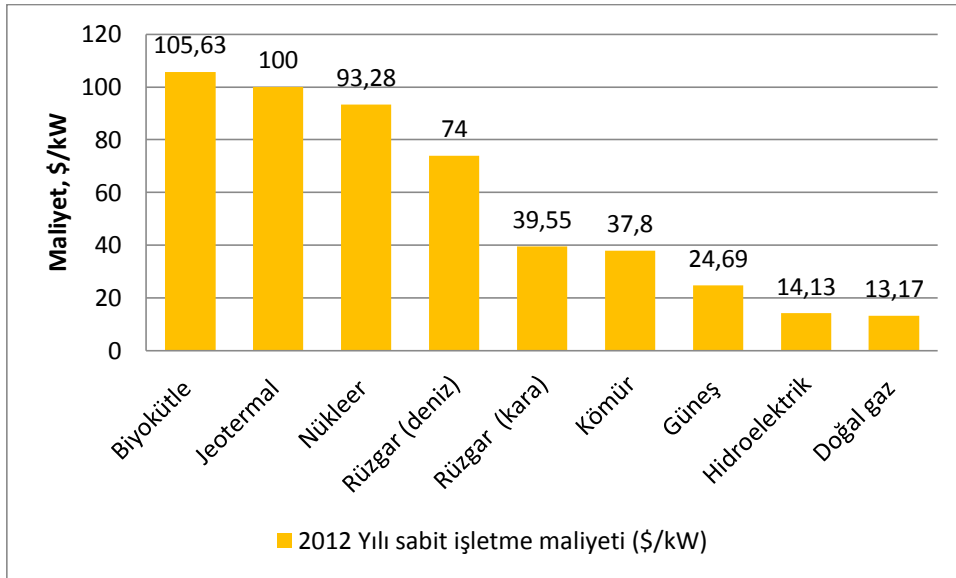
Santral tipi	İlk yatırım maliyeti (\$/kW)	Sabit işletme maliyeti (\$/kW-yıl)	Değişken işletme maliyeti (\$/MWh)
Rüzgar santrali (deniz üstü)	6230	74,00	-
Nükleer santral	5530	93,28	2,14
Jeotermal enerji santrali	4362	100,00	-
Biyokütle enerji santrali	4114	105,63	5,26
Güneş enerji santrali	3873	24,69	-
Kömür yakıtlı linyit santral	3246	37,80	4,47
Hidroelektrik santral	2936	14,13	-
Rüzgar santrali (kara)	2213	39,55	-
Doğal gaz yakıtlı linyit santral	917	13,17	3,60

Çizelgede ilk yatırım maliyeti bir birim güç elde edilmesi için ödenmesi gereken maliyet, sabit işletme maliyeti bir yılda santralden birim güç elde edilmesi için ödenmesi gereken maliyet ve değişken işletme maliyeti bir birim enerji elde edilmesi için ödenmesi gereken maliyet olarak değerlendirilmiştir. Çizelgeden görüldüğü gibi ilk yatırım maliyetleri yüksek olan santraller sırasıyla; deniz üstü rüzgar enerji santrali (6230 \$/kW), nükleer santral (5530 \$/kW) ve jeotermal enerji santrali (4362 \$/kW) iken ilk yatırım maliyetleri düşük olan santraller ise doğalgaz yakıtlı linyit santral (917 \$/kW), karada kullanılan rüzgar santrali (2213 \$/kW) ve hidroelektrik santral (2936 \$/kW) şeklindedir. Sabit işletme maliyeti en yüksek olan santraller sırasıyla biyokütle enerji santrali (105,63 \$/kW-yıl), jeotermal enerji santrali (100 \$/kW-yıl) ve nükleer santral (93,28 \$/kW-yıl); düşük olan santraller ise sırasıyla doğalgaz yakıtlı termik santral (13,17 \$/kW-yıl), hidroelektrik santral (14,13 \$/kW-yıl) ve güneş enerji santralidir (24,69 \$/kW-yıl). Değişken işletme maliyeti yüksek olan santraller biyokütle enerji santrali (5,26 \$/MWh) ile kömür yakıtlı linyit santral (4,47 \$/MWh); düşük olan santraller ise nükleer santral (2,14 \$/MWh) ile doğalgaz yakıtlı linyit santral (3,6 \$/MWh) şeklindedir. Hidroelektrik santral, rüzgar enerji santrali (kara ve deniz), güneş enerji santrali ve jeotermal enerji santralinin ise herhangi bir enerji gideri olmadığı için değişken işletme maliyeti sıfırdır. Belirlenen santrallerin ilk yatırım maliyetleri Şekil 1.6’da, sabit işletme maliyetleri Şekil

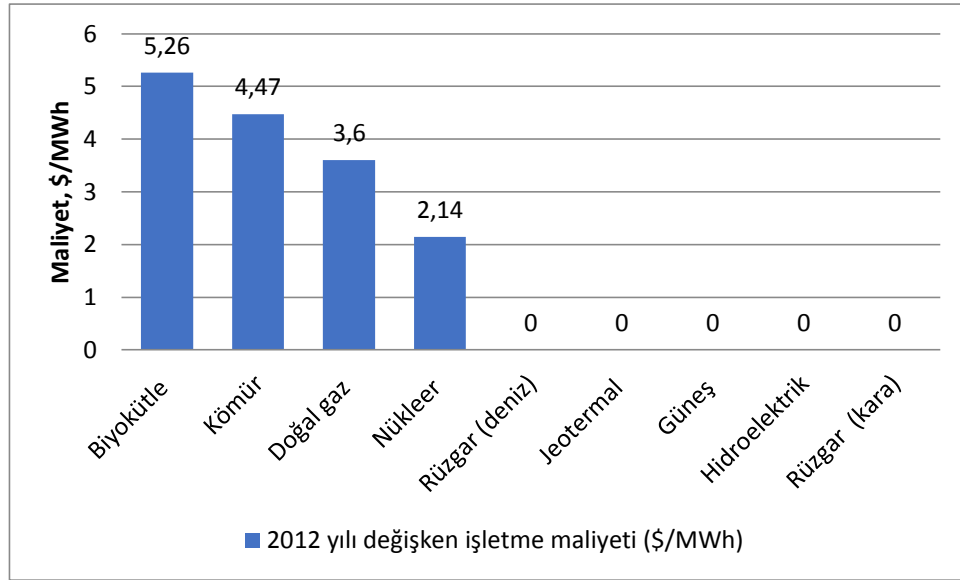
1.7’de, değişken işletme maliyetleri şekil 1.8’de, santral tipine göre ilk yatırım ve işletme maliyetleri ise toplu halde şekil 1.9’da gösterilmiştir.



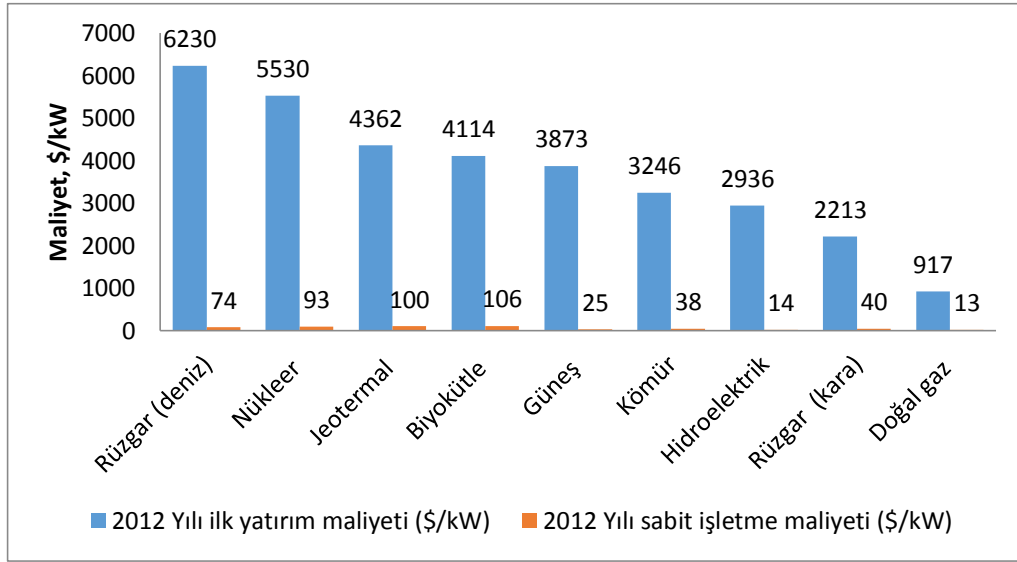
şekil 1.6. Belirlenen santrallerin ilk yatırım maliyetleri (Updated capital cost estimates for utility scale electricity generating plants, 2013).



şekil 1.7. Belirlenen santrallerin sabit işletme maliyetleri (Updated capital cost estimates for utility scale electricity generating plants, 2013)



Şekil 1.8. Belirlenen santrallerin değişken işletme maliyetleri (Updated capital cost estimates for utility scale electricity generating plants, 2013)



Şekil 1.9. Santral Tipine göre ilk yatırım ve işletme maliyetleri (Updated capital cost estimates for utility scale electricity generating plants, 2013)

Enerji santral yatırımı yapılmadan önce farklı santral tiplerinin maliyet unsurlarının değerlendirilmesi, doğru santral tipinin seçilmesi ve sağlıklı yatırım kararı alınması açısından önemlidir. Enerji santrallerinde maliyet unsurlarının değerlendirilmesinde genellikle santralin ilk yatırım maliyeti ve birim enerji üretim maliyeti dikkate alınır. Santralin birim enerji üretim maliyeti, santralin kullanım ömrü boyunca yapılan bütün harcamaları (ilk yatırım maliyeti, işletme/bakım maliyetleri) kapsayan, santralden birim enerji elde edilmesi için gerekli olan maliyeti ifade eden ekonomik bir değerlendirme kriteridir.

Belirlenen enerji santrallerinin 2008 ve 2012 yıllarındaki ilk yatırım ve birim enerji üretim maliyetleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 1.6’de sunulmuştur. Çizelgede maliyet unsurları belli bir aralıkta verilmiş olup bu aralık maliyet unsurlarının bölgesel olarak farklılık göstermesinden kaynaklanmaktadır. Çizelgedeki değişim miktarları belirlenen yıldaki değerlerin ortalaması dikkate alınarak belirlenmiştir.

Çizelge 1.6. Enerji santrallerinin 2008 ve 2012 yıllarındaki ilk yatırım ve birim enerji üretim maliyetleri (Levelized cost of energy analysis, 2008; 2012).

Santral Tipi	İlk yatırım maliyeti (\$/kW)			Birim enerji üretim maliyeti (cent/kWh)		
	2008 Yılı	2012 Yılı	Değişim (%)	2008 Yılı	2012 Yılı	Değişim (%)
Nükleer Santral	5750-7550	5385-8199	44,30	9,8-12,6	7,6-11,5	-2,39
Güneş Enerji Santrali	5500-6000	3000-3500	2,14	12,8-15,4	14,9-20,4	-14,73
Jeotermal Enerji Santrali	3000-4000	4600-7250	12,00	4,2-6,9	8,9-14,2	420,00
Biyokütle Enerji Santrali	2750-3500	3000-4000	-43,48	0,3-3,7	8,3-12,5	25,18
Kömür Yakıtlı Termik Santral	2550-5350	3000-8400	-20,45	7,4-13,5	5,7-14,7	5,93
Rüzgar Enerji Santrali	1900-2500	1500-2000	69,29	4,4-9,1	4,8-9,5	108,11
Doğal gaz Yakıtlı Termik Santral	900-1100	1006-1018	1,20	7,3-10	5,2-9,8	-13,29

Belirlenen santrallerin ilk yatırım maliyetleri değerlendirildiğinde, nükleer santralin en yüksek ilk yatırım maliyetine (2012 yılı 5385-8199 \$/kW); doğal gaz yakıtlı termik santralin ise en düşük ilk yatırım maliyetine (2012 yılı 1006-1018 \$/kW) sahip olduğu belirlenmiştir. Belirlenen santrallerin birim enerji üretim maliyetleri değerlendirildiğinde, güneş enerji santralının en yüksek birim enerji üretim maliyetine (2012 yılı 14,9-20,4 cent/kWh), rüzgar enerji santralının ise en düşük birim enerji üretim maliyetine (2001 yılı (4,8-9,5 cent/kWh) sahip olduğu belirlenmiştir.

Belirlenen santrallerin 2008 ve 2012 yıllarındaki ilk yatırım maliyetleri değerlendirildiğinde nükleer santralin, güneş enerji santralının ve rüzgar enerji santralının ilk yatırım maliyetlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu değişim santrallerin günümüzde yaygın bir şekilde kullanılması ve teknolojik gelişmelerden kaynaklanmaktadır.

Türkiye’nin fosil enerji kaynakları açısından zengin bir ülke olmadığı fakat başta rüzgar olmak üzere hidrolik, jeotermal, güneş ve biyokütle enerjisi gibi yenilenebilir enerji

kaynakları açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu bilinmektedir. Türkiye’de kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları değerlendirildiğinde en yaygın kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi rüzgar enerjisidir. Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliğinin (TUREB) 2014 yılı verilerine göre, 2013 yılında Türkiye’deki rüzgar türbinlerinin kurulu gücü 2958,45 MW seviyesine ulaşmıştır. Türkiye’de halen işletmede 75 adet Rüzgar Enerjisi Santrali (RES) bulunmaktadır. Ayrıca 35 adet RES’in inşası da devam etmektedir. İnşa halindeki RES’lerin tamamlanması ile birlikte Türkiye’deki rüzgar enerjisi kurulu gücü 4000 MW düzeyine ulaşacaktır (www.tureb.com.tr, erişim tarihi 04.03.2014). Türkiye’deki rüzgar potansiyelinin 48000 MW olduğu düşünüldüğünde, mevcut potansiyelimizin halen %10’unun bile faaliyete geçirilemediği görülmektedir. Ayrıca Türkiye, Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD) ülkeleri arasında en yüksek rüzgar potansiyeline sahip ülkedir. Avrupa ülkeleri arasında rüzgar enerjisi santrallerinden en çok yararlanan ülkeler; Almanya, İspanya ve Danimarka’dır. Türkiye’nin teknik potansiyeli Almanya ve İspanya ile karşılaştırıldığında, Almanya’nın 6.91 katı, İspanyanın ise 1.93 katı olduğu ancak bu potansiyelden Türkiye’nin yeterince yararlanamadığı görülmektedir. Ayrıca enerji santrallerinin ilk yatırım ve işletme maliyetleri değerlendirildiğinde, enerji santral maliyetleri arasında en düşük ikinci ilk yatırım maliyetinin rüzgar santralinde olduğu görülmektedir. Enerjide dışa bağımlılığımızı azaltmak, gelecekte enerji sıkıntısı yaşamamak ve çevreye zarar vermemek için yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisine gerekli önemin verilmesi, gerekli yatırımların yapılarak yerli rüzgar türbinlerinin geliştirilmesi ve rüzgar türbin santrallerinin Türkiye genelinde yaygınlaştırılması gerekmektedir (Şenel, 2012; Çetin, 2011).

Rüzgar türbinleri son yıllarda yaygınlaşmış ve fosil yakıtlı enerji santralleri ile rekabet edebilir bir düzeye ulaşmıştır. Bu gelişmenin bir sonucu olarak rüzgar türbini araştırma-geliştirme faaliyetlerine verilen önem artmıştır. Yapılan çalışmalarla rüzgar türbinlerinin kalitesini, güvenilirliğini ve verimliliğini artırmak amaçlanmaktadır. Rüzgar türbini ile ilgili yapılan araştırma-geliştirme çalışmalarının bir kısmı rüzgar türbinlerinin boyutlarının artırılarak rüzgar enerji santrallerinden daha fazla enerji elde edilmesini amaçlamaktadır. Bu çalışmaların bir sonucu olarak rüzgar türbin kanatları hızlı bir şekilde artarak devasa boyutlara ulaşmıştır. Bu nedenle günümüzde rüzgar türbin kanadı tasarım ve analizi çalışmalarına daha fazla önem verilmesi, rüzgar türbinlerinin işletme döneminde maruz kalabilecekleri yükler belirlenerek, bu yükler altındaki yapısal davranışının önceden belirlenmesi ve buna uygun tasarımlar yapılması bir zorunluluk haline gelmiştir.

1.6 Problemin Tanımı

Rüzgar türbinlerinde en çok zorlanan bileşenlerden birisi kanatlardır. Kanatlar, kanada gelen rüzgardan kaynaklanan yüklere (aerodinamik yükler), kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan yüklere (yerçekimi yükleri), kanadın hareketinden kaynaklanan yüklere (santrifüj yükleri) ve işletme koşullarından kaynaklanan çeşitli yüklere maruz kalmaktadır. Bu çalışmada rüzgar türbin kanadının farklı yükler altındaki mekanik davranışı (kanatta oluşan şekil değişimi ve gerilmeler) incelenmiştir. Bu amaçla günümüzde yaygın olarak kullanılan yatay eksenli, üç kanatlı rüzgar türbini ele alınmıştır. Üç kanatlı rüzgar türbinleri birbirlerine göre 120°'lik açısal konumda bulunmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada tek bir kanat ele alınmış olup bu kanadın farklı rüzgar hızları nedeniyle oluşan çeşitli aerodinamik yükler ve yerçekimi yükleri altındaki mekanik davranışı değerlendirilmiştir.

Kanadın mekanik davranışını belirlemek amacıyla **ANSYS Workbench** programında sistem birleştirme modülü kullanılarak akışkan-yapı etkileşim analiz modeli oluşturulmuştur. Bu model belirlenen rüzgar hızlarına maruz kalan kanatta oluşan kanadın mekanik davranışı (şekil değiştirmeler ve gerilmeleri) belirlemede sonlu elemanlar metodundan yararlanmaktadır. Bu modelde, kanada etki eden aerodinamik yükleri belirlemek için hesaplamalı akışkanlar dinamiğinden yararlanılmakta olup arak kanadın etrafındaki akış ortamında akış analizi yapılmıştır. Kurulan modelde 2 MW'lık bir kanadın mekanik davranışı incelenmiştir. Ayrıca, bu çalışmada 2 MW'lık kanadın iç yapısının özelliklerinin araştırılması ve iç yapısında iyileştirilme yapılabilmesi için kanadın iç yapısında topoloji optimizasyonu uygulaması yapılmıştır. Kanadın yapısal davranışını belirlemede kullanılan model ve topoloji optimizasyonu kullanılarak kanat tasarımına yönelik önerilerde bulunulmuştur.

1.7 Tez Düzeni

Bu çalışmanın ikinci bölümünde rüzgar türbin tasarımı, rüzgar türbinin performansı, rüzgar türbin kanadı tasarımı, rüzgar türbin kanadının aerodinamik ve yapısal analizi konularını içeren bir literatür taraması yapılmıştır. Üçüncü bölümde rüzgar türbinleri ele alınarak rüzgar türbinlerinin çalışma prensibi, rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması, rüzgar türbinleri elemanları ve rüzgar türbin maliyetleri incelenmiştir. Dördüncü bölümde yatay eksenli rüzgar türbin kanatları, kanadın yapısı ve özellikleri, kanat tasarımı, kanat tasarımında kullanılan malzemeler ve imalat yöntemleri değerlendirilmiştir. Beşinci bölümde ilk olarak 2 MW'lık bir rüzgar türbin kanadının katı modeli oluşturulup bu kanadın aerodinamik ve yapısal performansı değerlendirilmiştir. Bu amaçla ilk olarak kanat ve akış ortamının katı modeli oluşturulmuş sonra FLUENT yazılımında akış analizi yapılarak kanadın aerodinamik performansı, ANSYS Workbench yazılımında statik analiz yapılarak kanadın mekanik

davranış değerlendirilmiştir. Bu bölümde ayrıca kanat iç yapısının optimizasyonu ele alınmıştır. Altıncı bölümde elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Yedinci bölümde ise sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Rüzgar türbinleri; makina elemanları, makina tasarımı, mukavemet, malzeme bilgisi, mukavemet, akışkanlar mekaniği, yenilenebilir enerji gibi farklı bilim dallarını ilgilendiren kapsamlı bir konudur. Bu konu ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Yürütülen araştırmalar; rüzgar türbin tasarımı ile ilgili çalışmalar, rüzgar türbin kanadı tasarımı ile ilgili çalışmalar, kanadın aerodinamik ve yapısal analiziyle ilgili çalışmalar olmak üzere üç farklı grupta toplanmış ve seçilmiş ilgili araştırma çalışmaları aşağıda özetlenmiştir.

a) Rüzgar türbin tasarımıyla ilgili çalışmalar

Modern teknolojik gelişmeler rüzgar türbin teknolojisinde önemli gelişmeler yaşanmasını sağlamıştır. Günümüzde rüzgar türbinlerinin kullanımı gün geçtikçe arttığından rüzgar türbinleri ile ilgili birçok yapılmaktadır. Rüzgar türbin tasarımıyla ilgili yürütülen önemli çalışmalardan bazıları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Ackermann ve Söder (2000), yaptıkları çalışmada rüzgarın oluşumu, rüzgardan enerji elde edilmesi, rüzgar türbinleri ve çeşitleri, rüzgar türbinlerinin geçmişteki ve çalışmanın yapıldığı dönemdeki durumu, rüzgar türbin ekonomisi, günümüzde yaygın olarak kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinlerinin önemli tasarım değişkenleri (kanat sayısı, güç kontrol sistemi, enerji üretim ve taşıma sistemi) ve farklı amaçlarla, farklı iklim koşullarında kullanılan çeşitli rüzgar türbini uygulamaları ile ilgili genel bir değerlendirme yapmışlardır. Ayrıca, rüzgar türbin teknolojisindeki gelişmelerin, rüzgar türbini kurulum maliyetlerini azalttığından rüzgar santrallerinin, fosil yakıtlı enerji üretim teknolojileri ile rekabet edebilir hale geldiği vurgulanmıştır.

Elektrik enerjisi üretimi amacıyla kullanılan rüzgar türbinleri ile ilgili genel bir değerlendirme **Bansal ve ark. (2002)** tarafından yapılmıştır. Bu kapsamda, rüzgar gücünü etkileyen faktörler, rüzgar santrallerinin yerleşimi, rüzgar santrallerinin şebeke bağlantısı, rüzgar türbin elemanlarının seçim kriterleri ile rüzgar santrallerinin çevreye etkileri üzerinde durulmuştur.

Türkiye ve dünyadaki rüzgar enerji potansiyelini ele alan **Kaygusuz (2004)** bu potansiyel doğrultusunda yapılan çalışmaları değerlendirmiştir. Ayrıca rüzgar santrallerinden

enerji üretim maliyetleri ile diğer enerji kaynaklarından enerji üretim maliyetleri karşılaştırılmış ve rüzgar türbinlerinin çevresel etkileri üzerinde durmuştur. Bu çalışmada rüzgar enerjisinin gelecekte enerji kaynakları arasında yaygın bir şekilde kullanılacağına altı çizilmiştir.

Herbert ve ark. (2005), çalışmalarında rüzgar türbin teknolojisi ile ilgili genel bir değerlendirme yapmışlardır. Bu amaçla bazı ülkelerin rüzgar enerjisi potansiyelleri ile rüzgar santrali kurulu güçleri, rüzgar santrallerinin yer seçim kriterleri, rüzgar türbini aerodinamiği, rüzgar türbinlerinin performansı, rüzgar türbinlerinin güvenilirliği, rüzgar türbin teknolojisi (rüzgar türbini tasarımı ve elemanları), rüzgar türbinlerinin şebeke bağlantısı, rüzgar türbini kontrol sistemleri ve çeşitli rüzgar türbini uygulamalarından bahsedilmiştir. Bu çalışma; rüzgar türbin üreticileri, elektrik enerjisi üreticileri ve enerji yatırımı konusunda karar verme yetkisine sahip kimseler için rüzgar türbinlerinin tasarım, kurulum ve işletme dönemlerinde yararlı olabilecek önemli bir çalışmadır.

Tresher ve ark. (2008), yürüttükleri çalışmada rüzgar türbinlerinin bu çalışmanın yapıldığı dönemdeki durumunu inceleyerek Araştırma-Geliştirme (Ar-Ge) faaliyetleri ile ilgili genel bir değerlendirme yapmışlardır. Bu kapsamda rüzgar türbini boyutları, günümüzde kullanılan rüzgar türbini elemanlarından rotor, kontrol mekanizması, güç iletim mekanizması ve kule gözden geçirilmiş, gelecekte kullanılabilecek elemanlar hakkında bir öngörude bulunulmuştur. Ayrıca, bu çalışmada deniz üstü rüzgar santrallerinin üzerinde durularak gelecekte kullanılması muhtemel santraller değerlendirilmiştir. Rüzgar türbinlerinin yaygınlaşmasıyla rüzgar türbinlerinin araştırma-geliştirme faaliyetlerine olan ilginin arttığı, kara ile deniz üstü rüzgar santrallerinin yakın gelecekte daha fazla yaygınlaşmasının beklendiği vurgulanmıştır.

b) Rüzgar türbin kanadı tasarımıyla ilgili çalışmalar

Rüzgar türbinlerinde, enerji üretim zincirinin ilk halkası kanatlardır. Kanadın aerodinamik özellikleri türbinden elde edilecek güç miktarını; yapısal özellikleri ise rüzgar türbin elemanlarının mekanik davranışını doğrudan etkilemektedir. Günümüzde yaygın olarak yatay eksenli rüzgar türbinleri kullanılmaktadır. Bu türbinler ticari ürünler olduğundan kanat tasarımı ile ilgili bilgiler sınırlıdır. Kanat tasarımı ile ilgili bilgiler yalnızca geçmiş yıllarda yürütülmüş DOWEC, Upwind, DOE/NREL 5 MW ve Sandia 100 m kanat tasarımı gibi çalışmalardan elde edilebilmektedir. Bu projeler ile önceki yıllarda yapılmış çalışmalardan bazıları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

DOWEC (1997-2003), büyük boyutlu ve ekonomik deniz üstü rüzgar santrali geliştirilmesi amacıyla yürütülmüştür. Bu proje ile 6 MW'lık deniz üstü rüzgar türbini geliştirilmiştir. Bu kapsamda 64,5 m'lik rüzgar türbin kanadı tasarlanarak profil giriş hattı uzunlukları, profil yerleşimi, kanat profil giriş hattı boyunca kanadın birim ağırlığının değişimi ile kanadın geometrik ve rijitlik özellikleri belirlenmiştir (**Hendriks ve ark. 2001**).

NREL 5 MW çalışmasında, Amerikan ulusal yenilenebilir enerji laboratuvarı (NREL) tarafından FAST yazılımı kullanılarak 5 MW'lık bir rüzgar türbininin aeroelastik modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model kule, kanatlar, nacelle, güç iletim ve rüzgar türbini kontrol mekanizmasını içermektedir. Bu çalışmada DOWEC projesinde kullanılan kanadın uzunluğu 61,5 m'ye düşürülerek kanadın yapısal ve aerodinamik özellikleri belirlenmiştir (**Jonkman ve ark. 2009**).

Upwind projesi büyük boyutlarda rüzgar türbini geliştirmek amacıyla yapılmış bir araştırma programıdır. Bu çalışmada 61,5 m boyunda DOWEC kanadı ile aynı özelliklere sahip cam kompozit malzeme kullanılan rüzgar türbin kanadı geliştirilmiştir. Bu çalışma ile literatüre kanadın kompozit yapısı ile ilgili bilgi kazandırılmıştır (**Peerigna, 2011**).

Sandia 100 m kanat tasarımı çalışmasında, Sandia laboratuvarında büyük kanat teknolojisinin iyi yönleri ve kötü yönleri araştırılmıştır. Bu amaçla önceden yapılan DOWEC, NREL 5 MW ve Upwind çalışmalarında kullanılan kanatlar değerlendirilerek 100 m'lik bir kanadın geometrik özellikleri ve malzeme özellikleri belirlenmiştir (**Griffith ve Ashwill, 2011**).

Deniz akıntı türbinlerinde kompozit kanatların tasarımı konusunda gerçekleştirilen çalışma ile türbin kanat tasarımı için bir tasarım metodolojisi geliştirilmiştir (**Asseff, 2009**). Bu kapsamda hidrodinamik kanat tasarımı ile ilgili genel bir değerlendirme yapılarak, kanat elemanı teorisine göre maksimum güç elde edilmesini sağlayacak kanat tasarım parametreleri (kanat profil istasyonları, profil giriş hattı uzunluğu, bağlama açısı) belirlenmiş ve 3 m'lik dört farklı kanat tasarımı yapılmıştır. Ayrıca kanat tasarımında kullanılacak malzemeler (karbon fiber, çelik ve cam fiber), lamina kalınlıkları ve fiber doğrultuları gibi parametreler belirlenerek kanat tasarımı tamamlanmıştır. Tasarlanan kanat ANSYS programında sonlu eleman modeli oluşturularak statik analize tabi tutulmuş ve kompozit malzemeler için geliştirilmiş kırılma teorilerinden Tsai-Wu ile Maksimum Gerilme Kriterlerine göre kanadın kırılma kontrolü yapılmıştır. Kanadın yapısal analizinde ayrıca rezonanstan kaçınmak için kanadın serbest titreşim analizi yapılarak kanadın modları belirlenmiştir.

Aktemur (2010), düşey eksenli farklı **savanius** türbinlerinin tasarımını yaparak bu türbinlerin aerodinamik performansını değerlendirmiştir. Bu amaçla dokuz farklı savanius çark modeli 3000×3000 ve 6000×6000 boyutlarındaki akış ortamlarında akış analizine tabi tutularak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirme sonucu 3000×3000 boyutlarındaki kapalı alanda oluşan maksimum ve minimum basınç arasındaki farkın 6000×6000 boyutlarındakinden büyük olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmayla düşük aerodinamik özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılamayan savanius çarklarının tasarımı ve aerodinamik özelliklerinin belirlenmesi konusunda literatüre çeşitli bilgiler kazandırmıştır.

Hameed ve Afaq (2013), yaptıkları çalışmada düşey eksenli **darrieus** tipi rüzgar türbin kanadının analitik ve numerik yöntemle tasarım ve analizini yapmışlardır. Bu çalışmada düşey eksenli rüzgar türbin tasarım parametreleri kısaca özetlenerek darrieus tipi düşey eksenli rüzgar türbin kanat tasarımı yapılmıştır. Bu kanadın olağanüstü rüzgar koşullarındaki şekil değişimi ile kanatta oluşan gerilmeler analitik olarak ve sonlu elemanlar metoduyla belirlenmiştir. Kanadın sonlu elemanlar metoduyla analizi için ANSYS programında iki farklı eleman (BEAM 3 ve SOLID 45) kullanılarak elde edilen analitik ve numerik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda BEAM 3 elemanlı numerik çözüm ile analitik çözüm sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada ayrıca darrieus tipi düşey eksenli rüzgar türbinlerinde şekil değişimi ve eğilme gerilmesi oluşumunda aerodinamik kuvvetlerin yanında santrifüj kuvvetlerin de önemli rol oynadığı ve rüzgar türbin kanat tasarımında santrifüj kuvvetinin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

c) Kanadın aerodinamik ve yapısal analiziyle ilgili çalışmalar

Rüzgar türbin kanatları, türbinden maksimum güç elde edilebilmesi için belirli aerodinamik özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır. Kanadın aerodinamik performansını belirlemek için kullanılan yöntemlerden birisi aerodinamik analizdir (akış analizi). Akış analizi ile kanada etki eden kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri gibi aerodinamik yükler belirlenmektedir. Kanat tasarımında aerodinamik özelliklerin yanında mekanik özellikler de önemlidir. Rüzgar türbin kanatları, üzerine gelen yüklere dayanabilecek ve bu yükleri türbinin diğer elemanlarına aktarabilecek özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanmalıdır. Kanadın mekanik özelliklerini belirlemek için kanadın yapısal analizleri yapılmaktadır. Kanadın aerodinamik ve yapısal analizi ile ilgili yapılmış olan çalışmalardan bazıları seçilerek aşağıda sunulmuştur.

Tekeli (1993), yürüttüğü çalışmada bir rüzgar türbin kanadının (pala) statik durumda yapısal analizini gerçekleştirmiştir. Bu amaçla 150-200 kW gücünde, NACA 4418 profiline

sahip kanat geometrisi oluşturulmuş ve bu yapı üçgen ile dörtgen sonlu elemanlara ayrılarak vortex lattice metoduyla yapıdaki her bir sonlu elemanın aerodinamik basınç katsayısı belirlenmiştir. Ayrıca, kanat malzemesi olarak alüminyum belirlenerek kanadın yapısal analizi yapılmış, kanatta oluşan şekil değişimleri belirlenmiştir.

750 kW'lık bir rüzgar türbin kanadının tasarımı ve yapısal analizi **Kong ve Kim (2000)** tarafından yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle 23.3 m'lik E-Cam/epoksi malzemeli bir kanat tasarlanarak üretilmiş ve test edilmiştir. Tasarımın kontrolü için kanada etki eden yükler belirlenmiş ve NISA II sonlu elemanlar kodu kullanılarak kanadın temel mukavemet hesapları yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu kanadın yeterli mukavemete sahip olduğu belirlenmiş ve üretilerek özel yapısal test cihazında test edilmiştir. Yapılan testler sonucu kanatta burkulma, kompozit tabakaların ayrılması ve kanadın uç kısmında aşırı miktarda deformasyon olduğu görülmüştür. Bu sorunları çözmek için tasarım yeniden yapılandırılmış, oluşan yeni tasarımın sonlu elemanlar metodu ile güvenilirliği ve kararlılığı değerlendirilmiştir. Ayrıca yeni tasarımın çeşitli rüzgar hızlarındaki dayanımı incelenerek kanadın emniyet katsayısı belirlenmiştir.

Mahri ve Rouabah (2008) yürüttükleri çalışmalarında kanada etkiyen dinamik yükler ve etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla kanat elemanı teorisinden yararlanılarak kanada etkiyen aerodinamik yükler belirlenmiş ve sonlu elemanlar metoduyla kanadın serbest titreşim (modal) analizi yapılmıştır. Bu çalışmada son olarak belirlenen aerodinamik yükler ve modal analiz sonuçlarından yararlanılarak ANSYS programında kanatta oluşan dinamik gerilmeler belirlenmiştir.

Yatay eksenli bir rüzgar türbin kanadının çalışma esnasındaki dinamik davranışını inceleyen **Xiong ve ark. (2010)**, bu çalışmada kanat elemanı momentum teorisinden yararlanılarak kanada etki eden aerodinamik yükler, kanada etki eden yerçekimi yükleri ve santrifüj yüklerini kullanarak kanadın dinamik analizi yapmışlardır. Yapılan analiz sonucu büyük boyutlardaki bir rüzgar türbin kanadı çalışırken dikkate alınması gereken büyüklüklerde titreşim ve şekil değişimi olduğu, kanadın santrifüj rijitliği ile aerodinamiğinin kanat mekanik davranışını önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir.

Tenguria ve ark. (2011), yaptıkları çalışmada 1.65 MW'lık Vestas V82 yatay eksenli rüzgar türbininin 38.95m uzunluğundaki kanadının iç destek yapısını incelemiştir. Bu çalışmada kanat, NACA 63-221 profili kullanılarak oluşturulmuştur. Kanadın iç destek yapısı için kare ve kare ile diyagonal geometrinin bir arada bulunduğu melez yapı gibi iki farklı alternatif değerlendirilmiştir. Kanat ve iç destek yapı E-Cam /Epoksi kompozit malzeme

kullanılarak ANSYS programında analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre hibrit destek yapılı sahip kanatta şekil değişiminin daha az olduğu belirlenmiştir.

Karpat (2011), gerçekleştirdiği çalışmada rüzgar türbin kanatlarında kullanılan kompozit yapıların mekanik özelliklerini incelemiştir. Bu amaçla dört kat cam kumaşı, iki kat cam kumaşı/balsa/iki kat cam kumaşı ve iki kat cam kumaşı/köpük/iki kat cam kumaşı olmak üzere üç farklı numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin çekme, burkulma, eğilme ve titreşim testleri yapılarak elde edilen sonuçlar ANSYS programında numunelerin gerilme ve şekil değiştirme dağılımları ile titreşim modlarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucu, cam kumaşı/balsa ya da köpük/cam kumaşı sandviç yapısının, kompozit parçalara eğilme ve burkulma rijitliği kazandırarak mekanik özelliklerini iyileştirdiği ve yapıya gelen herhangi bir darbeyi sönümleme özelliği kazandırdığı tespit edilmiştir.

Kwon ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada yerçekimi kuvvetine maruz kalan rüzgar türbin kanadının dinamik davranış ve kararlılığını incelemiştir. Kanadın dinamik davranışını belirlemek amacıyla eğim ve yönelme (pitch) açısı dikkate alınarak kanadın hareket denklemi oluşturulmuştur. Bu çalışmada dinamik kararsızlığın kanadın belirli açısal hızlarında ortaya çıktığı, kanadın mukavemet kararsızlığının yönelme açısı ve kanat uzunluğuna bağlı olduğu, eğim açısının etkisinin bu kararsızlığa etkisinin az olmasına rağmen eğim açısı arttıkça kararsızlığın da artacağı dolayısıyla eğim açısının mümkün olduğunca düşük seviyede olması gerektiği belirtilmiştir.

Yatay eksenli bir türbin kanadının aerodinamik karakteri **Chandrala ve ark. (2012)** tarafından incelenmiştir. Bu amaçla NACA 4420 profiline sahip bir kanadın ANSYS CFX programında farklı hücum açılarında (0°, -22.5°, -30°, -37.5°, -45°, -60°, -90°) bilgisayar destekli akış analizi yapılmıştır. Yapılan akış analizlerinin sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Yapılan akış analizleri değerlendirildiğinde kanadın hücum açısı arttıkça kanattan elde edilecek kuvvetlerin de arttığı belirlenmiştir.

Wu ve Young (2012), çalışmasında yatay eksenli bir rüzgar türbininin 3,5 m'lik kompozit kanadının yapısal analizi yapılmıştır. Kanada etki eden aerodinamik yükleri belirlemede kullanılan yöntemler değerlendirilerek Kanat Elemanı Momentum (**KEM**) teorisine göre kanada etki eden yükler belirlenmiştir. Kanat tasarım için gerekli olan tasarım parametreler **Matlab** programında elde edilerek kanat katı modeli **ANSYS** programında oluşturulmuştur. Daha sonra ise kanat, **IEC 61400-1** rüzgar türbini tasarım/ güvenlik standartlarına göre yapısal analize tabi tutulmuştur. Yapılan analiz sonucu kanatta oluşan gerilmeler ile kanadın çeşitli kısımları için emniyet katsayısı belirlenmiştir.

Bhatt ve Satankar (2013), yaptıkları çalışmada düz ve değişken eğim açılı iki farklı kanadın mekanik davranışını incelemişlerdir. Bu amaçla kanat elemanı momentum teorisinden yararlanarak 10,11,12,13.5 ve 15 m/s'lik rüzgar hızlarında aerodinamik yükler belirlenmiştir. Kanadın katı modeli **CATIA** programında oluşturularak **ANSYS** programına aktarılmış ve belirlenen aerodinamik yükler ile yerçekimi yükleri dikkate alınarak kanadın statik analizi yapılmıştır. Bu çalışma ile rüzgar hızı arttıkça beklenildiği gibi aerodinamik yüklerin ve dolayısıyla da kanatta oluşan gerilmelerin arttığı belirlenmiştir.

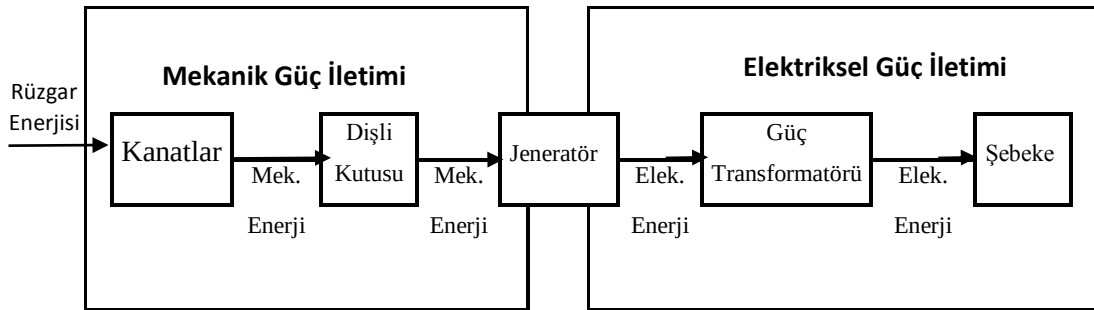
Büyük boyutlardaki yatay eksenli rüzgar türbin kanadının aerodinamik ve yapısal karakteri **Cai ve ark. (2013)** tarafından incelenmiştir. Bu kapsamda 1.5 MW'lık kanadın katı modeli **Unigraphics NX** programında oluşturulmuştur. Kanadın aerodinamik karakterini belirlemek için farklı rüzgar hızlarında (5,6.5,8, 9.5, 10.5, 11.5 ve 25 m/s) kanat etrafındaki akış ortamında akış analizi yapılarak kanadın etrafında oluşan rüzgar hızları, kanada etki eden basınç dağılımı ve kanattan güç elde edilmesini sağlayan bileşke kuvvetler belirlenmiştir. Kanadın yapısal karakterini değerlendirmek için ise ANSYS programında kanadın en fazla zorlandığı kabul edilen rüzgar hızı (IEC 61400 standardına göre 59 m/s) için akış analizi yapılarak kanada etki eden basınç dağılımı belirlenmiştir. Bu basınç değerleri kanada etki eden aerodinamik yükler olarak tanımlanıp kanadın en fazla zorlandığı hal için statik analizi yapılmıştır. Bu çalışmada ayrıca kanadın serbest titreşim analizi yapılarak kanadın modları belirlenmiştir.

3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Günümüzde rüzgar enerjisinden yararlanmak amacıyla rüzgar türbinleri geliştirilmiştir. Rüzgar türbinleri, rüzgar enerjisini mekanik enerji veya elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Rüzgar enerjisinden elde edilen mekanik enerji sulama, kesme, biçme, öğütme, sıkıştırma ve yağ çıkarma gibi amaçlarla; elektrik enerjisi ise şebekeye bağlanılarak ya da şebeke bağlantısı olmayan yerlerde elektrik ihtiyacının karşılanmasında kullanılmaktadır (Çelik, 2012).

3.1 Rüzgar Türbinlerinin Çalışma Prensibi

Rüzgar türbinleri genel olarak kule, jeneratör, dişli kutusu, göbek, elektrik-elektronik elemanlar ve kanatlardan oluşmaktadır. Elektrik enerjisi üretimi amacıyla kullanılan modern rüzgar türbinlerinin çalışma prensibi genel olarak kinetik enerji, mekanik enerji ve elektrik enerjisi döngüsüne dayanmaktadır. Buna göre rüzgarın kinetik enerjisi kanatlar yardımıyla yakalanıp mekanik enerjiye dönüştürülerek düşük hızlı şafta iletilir. Düşük hızlı şafta gelen mekanik enerji, dişli kutusu yardımıyla dönüş hızı artırılıp momenti azaltılarak yüksek hızlı şafta, oradan da jeneratöre iletilir. Jeneratör ünitesinde ise mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülerek şebekeye gönderilmektedir (Şenel, 2012). Modern rüzgar türbinlerinde elektrik enerjisi üretimi Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Modern rüzgar türbinlerinde elektrik enerjisi üretimi (Şenel, 2012)

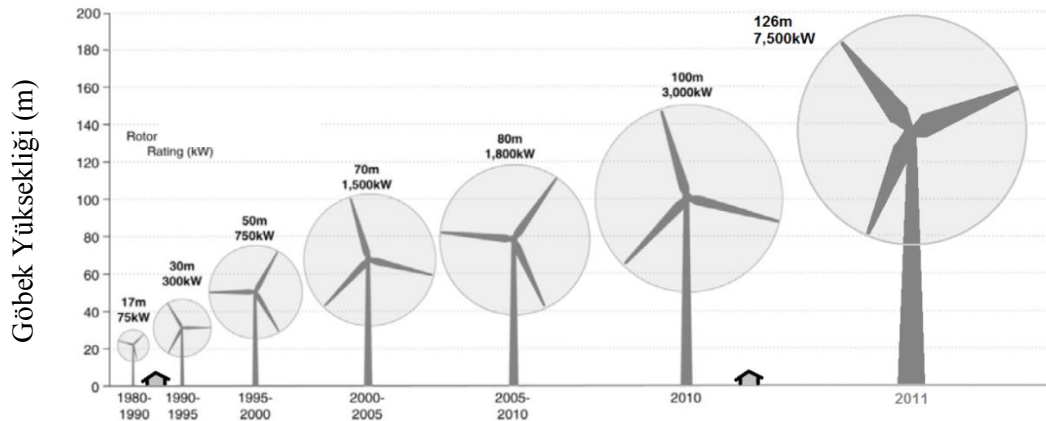
3.2 Rüzgar Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi

Eski dönemlerden itibaren rüzgar gücünden yararlanmak amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Rüzgar gücünden ilk olarak yel değirmenleri ve yelkenli gemiler vasıtasıyla yararlanılmıştır. Rüzgar gücü, yel değirmenlerinde buğday gibi tahılların öğütülmesinde; yelkenli gemilerde ise hareket sağlamak amacıyla kullanılmıştır.

Yel değirmenlerinin M.Ö. 5. yy'da kullanıldığı tahmin edilmekte olup, yel değirmenleri ile ilgili yazılmış ilk ciddi eserlere M.S. 7. yy da rastlanmış, yel değirmeni kullanımı ile ilgili ilk bilgiler elde edilmiştir. Türkler ve İranlılar ilk yel değirmenlerini, M.S. 7.'yy. da kullanmaya başlamıştır. Avrupalılar ise yel değirmenlerini haclı seferleri sırasında görmüş, ilk yel değirmenleri M.S. 12. yy.'da Fransa, İngiltere ve Hollanda'da kullanılmaya başlanmıştır. Rüzgar gücünden istifade etmek için önceleri düşey eksenli yel değirmenleri, daha sonra ise yatay eksenli yel değirmenleri kullanılmıştır. Ancak rüzgar gücü kullanımı sadece tarımsal sulama ve hububat üretme uygulamaları ile sınırlı kalmıştır (Yerebakan, 2001). Rüzgar gücünün deniz ulaşımında kullanımının (yelkenli gemiler) ise Eski Çağ'da Mısırlılar ve Fenikeliler zamanında başladığı düşünülmektedir. Buharlı gemilerin icadına kadar yelkenliler kıtalararası ulaşım ve ticarete önemli rol oynamıştır (Hayli, 2001).

Elektrik enerjisinin keşfi ile beraber rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme çalışmaları başlamıştır. Elektrik enerjisi üretimi amaçlı ilk rüzgar türbini 1891 yılında Dane Poul Lacour tarafından geliştirilmiş olmasına rağmen yaygın bir şekilde kullanılmamıştır. 1970'lerin başlarında enerji kaynaklarının üretim maliyetlerindeki artış rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimini gündeme getirmiş, 1990'ların sonunda kullanımı giderek yaygınlaşmaya başlamış ve günümüzün önemli enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir (Yılmaz, 2008).

Rüzgar türbinlerinin giderek yaygınlaşması ve teknolojik gelişmeler rüzgar türbin maliyetlerini azaltarak, rüzgar türbinlerinin daha verimli ve güvenilir hale gelmesini sağlamıştır. Rüzgar türbinleri geçmişte 50-100 kW'lık sistemler iken, günümüzde yerini 1 MW ve üzeri büyüklükte sistemlere bırakmıştır. Rüzgar türbin boyutlarının 1980-2011 yılları arasındaki değişimi Şekil 3.2'de verilmiştir.

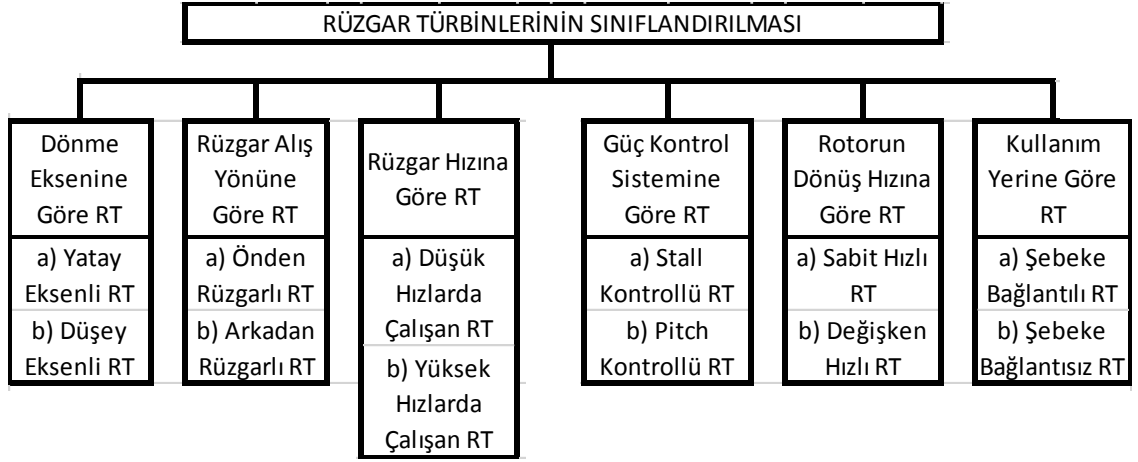


Şekil 3.2. Rüzgar türbin boyutlarının 1980-2011 yılları arası değişimi (URL-16)

Şekilde görüldüğü gibi rüzgar türbin boyutları ile türbin gücü zamanla artmıştır. Günümüzde rüzgar türbinlerinden daha fazla güç elde edebilmek amacıyla rüzgar türbin boyutlarının artırılması ile ilgili çalışmalar yürütülmektedir.

3.3 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

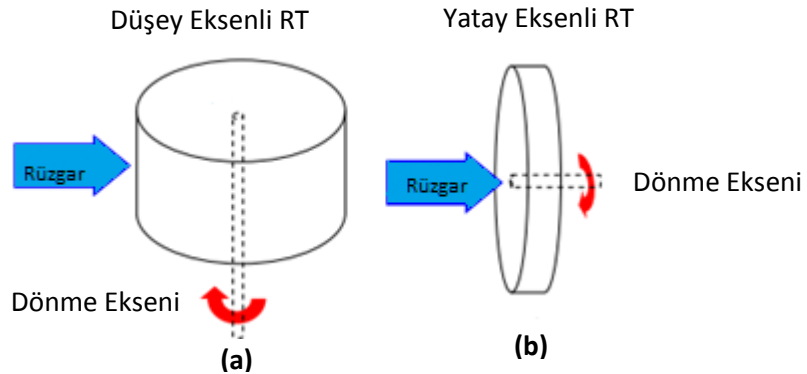
Rüzgar türbinleri (RT) dönme eksenine, rüzgar alış yönüne, rüzgar hızına, güç kontrol sistemine, rotor dönüş hızına ve kullanım yerine göre sınıflandırılabilir. Rüzgar türbinlerinin genel sınıflandırması Şekil 3.3’de verilmiştir (Şenel 2012).



Şekil 3.3. Rüzgar türbinlerinin genel sınıflandırılması (Şenel, 2012)

3.3.1 Dönme eksenine göre sınıflandırma

Dönme eksenine göre rüzgar türbinleri yatay eksenli ve düşey eksenli rüzgar türbinleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Şekil 3.4a’da yatay eksenli, Şekil 3.4b’de düşey eksenli rüzgar türbini şematik olarak gösterilmiştir.

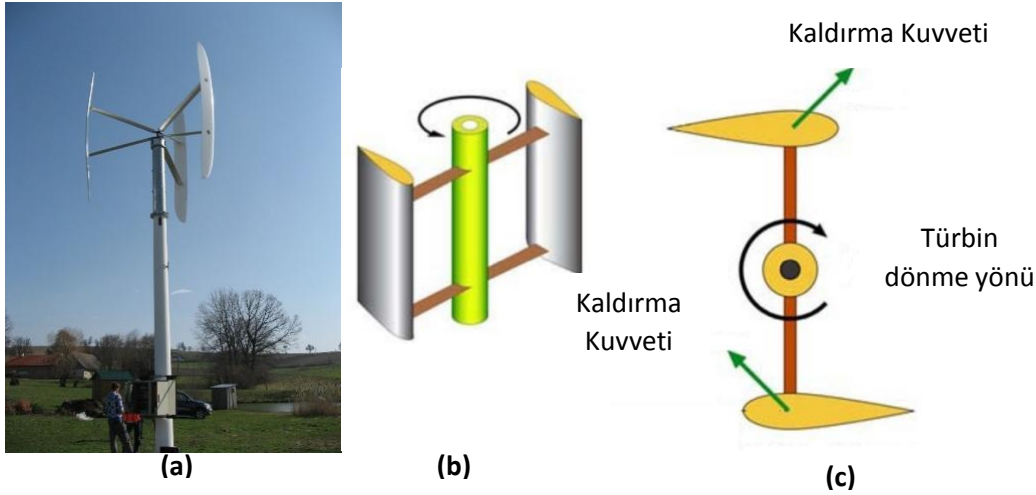


Şekil 3.4. Dönme eksenine göre rüzgar türbinleri (Schubel ve Crossley, 2012)

Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri, bu türbinlerde, türbin düşey ekseninde ve rüzgarın geliş yönüne diktir. Bu türbinler, bütün doğrultularda ve düşük rüzgar hızlarında enerji elde

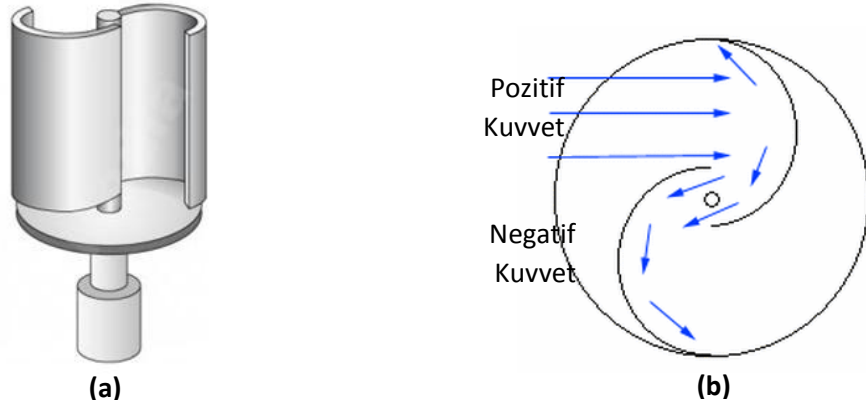
edebilmektedir. Günümüzde Darrieus ve Savanius rüzgar türbinleri olmak üzere iki tür düşey eksenli türbini bulunmaktadır.

Darrieus Düşey Eksenli Rüzgar Türbini: İlk darrieus düşey eksenli rüzgar türbini Georges Darrieus tarafından 1927 yılında geliştirilmiştir. Darrieus tipi rüzgar türbini (Şekil 3.5a), düşey düzlemde türbin mili uzun eksenli bir elips oluşturacak biçimde yerleştirilmiş iki kanattan oluşmaktadır (Şekil 3.5b). Bu türbinlerde gelen rüzgarın etkisiyle kanat yüzeyleri arasında oluşan basınç farkı nedeniyle dönme hareketi oluşmaktadır (Şekil 3.5c). Darrieus tipi rüzgar türbinleri, güç katsayısı düşük olduğundan güç üretiminde tercih edilmemektedir (Karadağ, 2009).



Şekil 3.5. Darrieus düşey eksenli rüzgar türbini (URL-7)

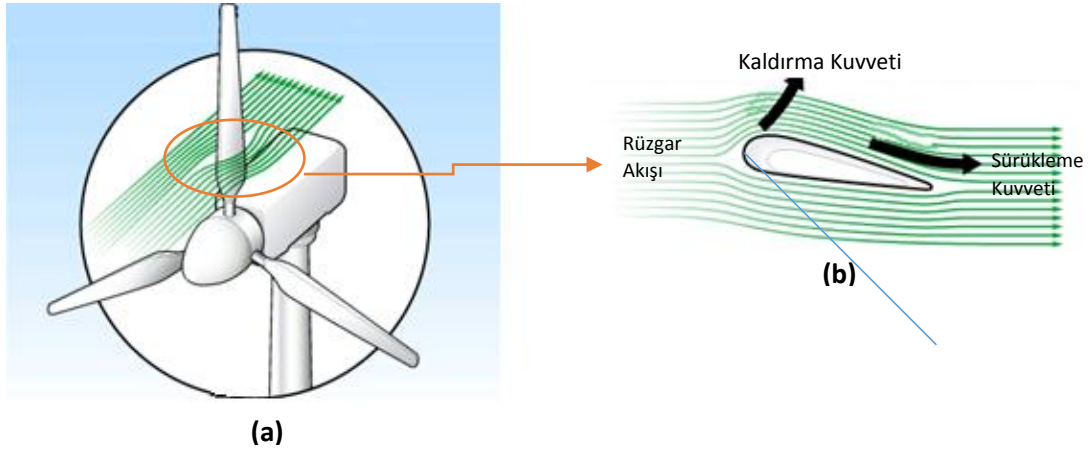
Savonius Düşey Eksenli Rüzgar Türbini: İlk Savonius düşey eksenli rüzgar türbini Sigurd Savonius tarafından 1924 yılında geliştirilmiş, 1929 yılında patenti alınmıştır. Herhangi bir yönde esen rüzgarı alabilen özellikte bir aerodinamik yapıya sahip olmalarından dolayı kolay harekete geçerek yüksek tork (moment) üretimi sağlamaktadırlar. Bu türbinler iki yatay disk arasına yerleştirilen merkezleri birbirine göre simetrik olarak kaydırılmış “kanat” adı verilen iki yarım silindirden oluşmaktadır (Şekil 3.6a). Bu türbine belli bir hızla gelen rüzgarın etkisiyle, çarkı döndüren silindirin iç kısmında pozitif, dış kısmında ise negatif bir moment oluşmaktadır. Bu türbinlerde oluşan pozitif moment, negatif momentten büyük olduğundan pozitif moment yönünde bir dönme hareketi olmaktadır (Karadağ, 2009) (Şekil 3.6b).



Şekil 3.6. Savanois düşey eksenli rüzgar türbini (Şenel, 2012)

Bu türbinlerin birçok üstünlüğü bulunmasına rağmen aerodinamik performanslarının düşük olmasından dolayı uygulama alanları tarımsal sulama ile sınırlı kalmıştır (Karadağ, 2009).

Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri: Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde (YERT), dönme eksenini rüzgar yönüne paralel, kanatlar ise rüzgara dik doğrultudadır. Bu türbinlerde kanat, belirli bir aerodinamik profil kesitine (**aerofoil**) sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır. Kanadın bu şekilde tasarlanmasında amaç, kanat alt ve üst yüzeyleri arasında bir basınç farkı oluşturarak rüzgar enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmektir. Şekilde yatay eksenli 3 kanatlı bir rüzgar türbini (Şekil 3.7a) ve bu kanadın aerofoil profil kesiti ile etrafındaki hava hareketi (Şekil 3.7b) gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Yatay eksenli rüzgar türbini (URL-17)

Yatay eksenli rüzgar türbinleri kanat sayısına göre tek kanatlı, iki kanatlı, üç kanatlı ve çok kanatlı olmak üzere dört farklı gruba ayrılmaktadır. Bu türbinler Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

Tek kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri: Bu türbinler sistemin toplam ağırlığını azaltmak amacıyla tasarlanmıştır. Bu türbinlerde, kanat üzerine etki eden yükleri azaltmak ve kanat mekanizma hareketinin pürüzsüz olmasını sağlamak amacıyla kanatlar tek menteşe ile

sabitleştirilip, iki karşı ağırlıkla dengelenmiştir. Bu türbinlerde dönme hızı çok yüksek olduğundan aşırı gürültülü çalışmaktadırlar (Şenel, 2012).

Çift kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri: Bu türbinler üç kanatlı türbin maliyetlerini azaltmak amacıyla yapılmışlardır. Bu türbinlerde, rotor tek kanatlı türbinlere göre daha iyi dengelenmiştir. Fakat kanatların sebep olduğu dinamik hareketleri önlemek için gereken güç, türbin maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Kanat dönüş hızı üç kanatlı rüzgar türbinlerine göre yüksek olduğundan üç kanatlı rüzgar türbinlerinden daha gürültülü çalışmaktadırlar (Şenel, 2012).

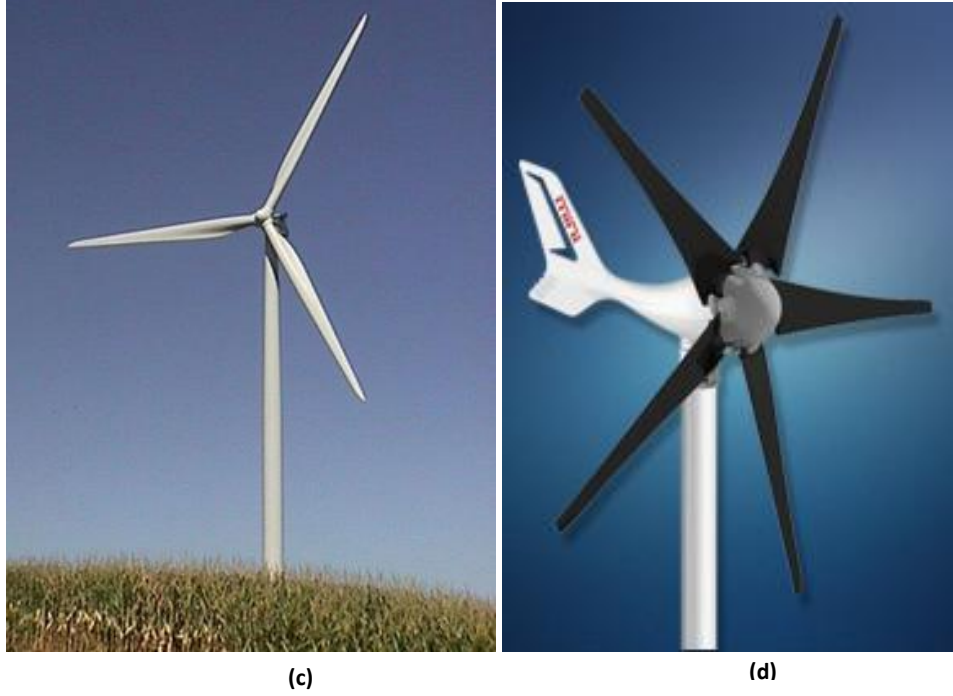
Üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri: Bu türbinler günümüzde yaygın olarak kullanılan türbinlerdir. Bu türbinde, kanatlar birbirine göre 120° 'lik açısal konumda bulunmaktadır. Bu türbinlerde, diğer yatay eksenli rüzgar türbinlerinden farklı olarak kanada etkiyen yükler nedeniyle oluşan dengelenmemiş atalet momentleri olmadığından türbin göbeği içerisinde ek bileşenlere ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu türbinler tek kanatlı ve çift kanatlı rüzgar türbinlerine göre düşük hızlarda çalışmakta olup bu türbinlerden daha az gürültü çıkarmaktadırlar (Şenel, 2012).



(a)



(b)



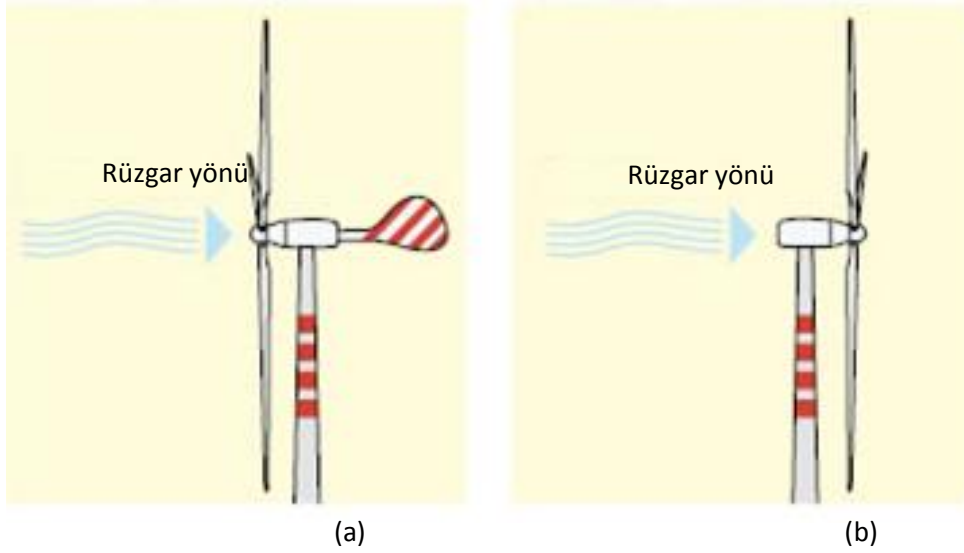
Şekil 3.8. Tek (a), çift (b), üç (c) ve çok kanatlı (d) yatay eksenli rüzgar türbinleri (URL-16)

Çok kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri: Bu türbinler rüzgar türbinlerinin gelişmemiş ilk örneklerindendir. Bu türbinler; sulama, tahıl öğütme ile ağaç kesme amacıyla kullanılmaktadır. Bu işlemler için yüksek tork(moment) gerektiğinden, bu türbinlerde daha fazla kanat kullanılarak elde edilecek tork arttırılmıştır. Bu türbinler ayrıca tek, çift ve üç kanatlı türbinlere göre daha düşük hızlarda ve daha az gürültülü çalışmaktadır (Şenel, 2012).

3.3.2 Rüzgar alışı yönüne göre sınıflandırma

Yatay eksenli rüzgar türbinleri rüzgar alışı yönüne göre, önden rüzgarlı rüzgar türbinleri (Şekil 3.9a) ve arkadan rüzgarlı rüzgar türbinleri (Şekil 3.9b) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Önden rüzgarlı rüzgar türbinleri: Bu türbinlerde kanatlar ve gövde rüzgara yönelmiştir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde yaygın olarak önden rüzgarlı rüzgar türbinleri kullanılmaktadır. Bu türbinlerin en büyük avantajı, kanatların kulenin oluşturduğu rüzgar gölgelemesinden etkilenmemesidir. Bu türbinlerin sürekli rüzgara doğru yönelmeleri için kanat eğim (yaw) mekanizmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Karadağ,2009).



Şekil 3.9. Rüzgarı önden alan (a) ve arkadan alan (b) rüzgar türbinleri (URL-16)

Arkadan rüzgarlı rüzgar türbinleri: Bu türbinlerde kanat kulenin arkasında olduğundan kanatlardan elde edilecek güç kulenin gölgelenmesinden etkilenmekte ve önden rüzgar türbinlere göre daha düşük güç üretimi olmaktadır. Bu türbinler yaw mekanizmasına ihtiyaç duymamalarına, kanatların esnek ve hafif olmasına rağmen yaygın olarak kullanılmamaktadır. Özellikle büyük çaplı türbinlerde serbestçe dönmeye bırakılan türbinin elektrik enerjisi taşıyan kabloları burmasından dolayı tercih edilmemektedir (Karadağ, 2009).

3.3.3 Rüzgar hızına göre sınıflandırma

Rüzgar türbinlerinde yapılan sınıflandırmalardan birisi de türbinlerin çalışma hızına göre yapılan sınıflandırmadır. Bu sınıflandırmaya göre rüzgar türbinleri, düşük hızlarda çalışan rüzgar türbinleri ve yüksek hızlarda çalışan rüzgar türbinleri olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Düşük Hızlarda Çalışan Rüzgar Türbinleri: İlk olarak 1870’li yıllarda ABD’de geliştirilmiştir. Bu türbinlerin kanat sayıları 12 ile 24 arasında değişmekte olup türbin rotor çapı 5 ile 8 m arasındadır. Bu türbinler 2-3 m/s’lik rüzgar hızlarında kendiliğinden çalışmaya başlamakta olup elektrik üretim verimleri düşüktür. Bu nedenle genellikle sulamada kullanılmaktadırlar (Karadağ, 2009).

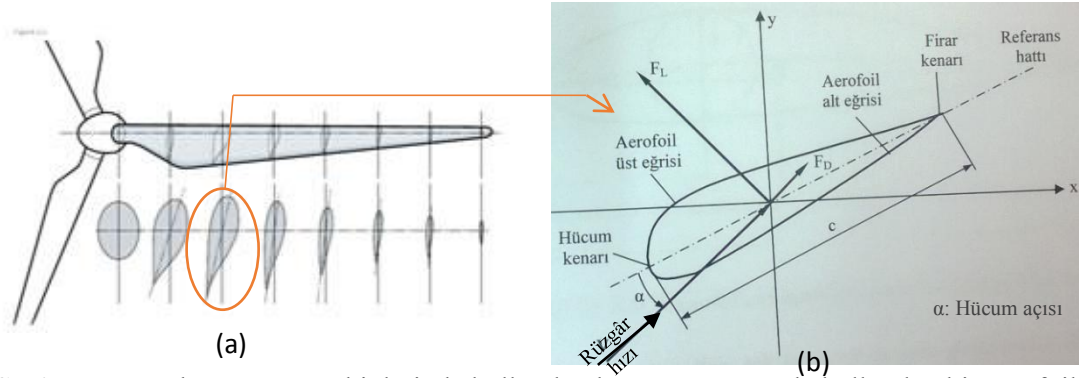
Yüksek Hızlarda Çalışan Rüzgar Türbinleri: Bu türbinlerde kanat sayısı 1 ile 4 arasında olup düşük hızlarda çalışan çok kanatlı rüzgar türbinlerinden daha hafiftirler. Yüksek hızlarda çalışan türbinlerde kanat sayısı arttıkça türbin verimi artmaktadır. Ancak üç kanatlı rüzgar türbinlerinden fazla kanat sayısına sahip türbinler maliyeti önemli ölçüde artırdığından çok kanatlı türbinler tercih edilmemektedirler. Bunun yanında üç kanatlı türbinlerin estetik görünüşleri bu tip türbinlerin tercih edilmesinde önemli bir etkidir. Bu tip türbinler ayrıca ani rüzgar değişimlerinden kaynaklanan basınç değişimlerinden az etkilenmektedirler. Bu tip

türbinler, yüksek verimleri nedeniyle günümüzde elektrik üretimi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Karadağ, 2009).

3.3.4 Güç kontrol sistemine göre sınıflandırma

Rüzgar türbinlerinin genel olarak maksimum enerji üretimi yapan, minimum hız olarak tanımlanan **nominal hızda** çalışması istenir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinlerinde, türbinin nominal hızlarında çalışmasını sağlamak amacıyla kanat hareket mekanizması ve türbin eğim mekanizması geliştirilmiştir. Bu mekanizmalardan türbin eğim mekanizması, rüzgarın yön değiştirdiği durumlarda gövde ve kanatların rüzgar yönüne yönelmesini sağlamakta, kanat hareket mekanizması ise gelen rüzgarın şiddetine göre, kanadın açısal konumunu değiştirerek yüksek rüzgar hızlarında türbin elemanlarının zarar görmesini engellemektedir.

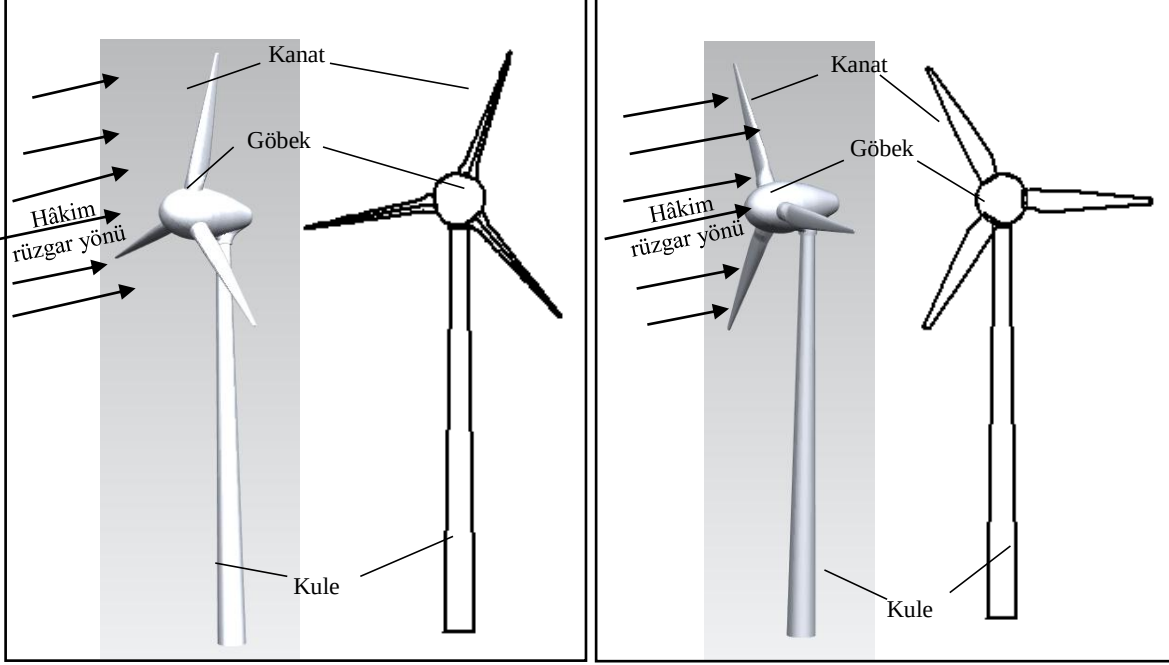
Modern rüzgar türbinlerinde kanatlar, bağlantı noktasından (kök kısım) uç kısma doğru gidildikçe dairesel kesitten damlacık kesitine (aerofoil) bir değişim göstermekte olup uç kanatlı bir rüzgar türbinine ait kanat ve kanadı oluşturan profiller Şekil 3.10a’da gösterilmiştir. Kanat kesitinde aerofoillerin kullanılmasındaki amaç rüzgarın enerjisinin maksimum seviyede alınarak türbin elemanlarına aktarımını sağlamaktır. Modern rüzgar türbinlerinde kanat yapısında kullanılan bir aerofoil ve bu aerofoilin genel olarak bölümleri Şekil 3.10b’de gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Modern rüzgar türbinlerinde kullanılan kanat ve yapısında kullanılan bir aerofoil (URL-16)

Aerofoil profilinde aerofoil kesitini boydan boya kesen eksen uzunluğu **referans hattı uzunluğudur** (kanat profil uzunluğu) (c). Referans hattı ile rüzgar hızı arasında kalan açı **hücum açısı** (α) olarak tanımlanmaktadır. Aerofoile havanın geldiği kenar **hücüm kenarı**, havanın çıktığı kenar ise **firar kenarı** olarak isimlendirilmektedir. Aerofoil kesitinin üst kenarının bulunduğu yüzey (profil üst eğrisi) **emme yüzeyi**, alt tarafının bulunduğu yüzey (profil alt eğrisi) ise **basınç yüzeyi** olarak isimlendirilmektedir (Şenel, 2012).

Kanat kontrol mekanizması, rüzgar türbin kanadının nominal rüzgar hızının altındaki hızlarda **hakim rüzgar yönünde** (Şekil 3.11a) (kanadın hücum kenarının gelen rüzgar yönünde olduğu açısıl pozisyon); nominal hızın üzerindeki hızlarda ise **hakim rüzgar yönüne dik doğrultuda** (kanadın emme yüzeyinin gelen rüzgar yönünde olduğu açısıl pozisyon) (Şekil 3.11b) konumlandırılmasını sağlayarak türbin çıkış gücünü kontrol etmektedir.



(a) Kanatları hakim rüzgar yönündeki rüzgar türbini (b) Kanatları hakim rüzgar yönüne dik doğrultudaki rüzgar türbini

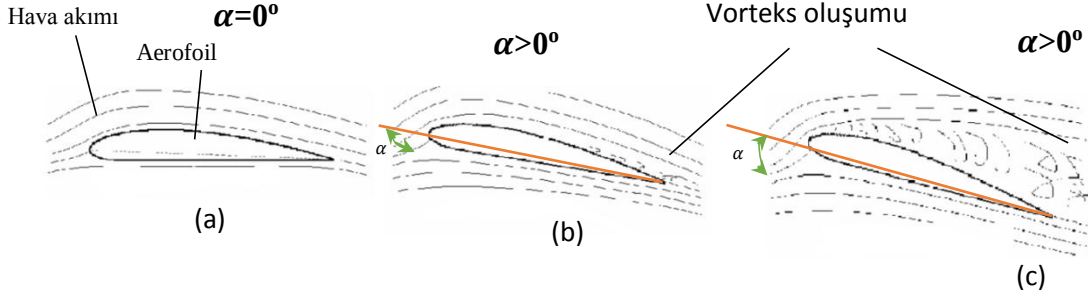
Şekil 3.11. Rüzgar türbin kanatlarının farklı pozisyonları (URL-5)

Rüzgar türbinlerinde kanat kontrol mekanizmaları olarak **stall** ve **pitch** kontrol sistemlerinden yararlanılmaktadır (Şenel, 2012). Bu sistemlerden stall kontrol sistemi **pasif**, pitch kontrol sistemi ise **aktif kontrol mekanizması** olarak da bilinmektedir.

Stall (pasif) kontrollü türbinler: Bu sistemler genellikle küçük güçteki rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadır. Bu tür türbinlerde kanadın açısıl konumunu değiştiren bir mekanizma bulunmamakta olup kanat yüksek rüzgar hızlarında açısıl konumunu rüzgar etkisiyle değiştirecek özellikte tasarlanmaktadır.

Stall kontrollü sistemlerde normal çalışma esnasında, rüzgar kanat yüzeyini yalayarak geçmektedir. Bu durumda profilin üst ve alt yüzeyi arasında basınç farkı oluşmakta ve kanat hareket etmektedir. Ancak rüzgar hızının yüksek olduğu durumlarda kanadın hücum açısı artarmakta ve kanadın üst yüzeyinde vorteks oluştuğundan akım çizgileri kanat yüzeyinden ayrılmaktadır. Ayrılma olan yüzeyde basınç düşmekte olup bu olay **stall** olarak tanımlanmaktadır. Stall kontrollü türbinlerde kanat rüzgar nominal hızın üzerine çıktığında performansı düşürmek amacıyla, hücum açısının (α) artırılması ve kanadın stall etkisine

girerek güç kontrolü sağlanması için tasarlanmıştır. Bu türbinlerde normal çalışma esnasında rüzgar kanat yüzeyini yalayarak geçmektedir (Şekil 3.12a). Yüksek rüzgar hızlarında kanadın hücum açısı (α) artarak kanadın yatay konumdan düşey konuma doğru dönmesi sağlanmakta ve profilin üst yüzeyinde vorteks oluşturulmaktadır. Böylece akım çizgileri yüzeyden ayrılır, ayrılma yüzeyinde basınç aniden düşmekte ve kanat rüzgara direnerek kendisine frenleme yapmaktadır (Şekil 3.12b ve c), böylece nominal hız üzerindeki hızlarda türbinde oluşacak hasarlar önlenmiş olmaktadır (Emniyetli, 2007; Aktepe, 2013).



Şekil 3.12. Kanadın stall ile güç kontrolü (Karadağ, 2009)

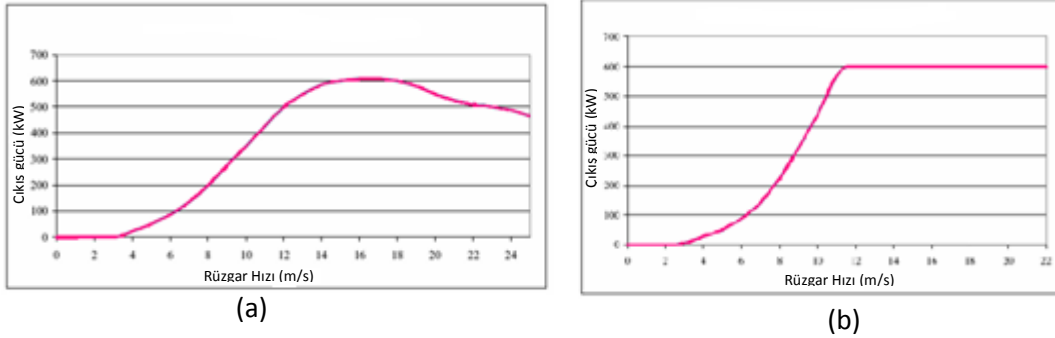
Pitch kontrollü (kanat döndürme mekanizmalı) türbinler: Bu türbinlerde kanatlar göbeğe stall kontrollü türbinlerin aksine sabit bir açıyla bağlanmamıştır. Bu türbinlerde stall kontrollü türbinlerden farklı olarak kanat döndürme (pitch) mekanizması bulunmakta olup bu mekanizma kanadın kendi eksenini etrafında dönmesini sağlamaktadır. Bu türbinlerdeki pitch mekanizması, kanadın nominal hız altındaki hızlarda daha fazla enerji elde edilmesini; nominal hız üzerindeki hızlarda ise sabit enerji elde edilmesini sağlamaktadır (Emniyetli, 2007; Şenel, 2009; Aktepe, 2013). Şekil 3.13’de pitch kontrollü sistemlerde kanat açısı değişiminin nasıl gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 3.13. Pitch kontrol sistemiyle kanat açısı değişimi (URL-6)

Pitch kontrolü, tüm rüzgar şartlarında türbin çıkış gücünü ayarlayarak daha yüksek enerji üretimi sağladığından stall kontrolüne göre daha gelişmiştir. Günümüzde yüksek güç üretimi sağlayan büyük boyutlardaki modern rüzgar türbinlerinde yaygın olarak pitch kontrol mekanizması kullanılmaktadır. Stall kontrollü türbinlerin temel avantajı ise rotorda hareketli parçalara sahip olmamaları ve karmaşık bir kontrol sistemine ihtiyaç duyulmamasıdır.

(Karadağ, 2009). Şekil 3.14’de stall kontrollü ve pitch kontrollü türbinlere ait güç eğrileri verilmiştir.



Şekil 3.14. Stall kontrollü (a) ve pitch kontrollü (b) türbinlere ait güç eğrileri (Karadağ, 2009)

Şekildeki güç eğrileri değerlendirildiğinde stall kontrollü sistemlerin nominal hızın üzerindeki hızlarda, pitch kontrollü türbinlerdeki gibi sabit bir güç seviyesini koruyamadığı, nominal hızın üzerinde enerji üretiminin pitch kontrollü türbinlerden düşük olduğu görülmektedir. Bu mekanizmalar hakkında daha sonra ilave bilgiler verilecektir.

3.3.5 Rotor dönüş hızına göre sınıflandırma

Rüzgar türbinleri rotor dönüş hızına göre de sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre rüzgar türbinleri sabit hızlı rüzgar türbinleri ve değişken hızlı rüzgar türbinleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Sabit hızlı rüzgar türbinleri: Bu türbinler, nominal hızda, nominal güce ulaşmayı sağlayan sabit dönüş hızında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu tip sistemler şebeke bağlantılı pek çok rüzgar türbininde kullanılmaktadır. Bu türbinlerin tasarımı kolay olmakla birlikte belirli bir rüzgar hızında (nominal hız) en verimli şekilde çalışmakta olup bu hızdan uzaklaştıkça türbin hızı düşmektedir (Şenel, 2012).

Değişken hızlı rüzgar türbinleri: Bu türbinler, sabit hızlı türbinlerin aksine geniş bir rüzgar hız aralığında verimli bir şekilde çalışabilmektedir. Bu türbinler, genelde kanat döndürme (pitch) sistemi ile birlikte kullanılmakta olup bu sayede nominal hızdan daha düşük hızlarda da yüksek verimlilikle çalışmaktadır. Ayrıca bu türbinler, düşük rüzgar hızlarında düşük devirlerde çalıştıklarından daha az gürültü çıkarmaktadırlar (Karadağ, 2009).

3.3.6 Kullanım yerine göre sınıflandırma

Rüzgar türbinleri kullanım yerine göre de sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmada rüzgar türbinleri şebeke bağlantılı durumuna göre şebeke bağlantılı rüzgar türbinleri ve şebeke bağlantısız rüzgar türbinleri olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Şebekeye bağlantılı rüzgar türbinleri: Bu türbinler genellikle rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Bu tür türbinler küçük ölçekli ihtiyaçları karşılayabileceği gibi, belirli bir yerde çok sayıda şebekeye elektrik enerjisi sağlamak amacıyla da kullanılabilir. Günümüzde büyük rüzgar santralleri elektrik şebekesine bağlı, birden fazla türbin içeren rüzgar çiftlikleri şeklindedir (Karadağ, 2009).

Şebeke bağlantısız rüzgar türbinleri: Bu türbinler genel olarak elektrik sistemine bağlı olmayan kırsal kesimlerde tercih edilmektedir. Bu türbinler, tarımsal amaçlı sulama ve küçük çaptaki konutların elektrik ihtiyacının karşılanmasında kullanılmaktadır. Bu tür sistemler 1-100 kW güç kapasitesindedir. Bu tür sistemlerde türbinden elde edilen elektrik enerjisi çeşitli ünitelerden geçerek kullanıma sunulmaktadır. Rüzgarın esmediği durumlarda ise sistem içerisinde bulunan aküde depolanan elektrik enerjisi kullanıma sunulmaktadır (Karadağ, 2009).

3.4 Türbin Kapasite Faktörü

Rüzgar santrallerinde, bir santralin ne kadar verimli olduğunu gösteren parametre **kapasite faktörüdür**. Kapasite faktörü birim zamanda santralde üretilen enerjinin, santralin aynı dönemde tam kapasitede üretebileceği enerjiye oranı olup maksimum verim olarak da tanımlanmaktadır (Hayli, 2001).Günümüzde rüzgar türbin tasarımı ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmakta olup bu çalışmalar sonucu geliştirilen rüzgar türbinlerinden bazıları yukarıda kısaca özetlenmiştir. Bu türbinlerin kapasite faktörleri/maksimum verimleri Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Çeşitli rüzgar türbinlerin kapasite faktörleri (Schubel ve Crossley, 2012)

Rüzgar türbini	Dönme yönü	Maksimum verim (%)
Savonius	Düşey	16
Darrieus	Düşey	40
Tek kanatlı yatay eksenli rüzgar türbini	Yatay	43
Çift kanatlı yatay eksenli rüzgar türbini	Yatay	47
3 kanatlı yatay eksenli rüzgar türbini	Yatay	50

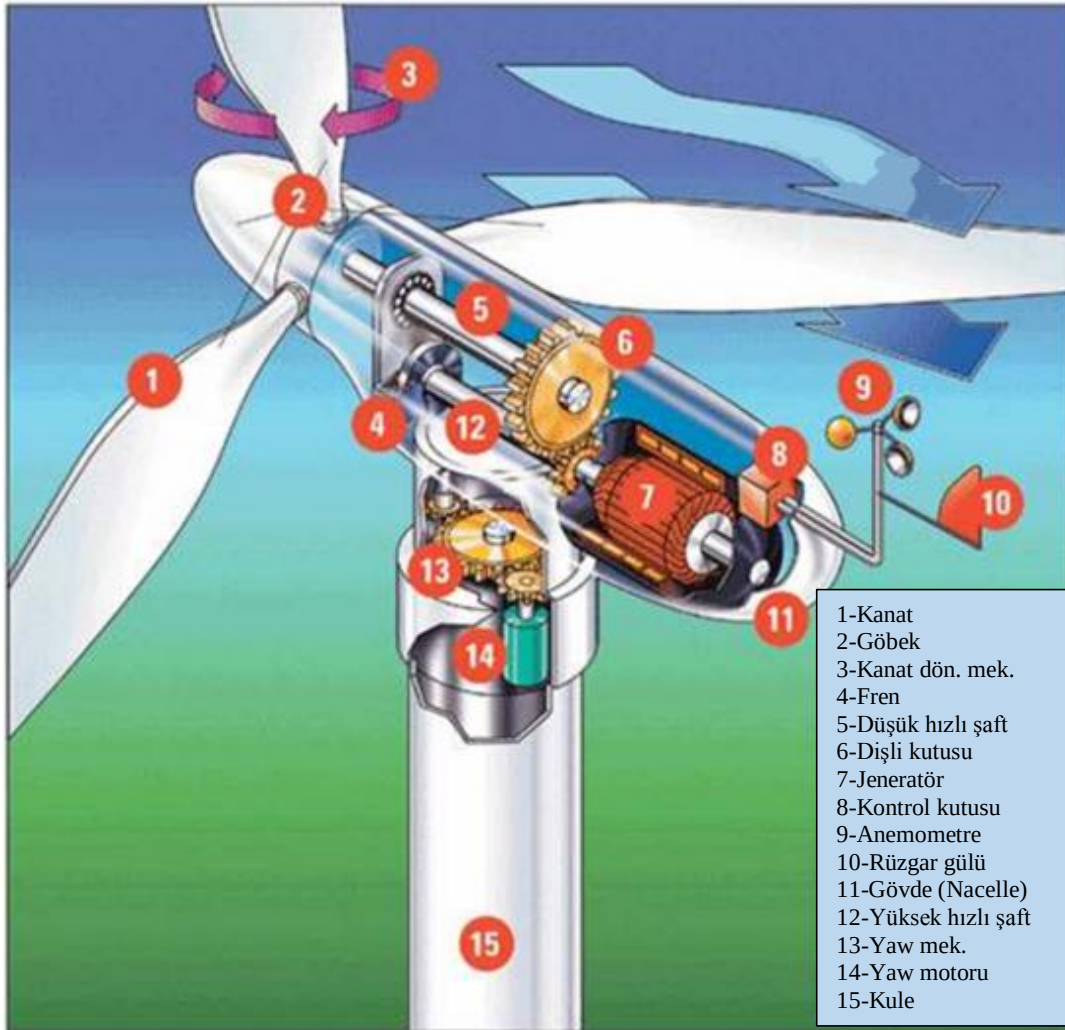
Çizelge değerlendirildiğinde yatay eksenli rüzgar türbinlerinin maksimum verimlerinin düşey eksenli rüzgar türbinlerinin maksimum verimlerinden yüksek olduğu, yatay eksenli türbinler

arasında üç kanatlı rüzgar türbinlerinin maksimum veriminin ise en yüksek olduğu (%50) görülmektedir.

Günümüzde yaygın olarak yatay eksenli üç kanatlı önden rüzgarlı rüzgar türbinleri kullanılmaktadır. Aşağıda bu türbin elemanları ve ekonomisi değerlendirilmiştir.

3.5 Yatay Eksenli Rüzgar Türbin Elemanları

Yatay eksenli bir rüzgar türbini genel olarak kanatlar, kule ve göbekten oluşan yapı ve bu yapı içerisindeki rotor, kanat döndürme (pitch) mekanizması, fren, düşük hızlı şaft, dişli kutusu, jeneratör, kontrol kutusu, anemometre, rüzgar gülü, yüksek hızlı şaft ve eğim (yaw) mekanizması gibi elemanlardan oluşmaktadır. Yatay eksenli bir rüzgar türbininin elemanları Şekil 3.15’de gösterilmiştir.



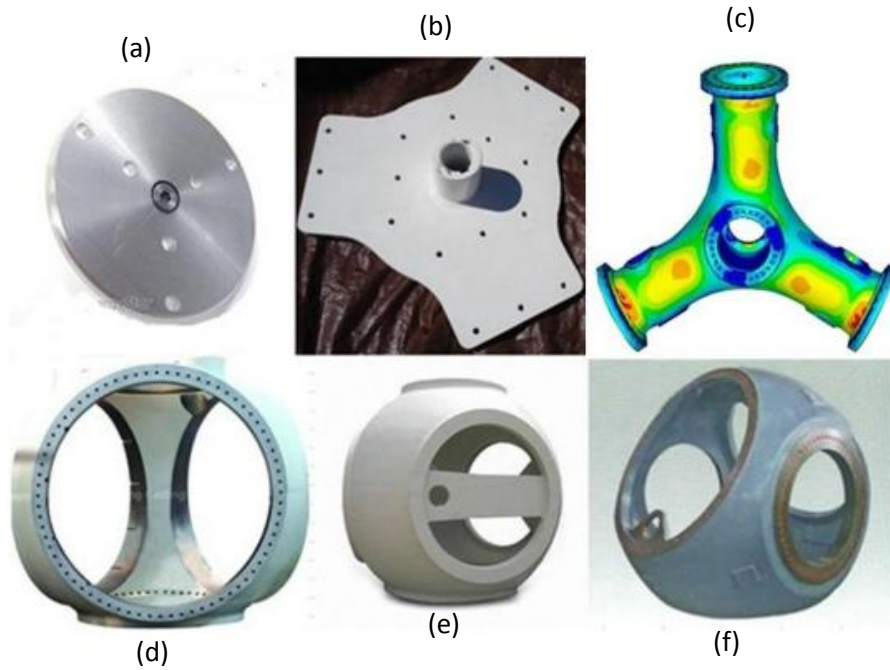
Şekil 3.15. Yatay eksenli bir rüzgar türbini ve elemanları (URL-25)

3.5.1 Kanatlar

Kanatlar, rüzgar enerjisini alarak mekanik enerjiye çeviren rüzgar türbin elemanlarıdır. Geçmiş yıllarda kanat malzemesi olarak ağaç ve metaller kullanılıyorken günümüzde kompozit malzemeler (cam fiber/epoksi, karbon fiber/epoksi) tercih edilmektedir. Bu çalışmada rüzgar türbin kanadı detaylı olarak değerlendirildiğinden kanat ile ilgili ilave bilgiler ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

3.5.2 Göbek

Rüzgar türbinlerinde kanatların bağlandığı parçaya göbek (hub) denir. Göbek, kanatlardan aldığı gücü şaft vasıtasıyla jeneratöre iletir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde plaka (Şekil 3.16a ve b), boru (Şekil 3.16c) ve küre (Şekil 3.16d,e ve f) gibi farklı geometrik şekillere sahip göbekler kullanılabilmektedir. Küçük güçteki (1-10 kW) ev tipi rüzgar türbinlerinde plaka şeklindeki göbekler, büyük güçteki (>100 kW) türbinlerde ise boru ve küre şeklindeki göbekler yaygın olarak kullanılmaktadır (Demirci, 2011).



Şekil 3.16. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde kullanılan göbekler (Demirci, 2011)

3.5.3 Gövde

Gövde rotor ve kule arasında bulunan, rüzgar türbin bileşenlerini dış etkilerden koruyan yapıdır. Günümüzde yatay eksenli rüzgar türbinlerinde gövde içerisinde dişli kutusu, düşük hızlı şaft, jeneratör, kontrol kutusu ve fren sistemi gibi elemanlar bulunmakta olup bu elemanlar aşağıda anlatılmıştır (DNV, 2002). Ayrıca, gövde kaplanarak gürültünün azaltılması sağlanmaktadır (Şenel, 2012).

3.5.4 Düşük hızlı şaft

Düşük hızlı şaft rüzgar türbini ana şaftı olarak da bilinir. Ana şaft, bir ucu kanatların bağlı olduğu göbeğe bir ucu ise dişli kutusuna bağlıdır. Düşük hızlı şaft kanatlardan aldığı mekanik enerjiyi dişli kutusuna ileten elemandır. Şaftlar rüzgar türbin güç kapasitesine ve çalışma koşullarına bağlı olarak farklı malzemelerden imal edilebilmektedir. Küçük kapasiteli rüzgar türbinlerinde sıcak işlenmiş sade karbonlu çelik, büyük güç kapasiteli rüzgar türbinlerinde yüksek karbonlu çelik ve alaşımlı çelik malzemeler kullanılmaktadır. Ayrıca şaftın akma dayanımını ve sertliğini arttırmak amacıyla ısıl işlemlerden de yararlanılmaktadır (Şenel, 2012).

3.5.5 Dişli kutusu

Dişli kutuları düşük hızlı (ana) şaft ile yüksek hızlı şaft arasında bulunan ana şafttaki düşük hız yüksek torku (momenti), yüksek hız düşük torka dönüştürerek yüksek hızlı şaft üzerinden jeneratöre ileten türbin elemanıdır. Modern rüzgar türbin dişli kutularında genellikle çok kademeli alın veya planet dişli sistemleri kullanılmaktadır (Şenel,2012).

3.5.6 Jeneratör

Rüzgar türbinlerinde mekanik enerjiyi, elektrik enerjisine çeviren elemandır. Rüzgar türbinlerinde, **senkron (alternatör), indüksiyon (asenkron) ve doğru akım (DC) jeneratörleri** kullanılmaktadır. Senkron jeneratörler şebeke frekansında çalışmakta olup, şebekeden reaktif güç çekmemektedir. Bu jeneratörler pahalı olmasına rağmen rüzgar türbinlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Asenkron jeneratörler basit ve ucuz olup şebeke frekansından biraz daha yüksek frekansta çalışmaktadır. Doğru akım jeneratörleri ise şebekeden bağımsız çalışan küçük ölçekli rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadır (Karadağ, 2009; Emniyetli 2007)

3.5.7 Kontrol kutusu

Rüzgar türbinlerinde türbin şartlarını sürekli olarak takip ederek eğim (yaw) mekanizmasını yönlendiren bir bilgisayar bulunmaktadır. Kontrol kutusu olarak bilinen bu bilgisayar vasıtasıyla herhangi bir bozukluk (dişli kutusu veya jeneratörün aşırı ısınması gibi) durumunda türbin otomatik olarak kapatılarak türbin operatörüne sinyal göndermektedir (Karadağ, 2009).

3.5.8 Anemometre

Rüzgar türbinleri belli rüzgar hızlarında enerji üretim amacıyla devreye girerken, bazı rüzgar hızlarından sonra ise türbini korumak amacıyla durdurulmaktadır. Rüzgar türbinlerinde bu işlemleri gerçekleştirmek amacıyla anemometre olarak bilinen rüzgar hız ölçücüsü kullanılmaktadır (Yerebakan, 2001).

3.5.9 Rüzgar gülü

Rüzgar türbinlerine gelen rüzgarın yönünü belirlemek, gelen rüzgarın yönünü kontrol kutusuna göndererek eğim mekanizması yardımıyla türbin gövdesinin rüzgara karşı yönelmesini sağlamak amacıyla rüzgar gülü kullanılmaktadır (Emniyetli, 2009).

3.5.10 Yüksek hızlı şaft

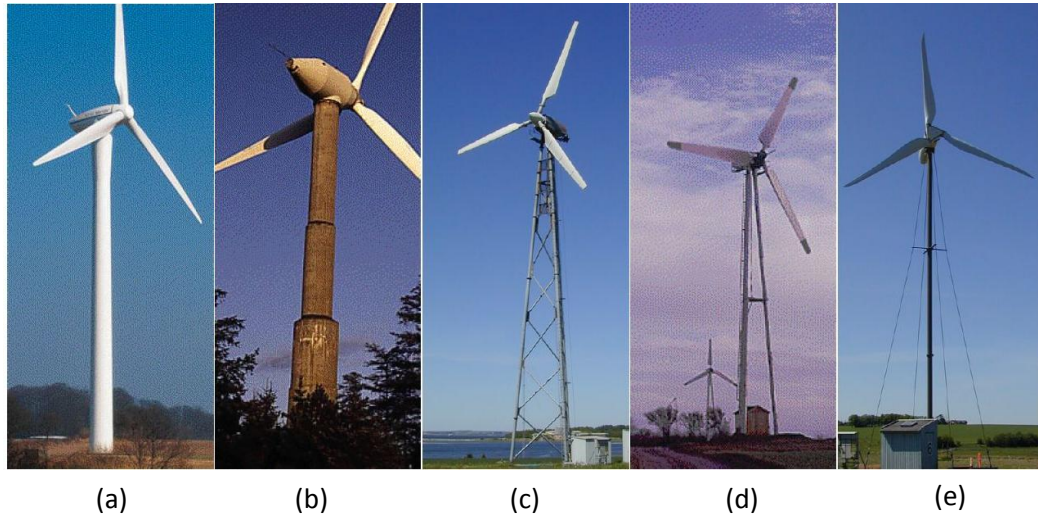
Yüksek hızlı şaft, yatay eksenli rüzgar türbinlerinde dişli kutusu ile jeneratör arasında bulunan dişli kutusundan aldığı torku (momenti) jeneratöre ileten elemandır. Bu eleman tasarımına ve çalışma koşullarına bağlı olarak sade karbonlu çelik ya da yüksek karbonlu çelik malzemeden imal edilmektedir (DNV, 2002).

3.5.11 Fren

Rüzgardan elde edilen enerji, rüzgar hızı ile orantılı olarak değiştiğinden, yüksek rüzgar hızlarında rüzgardan daha fazla enerji elde edilmektedir. Ancak rüzgar hızı belli bir seviyenin üzerine çıktığında türbine etki eden yükler de artmakta dolayısıyla rüzgar türbin elemanları zorlanmaktadır. Bu durumlarda sisteme zarar vermemek için sistemi yavaşlatmak ya da durdurmak amacıyla frenleme sisteminden yararlanılmakta olup bu amaçla dişli kutusuna yerleştirilen mekanik frenler kullanılmaktadır (Karadağ, 2009).

3.5.12 Kule

Yatay eksenli rüzgar türbin kuleleri, rotor, kanatlar ve gövdeden oluşan yapıyı belli bir yükseklikte tutmaktadır. Rüzgar hızı yerden yükseldikçe artacağından kule yüksekliği arttıkça kuleye gelen rüzgar hızı da artacaktır. Rüzgar türbinlerinde kullanılan kule yapıları; boru şeklindeki çelik kule (a), boru şeklindeki beton kule (b), kafes yapı kule (c), üç ayaklı kule (d) ve halatla tutturulmuş kule (e) şeklinde olup Şekil 3.17’de gösterilmiştir.

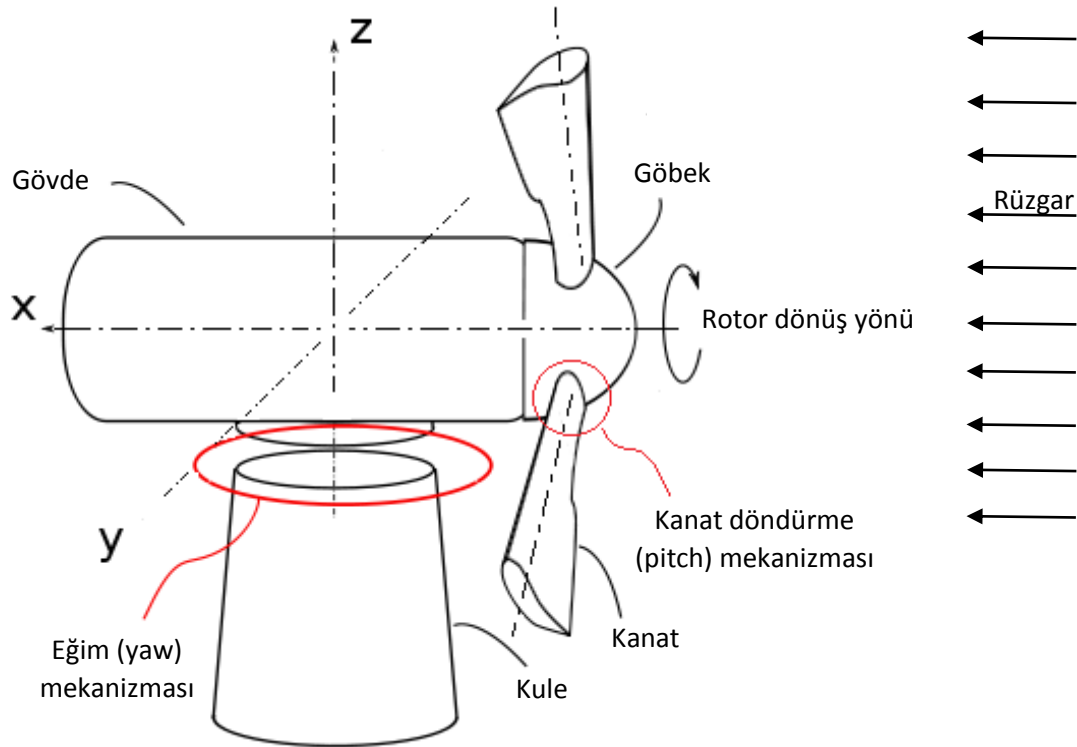


Şekil 3.17. Rüzgar türbinlerinde kullanılan kule yapıları (DNV, 2002)

Günümüz yatay eksenli modern rüzgar türbinlerinde boru şeklinde çelik kuleler kullanılmaktadır. Bu kuleler belirli uzunluğa sahip flanşlı bölmeler halinde imal edilen parçaların civalatalar vasıtasıyla birbirine tutturulması ile elde edilmektedir. Boru şeklindeki kulelerin iç kısmında gövdenin yer ile bağlantısını sağlayan merdiven bulunmaktadır. Bu merdivenler bakım personeli için diğer kule yapılarına göre daha güvenli ve konforludur. Rüzgar türbin kule yapılarında kafes sistemler de kullanılmaktadır. Bu yapılarda kullanılan malzeme miktarı dolayısıyla maliyeti boru şeklindeki kulelere göre düşük olmasına rağmen güvenliklerinin düşük olması ve estetik olarak güzel olmamaları nedeniyle yaygın olarak kullanılmamaktadırlar. Rüzgar türbin kuleleri bir direk ve onu destekleyen kablolar şeklinde bir yapıda da olabilmektedir. Bu yapılar ise küçük güç kapasiteli rüzgar türbinlerinde tercih edilmektedir (DNV, 2002).

3.5.13 Eğim (yaw) mekanizması

Rüzgar türbinlerinde, rüzgardan maksimum seviyede faydalanmak için kanadın rüzgar yönünde olması gerekmektedir. Rüzgarın yönü değiştiğinde, rüzgar gülünden alınan yön bilgilerinden yararlanarak türbinin istenilen açısall konuma getirilmesinde ya da çok yüksek rüzgar hızlarında kanatların dönüşünün yavaşlaması, hatta durması istendiği durumlarda eğim mekanizmasından yararlanılmaktadır (Karadağ, 2009). Şekil 3.18’de kanat ve türbin kontrol mekanizmaları gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Kanat ve türbin kontrol mekanizmaları (URL-16)

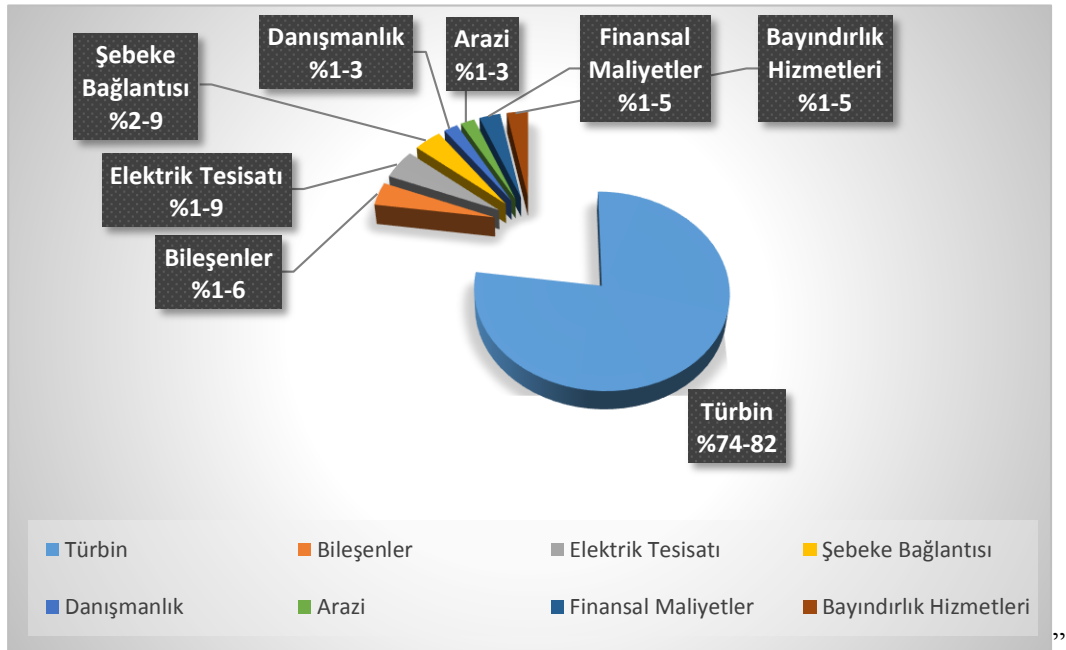
3.5.14 Kanat hareket (stall ve pitch) mekanizması

Rüzgar türbinlerinde gelen rüzgardan en verimli şekilde yararlanmak, yüksek rüzgar hızlarında sistemi korumak için çeşitli kanat hareket mekanizmalarından yararlanılmaktadır. Bu amaçla kanadın istenilen açısız pozisyona getirilmesi için **stall ve pitch kontrol sistemlerinden** yararlanılmaktadır.

3.6 Yatay Eksenli Rüzgar Türbin Ekonomisi

Rüzgar enerjisi en ucuz yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir. Rüzgar, bedelsiz bir enerji kaynağı olmasına rağmen, rüzgar enerjisinin istenilen biçime dönüştürülmesi için rüzgar santrali kurulmalıdır. Bu nedenle rüzgardan üretilen elektriğin bir maliyeti olup bu maliyet, ilk yatırım maliyetleri ile işletme-bakım maliyetlerinden oluşmaktadır (Küçükçalı, 2008). Giriş bölümünde bütün enerji santrallerinde enerji üretim maliyetleri değerlendirilmiştir. Burada ise günümüzde yaygın olarak kullanılan yatay eksenli, üç kanatlı ve önden rüzgarlı rüzgar türbinlerinin maliyet durumları ayrıca değerlendirilmiştir.

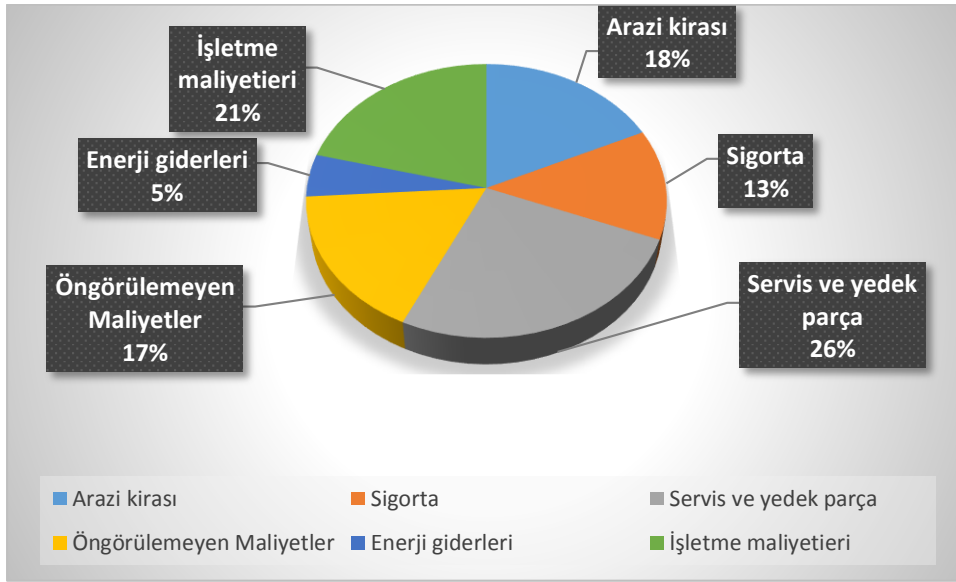
İlk Yatırım Maliyetleri: Rüzgar türbin elemanlarının temin, ulaşım ve kurulum maliyetleri, türbinin şebeke bağlantısı (güç iletim kabloları, trafo vb.), bayındırlık işleri (bina ve yol yapımı ile çevre düzenlemesi), lisans ve danışmanlık hizmetleri ile veri izleme-kontrol sistem maliyetlerinden oluşmaktadır. 850 kW-1500 kW güç aralığındaki bir rüzgar türbin santralinin yatırım maliyetlerinin toplam maliyet içindeki oranları Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.19. Rüzgar türbinlerinin yatırım maliyetleri (URL-2)

Rüzgâr türbin yatırım maliyetleri değerlendirildiğinde, en yüksek maliyeti türbin maliyetlerinin (%74-82) oluşturduğu görülmektedir. Uluslararası Rüzgar Enerji Ajansı (EWEA) verililerine göre Avrupa’da rüzgar enerji santrallerinin birim yatırım maliyetleri 900-1150 €/kW aralığında olup bu maliyet ülkeden ülkeye değişmektedir.

İşletme-Bakım Maliyetleri: Modern rüzgar türbinleri 20 yıl ömür ve 120000 saat işletme süresi esasına göre tasarlanmakta olup bu sürede türbinden enerji elde edilebilmesi için çeşitli harcamalar yapılması gerekmektedir. İşletme-bakım maliyetleri olarak bilinen bu harcamalar arazi kiralama, sigorta, düzenli bakım, tamir, yedek parça, enerji maliyetleri, işletme maliyetleri ile öngörülemeyen diğer maliyet kalemlerinden oluşmakta olup bu maliyetlerin işletme-bakım maliyetleri içerisindeki oranları Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Rüzgar türbinlerinin işletme-bakım maliyetleri (URL-2)

Rüzgar türbinlerinin işletme-bakım maliyetleri değerlendirildiğinde en yüksek maliyet kaleminin servis ve yedek parça maliyetleri olduğu görülmektedir. Rüzgar türbinlerinde işletme-bakım maliyetleri sistem kullanıldıkça artmakta olup bu maliyet ortalama 0,012-0,015 €/kWh aralığındadır.

4. RÜZGÂR TÜRBİN KANATLARI VE OPTİMİZASYON

4.1 Kanat Profili ve Bölgeler

Rüzgâr türbinlerinde enerji üretim zincirinin ilk halkası kanat olup kanatlar rüzgârdan maksimum enerji alınmasını sağlayan aerofoil olarak bilinen özel profillerden meydana gelmektedir. Modern rüzgâr türbinlerinde kanat, aerodinamik ve yapısal fonksiyonuna göre **dip bölge, orta bölge** ve **uç bölge** olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Bu bölgeler aşağıda kısaca özetlenmiştir (Şekil 4.1).

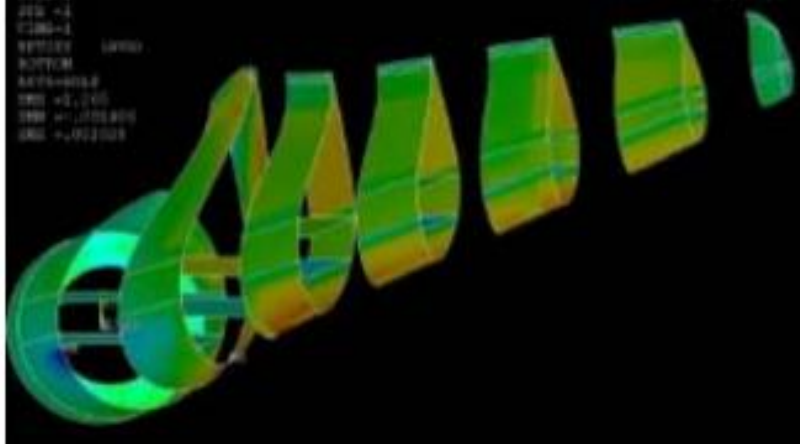
Kanat dip bölgesi, kanat bağlantı noktası ile kanadın aerofoil şeklini aldığı kısım arasında kalan bölgedir. Bu bölüm kanatta en fazla zorlanmaya maruz kalan bölgedir. Bu nedenle bu kısımda kanadın et kalınlığı yüksektir.

Kanat orta bölgesi, kanadın güç üretiminde en önemli bölgedir. Bu nedenle bu kısmın tasarımında aerodinamik özellikler ön planda tutularak yapısal olarak müsaade edilebilir minimum et kalınlığında tasarlanmaktadır.

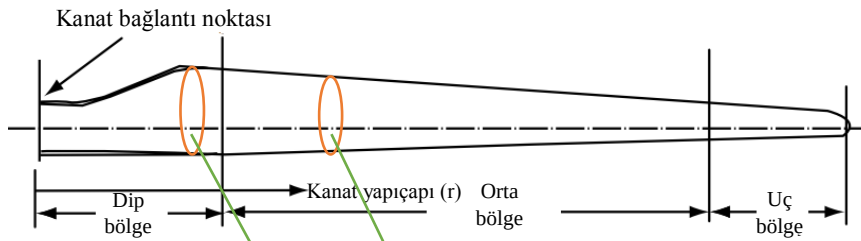
Kanat uç bölgesi, kanadın güç üretimi için kritik bir bölgedir. Bu kısmın et kalınlığı düşük olup narin bir tasarıma sahiptir. Kanatta güç üretimi sırasında oluşan kayıplar ve gürültüyü azaltmak için çeşitli uç geometrileri geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmış olup geliştirilen geometrilerden bazıları çeşitli türbin üreticileri tarafından kullanılmaktadır (Schubel ve Crossley, 2012).

Yatay eksenli modern rüzgâr türbin kanat kesitleri kök kısmından uç kısmına doğru dairesel kesitten büyük aerofoil kesite, daha sonra ise küçük aerofoil kesite doğru değişim göstermektedir.

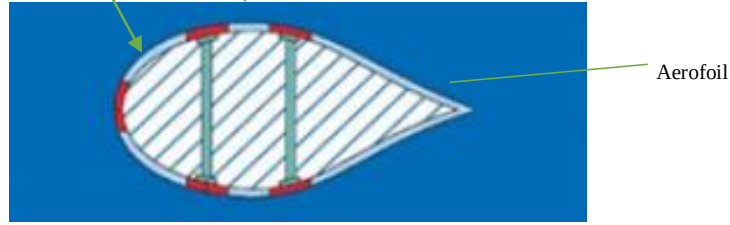
a)



b)



c)



Şekil 4.1. Yatay eksenli rüzgâr türbin kanadı, kanat bölgeleri ve kanadı oluşturan aerofoil
(Karabağ, 2011; Schubel ve Crossley, 2012)

Rüzgâr türbin kanatlarında kullanılan profiller bir kiriş hattı üzerinde ve altında tanımlanmış 2 adet özel eğrinin birleşiminden oluşmaktadır. Bu eğrilerden üst eğrinin eğrilik yarıçapının alt eğrininkinden küçük olması kamburluk olarak tanımlanmakta olup kamburluk kanadın her iki yüzeyinde farklı akışkan hızlarının oluşmasını sağlayarak kanadın üst ve alt yüzeyi arasında basınç farkı ortaya çıkmasını, kanadın alt kısmından üst kısmına doğru bir kaldırma kuvveti oluşmasını sağlamaktadır. Bu kuvvet rüzgâr türbininden enerji üretilmesini sağlayan kuvvettir (Şentürk, 2007). Şekil 4.2’de havanın bir kanat kesiti (aerofoil) etrafındaki akışı ve kaldırma kuvveti oluşumu gösterilmiştir.



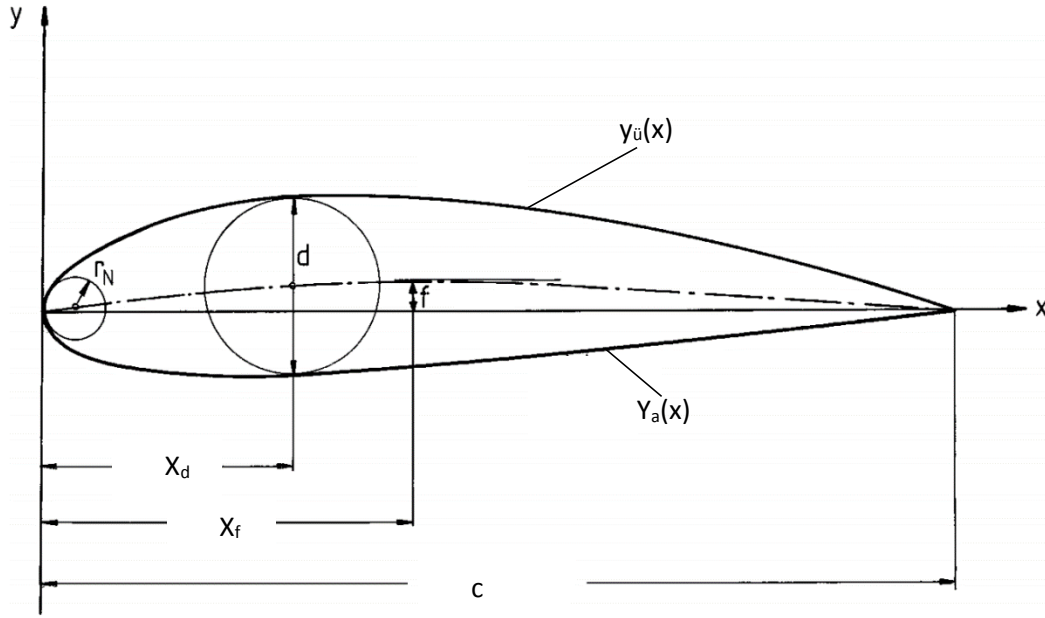
Şekil 4.2. Aerofoil etrafındaki hava hareketi ve kaldırma kuvveti oluşumu (URL-18)

Rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılan bazı aerofoiller; orijin ülkesi ve kullanılan kod veya kısaltmalar;

- Delft University of Technology (Hollanda) – DU
- NREL (Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı - ABD) – SERI
- İsveç Havacılık Araştırmaları Enstitüsü – FFA-W
- Althaus ve Wortmann (Almanya)– FX
- Riso Ulusal Laboratuvarı (Danimarka) – RISO
- Ulusal Havacılık Danışma Komitesi (ABD) -NACA

şeklindedir (Emniyetli, 2007).

Bu profillerden günümüzde en yaygın kullanılan profil NACA olup tipik bir NACA profili ve temel büyüklükleri Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. NACA aerofoil serisindeki büyüklükler (Hau, 2006)

NACA aerofoil serisi; aerofoil referans hattı uzunluğu (c), maksimum kamburluk (f), maksimum kamburluğun konumu (x_f), maksimum kalınlık (d), maksimum kalınlığın konumu (x_d), aerofoil hücum kenarının eğrilik yarıçapı (r_N), aerofoil üst eğri formu $y_u(x)$ ve aerofoil alt eğri formu $y_a(x)$ ile karakterize edilmektedir. Bu aerofoillerde boyutsuz maksimum kamburluk oranı ($\bar{f}$) ve boyutsuz maksimum kalınlık oranı ($\bar{d}$) sırasıyla;

$$\bar{f} = \frac{f}{c} \quad (4.1)$$

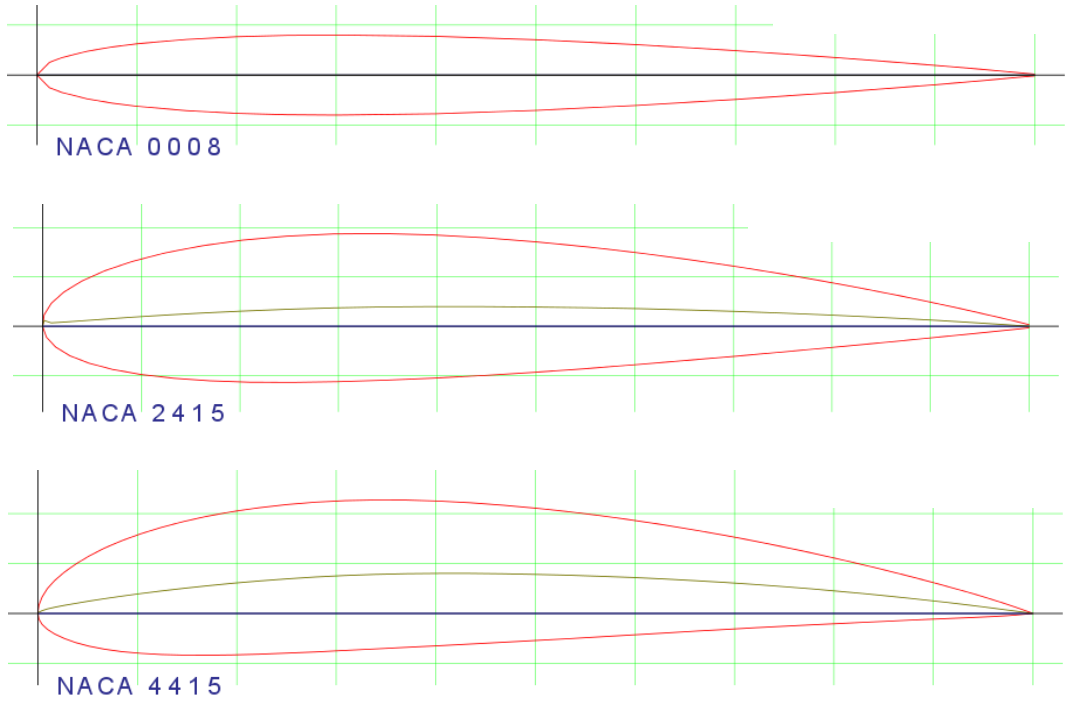
$$\bar{d} = \frac{d}{c} \quad (4.2)$$

şeklinde tanımlanmaktadır(Şenel, 2012).

NACA aerofoil kodları genel olarak çok basamaklı sayılar kullanılarak ifade edilmektedir (NACA 0008, NACA4415 vb.). Buradaki her bir sayının özel bir anlamı vardır. Bunlardan birinci sayı yüzde maksimum kamburluk oranını ($\bar{f}$), İkinci sayının on katı yüzde olarak kamburluğun aerofoil kesit uzunluğu içindeki konumunu, üçüncü ve dördüncü sayı ise yüzde olarak maksimum kalınlık oranını göstermektedir (Şenel, 2012). Çizelge 4.1’de NACA 0008, NACA 2415 ve NACA 4415 aerofoil ile rakamların anlamları, Şekil 4.4’de ise geometrik görünüşleri verilmektedir.

Çizelge 4.1. Çeşitli aerofoiller ve anlamları

Sayılar	Aerofoiller		
	NACA 0008	NACA 2415	NACA 4415
Birinci sayı	0	2	4
Anlamı	Aerofoilde kamburluk oluşmadığını	Maksimum kamburluk oranının $\bar{f}=0,02$ olduğu	Maksimum kamburluk oranının $\bar{f}=0,04$ olduğu
İkinci sayı	0	4	4
Anlamı	Maksimum kamburluğun profilin hiçbir noktasında oluşmadığını	Maksimum kamburluğun aerofoil kesit uzunluğunun % 40'ına karşılık gelen noktada olduğu ($x_f=0,04c$)	Maksimum kamburluğun aerofoil kesit uzunluğunun % 40'ına karşılık gelen noktada olduğu ($x_f=0,04c$)
Üçüncü ve Dördüncü sayı	08	15	15
Anlamı	Maksimum kalınlık oranının $\bar{d}=0,08$ olduğu	Maksimum kalınlık oranının $\bar{d}=0,15$ olduğu	Maksimum kalınlık oranının $\bar{d}=0,15$ olduğu



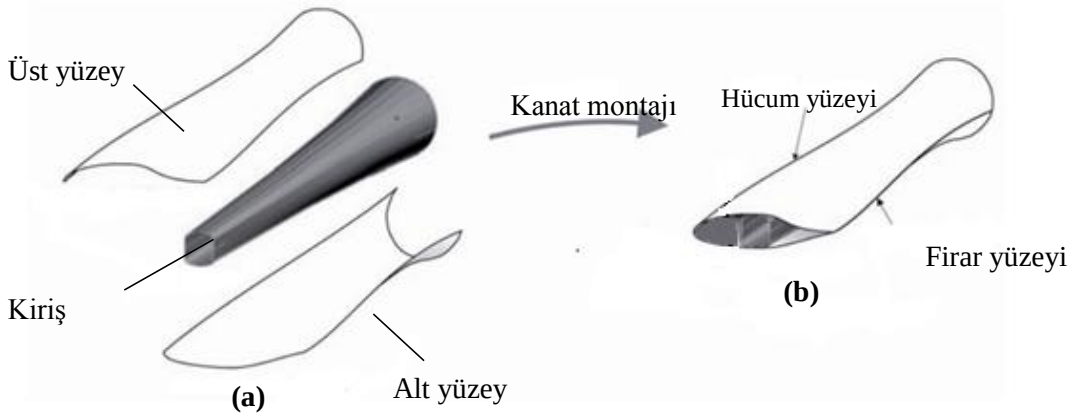
Şekil 4.4. Çeşitli NACA profilleri (URL-19)

Aerofoillerde amaç kanat alt ve üst yüzeyi arasında basınç farkı oluşturarak maksimum güç elde etmektir. Şekildeki NACA profilleri değerlendirildiğinde; NACA 0008 profilinde

kamburluk olmadığı (aerofoil üst eğrisinin eğrilik yarıçapı alt eğrinin eğrilik yarıçapına eşit) ve NACA 2415 ile NACA 4415 profillerinde kamburluk olduğu (profil üst eğrisinin eğrilik yarıçapı alt eğriden küçük) ancak NACA 4415 profilinde üst eğrinin alt eğriden daha kambur olduğu bu yüzden NACA 4415 aerofoilinde daha fazla kaldırma kuvveti elde edilebileceği belirlenmiştir. Bu çalışmada günümüzde yaygın olarak kullanılan aerofoillerden birisi olan NACA 4415 tercih edilmiştir.

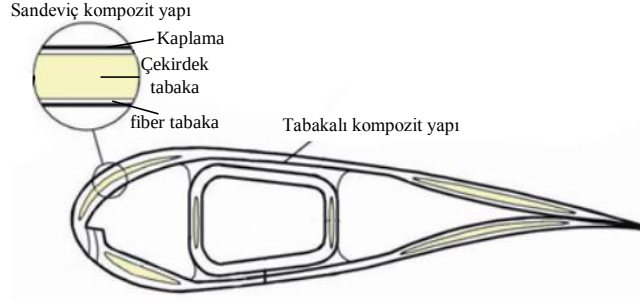
4.2 Kanat Özellikleri ve Tasarım Esasları

Günümüzde yaygın olarak kullanılan modern rüzgâr türbinlerinde kanat, dış yapı (kabul yapı) ve iç destek yapı (kiriş) olmak üzere iki bileşenden meydana gelmektedir. Bu bileşenlerden dış yapı, kanadın aerodinamik formunu oluşturmakta olup, üst yüzey ve alt yüzey olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Kiriş ise kanada etki eden yüklere karşı kanadın dayanımını arttırmaktadır (Höyland, 2010). Şekil 4.5a’da kanadı oluşturan bileşenler, 4.5b’de ise bu bileşenlerin montajlanmış görüntüsü verilmiştir.



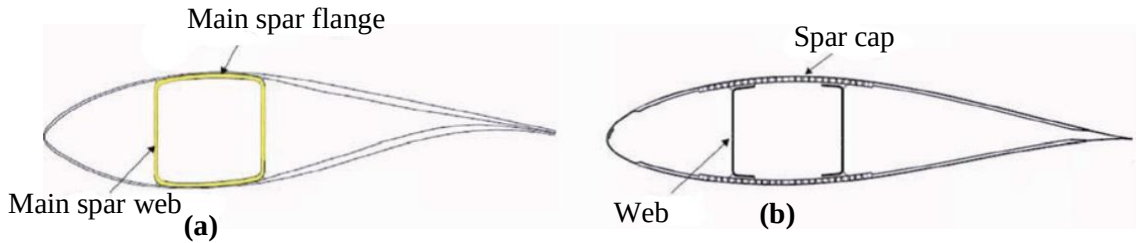
Şekil 4.5. Rüzgâr türbin kanat bileşenleri ve montajı (Höyland, 2010)

Kanat dış yapısı genellikle üst ve alt olmak üzere iki parça halinde imal edilmektedir. Günümüzde bu dış yapıda genellikle sandeviç ve tabakalı kompozit yapılar kullanılmakta olup Şekil 4.6’da bir kanat kesiti üzerinde bu yapılar gösterilmiştir. Kanat dış yüzeyinde genellikle cam fiber takviyeli plastik, çekirdek malzeme olarak ise balsa ya da köpük kullanılmaktadır. Kanatta kullanılan malzemeler ile kanadın üretim yöntemleri ilerleyen kısımlarda izah edilecektir.



Şekil 4.6. Rüzgâr türbin kanadının kesit yapısı (Höyland, 2010)

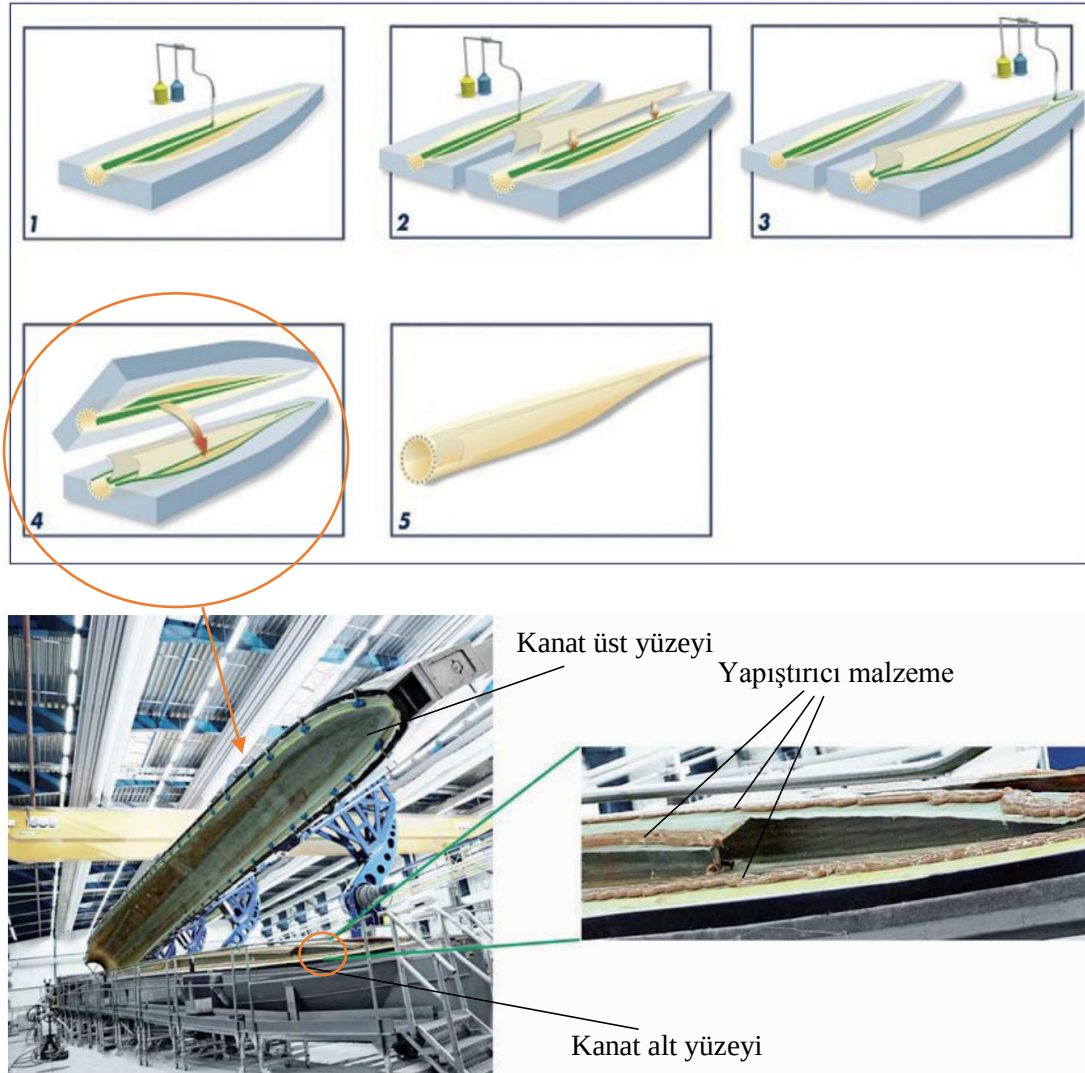
Kanat kirişi, dış yapıdan aldığı yükleri göbeğine ileten eleman olup kanadın dayanımını arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Kanat kirişi kanadın rotora bağlantı noktasına yakın bir konumdan başlayıp kanadın uç noktasına kadar uzanmakta olup kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan yükler ile rüzgâr kaynaklı yüklere maruz kalmaktadır. Ayrıca rüzgâr türbin kanatları tekrarlanan yüklere maruz kaldığından belli bir tekrar sayısından sonra kanatta yorulma olabilmektedir. Bu nedenle kiriş tasarımı sırasında yorulma olayı da incelenmelidir. Rüzgâr türbin kanatlarında kiriş yapı olarak genellikle dikdörtgen kiriş (Şekil 4.7a) ve I kiriş (Şekil 4.7b) kullanılmaktadır.



Şekil 4.7. Kanatta kullanılan kiriş yapıları (Höyland, 2010)

Kanatta kullanılan kiriş yapıları aynı amaçla ve benzer malzeme dağılımına sahip olacak şekilde kullanılmasına rağmen farklı şekilde imal edilmektedir. Dikdörtgen kiriş tasarımında **flange** (kanat iç yapısının yatay konumlanmış eğimli bileşen) ve **shear web** (kanat iç yapısının dikey konumlanmış bileşen) tek parça olarak üretilmekteyken, I kiriş tasarımında ise **spar cap** kanat iç yapısının yatay konumlanmış eğimli bileşen) ve **web** (kanat iç yapısının dikey konumlanmış bileşen) ayrı olarak imal edilmekte, daha sonra birleştirilmektedir. Bu tasarımlarda flange ve cap kısımlarının görevi flapwise yönündeki eğilme yüklerini (kanadın hücum kenarından fırlar kenarına doğru eğilmesi), shear web ve web kısımlarının görevleri ise kanadın flapwise yönündeki eğilmesi sonucu oluşan kesme kuvvetlerine karşı dayanım sağlamaktadır. Dikdörtgen kiriş yapıları genellikle eski tip rüzgâr türbin kanatlarında kullanılmakta günümüz modern rüzgâr türbin kanatlarında ise I kiriş yapıları tercih edilmektedir.

Kanat dış yapısı ve giriş imal edildikten sonra kanadın montajında bu bileşenlerin birbirine tutturulması gerekmekte olup bu işlem için yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Kanatlar farklı doğrultularda değişken yüklere maruz kaldığından, kanat bileşenlerini bir arada tutturulmasında yapıştırıcının performansı da önemlidir. Ayrıca büyük boyutlarda parçalar bir araya getirildiğinden yapıştırıcıların tolerans aralıkları da dardır. Bu nedenle rüzgâr türbin kanatlarında durgunken jel kıvamında, karıştırıldığında viskoz bir sıvı gibi davranan **tiksotropik malzemeler** kullanılmaktadır. Şekil 4.8’de beş adımda rüzgâr türbin kanadının yapıştırılma işlemi gösterilmiştir (Subrahmanian ve Dubouloz, 2009; Höyland, 2010).



Şekil 4.8. Kanat bileşenlerinin montajı (Subrahmanian ve Dubouloz, 2009; Höyland, 2010)

Kanadın beş adımda montajı işleminde ilk olarak yapıştırıcı malzeme kalıp içindeki kanat üst ve alt parçalarında yeşil renkli olarak gösterilen kısımlara uygulanır. İkinci olarak kanadın iç destek parçaları kanattaki pozisyonuna yerleştirilir. Üçüncü olarak kanat iç destek parçalarının üzerine yapıştırıcı malzeme uygulanır. Dördüncü olarak kanadın üstü yarısı diğer parçanın

üzerine yerleştirilerek montaj tamamlanır. Beşinci olarak ise kalıplar sökülerek kanat elde edilmektedir (Subrahmanian ve Dubouloz, 2009).

4.3 Rüzgâr Türbin Kanadında Kullanılan Malzemeler ve İmalat Yöntemleri

4.3.1 Rüzgâr türbin kanadında kullanılan malzemeler

Rüzgâr türbin kanadının tasarımı için önemli parametrelerden birisi de kanat malzemesidir.

Rüzgâr türbin kanat malzemelerinin;

- Kanada etki eden yüklere dayanabilecek özellikte olması,
- Kanada etki eden yerçekimi kuvvetlerinin azaltılması için düşük yoğunlukta olması,
- Yorulma ömrünün uzun olması,

istenmektedir. Rüzgâr türbin kanatlarında genel olarak çelik, alüminyum, titanyum, cam veya karbon takviyeli kompozit malzemeler ile ağaç kullanılmaktadır. Rüzgâr türbin kanatlarında kullanılan seçilmiş malzemelerin bazı mekanik özellikleri (ölgül ağırlık, kopma mukavemeti, elastiklik modülü ve yorulma mukavemeti) ile malzemenin etki eden yükler karşısında şekil değıştirmeden kalma yeteneğı olarak bilinen rijitlik parametreleri (ölgül kırılma mukavemeti, ölgül elastiklik modülü) Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Rüzgâr türbin kanatlarında kullanılan bazı malzemelerin rijitlik ve mukavemet parametreleri (Hau, 2006)

	Ölgül ağırlık (γ) g/cm ³	Kopma Mukavemeti (σ_K) N/mm ²	Elastiklik modülü (E) kN/mm ²	Ölgül kırılma mukavemeti σ_K/γ km	Ölgül elastiklik modülü (E/ γ) 10 ³ km	Yorulma mukavemeti $\pm \sigma_A$ 10 ⁷ N/mm ²
Çelik (St52)	7,85	520	210	6,6	2,7	60
Alüminyum alaşımı (AlZnMgCu)	2,7	480	70	18	2,6	40
Alüminyum alaşımı (AlMg5)	2,7	236	70	8,7	2,6	20
Titanyum alaşımı	4,5	900	110	20	2,4	-
Cam fiber/epoksi kompozit	1,7	420	15	24,7	0,9	35
Karbon fiber/epoksi kompozit	1,4	550	44	39	3,1	100
Aramid fiber/epoksi kompozit	1,25	450	24	36	1,9	-
Ağaç (Sitka Spruce)	0,38	≈65	≈8	≈17	≈2,1	≈20
Ağaç/Epoksi kompozit	0,58	≈75	≈11	≈13	≈1,9	≈35

Çizelgedeki malzemelerin rijitlik ve mukavemetleri değerlendirildiğinde; ağaç ve ağaç kompozit malzemelerin özgül ağırlıklarının düşük, yorulma mukavemetlerinin yüksek olduğu ancak kırılma mukavemetlerinin düşük olduğu, çelik ve titanyum malzemenin kırılma ve yorulma mukavemetinin yüksek olmasına rağmen özgül ağırlıklarının da fazla olduğu, Alüminyum ve kompozit malzemelerin ise kırılma ve yorulma mukavemetinin yüksek, özgül ağırlığının düşük olduğu görülmektedir. Çizelge değerlendirildiğinde rüzgar türbin kanatlarından istenilen malzeme özelliklerini alüminyum ve kompozit malzemelerin sağladığı, ancak alüminyum kanatların imalatı zor ve maliyetleri yüksek olduğundan kompozit malzemeler rüzgâr türbin kanatları için en uygun malzemelerdir. Günümüzde rüzgar türbin kanatlarında yaygın olarak kompozit malzemeler tercih edilmekte olup bu malzemeler ve özellikleri aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla malzemenin makroskobik düzeyde birleşimi olarak tanımlanmaktadır. Kompozit malzemelerin geliştirilmesindeki amaç, yapıyı oluşturan malzemelerin kompozit yapı öncesinde sahip olmadığı özelliklerin bu malzemeleri birleştirerek elde edilmesi yani malzeme özelliklerinin iyileştirilmesidir (Uysal, 2008).

Kompozit malzemeler matris ve takviye malzemesi olmak üzere en az iki farklı malzemenin birleşiminden oluşmaktadır. Takviye malzemeler taşıyıcı görev üstlenmekte olup etrafında bulunan matris yapı ise takviye elemanları bir arada tutmaya ve desteklemeye yaramaktadır. Günümüzde en bilinen ve yaygın olarak kullanılan kompozit yapı betondur. Beton içerisinde bulunan çimento, kum ve agregadan (kırmataş) matris yapıyı, çelik çubuklar ise takviye yapıyı oluşturmaktadır. Çamur ve samanın karıştırılması ile oluşturulan kerpiç ise insanlık tarihinin en eski kompozit malzemelerinden birisi olarak bilinmektedir (Karabağ, 2011).

Kompozit malzemeler tasarımına göre ;

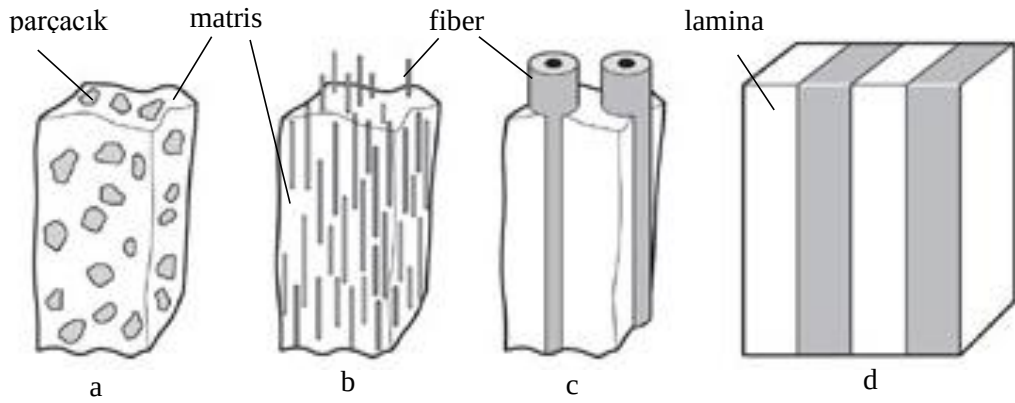
- Fiber takviyeli kompozitler,
- Parçacık takviyeli kompozitler,
- Tabakalı kompozitler,

şeklinde gruplandırılmakta olup bu yapılar aşağıda özetlenmiştir.

- **Fiber takviyeli kompozitler**, yumuşak ve sünek matris yapı içerisinde sert dayanıklı fiberler ilave edilerek yapının mekanik özelliklerinin iyileştirildiği kompozit malzemelerdir(Şekil 4.9a kısa fiber takviyeli kompozit ve 4.9b uzun fiber takviyeli kompozit). Bu malzemelerde tek yönde (fiber doğrultusu) yük uygulandığında yüksek mukavemet sağlanırken, fiberlere dik doğrultuda düşük mukavemet elde edilmektedir (Uysal, 2008).

- **Parçacık takviyeli kompozitler**, bir matris malzeme içerisinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunmasıyla elde edilen yapıdır (Şekil 4.9c). Bu yapının mukavemeti yapıya ilave edilen parçacıkların mekanik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir(Uysal, 2008).

- **Tabakalı kompozitler**, farklı yönlerdeki tabaka ve katmanların üst üste konularak bir araya getirilmesi ile oluşturulan yapılardır (Şekil 4.9d). Bu yapı her bir katman lamina olarak isimlendirilmekte olup yapının dayanımı laminaların yönelimine bağlıdır. Bu yapının en büyük avantajı laminaların istenilen doğrultuda yönlendirilerek, yapının istenen doğrultuda mukavemetinin ayarlanabilmesidir. Modern rüzgâr türbin kanatlarında genellikle tabakalı kompozit yapılar kullanılmaktadır (Uysal ,2008).



Şekil 4.9. Kompozit malzeme çeşitleri (URL-20)

Kompozit malzemelerde matris malzeme uygulanan yükü fiberlere ileterek yapıya esneklik kazandırırken, takviye elemanı ise uygulanan yükü taşımaktadır. Aşağıda kompozit malzemelerde kullanılan matris ve takviye elemanları kısaca özetlenmiştir.

-**Matris elemanı**: Kompozit malzemelerde yük taşıyan takviye elemanlarının fonksiyonlarını yerine getirmeleri için matris elemanının mekanik özellikleri önemli olup matris eleman takviye elemanına göre düşük mukavemetli ve esnektir. Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan matris elemanlar epoksi, polyester ve fenolik reçine olup bu malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Matris malzemelerinin mekanik özellikleri (Berthelot, 1999)

Özellik	Epoksi	Polyester	Fenolik
Özgül ağırlık (g/cm ³)	1,3	1,2	1,2-1,3
Elastiklik modülü (GPa)	3,5	2-3	5-11
Çekme mukavemeti (MPa)	60	50-60	50-60
Kopma uzaması (%)	2	2-3	1,2

Çizelgedeki matris malzemelerin mekanik özellikleri değerlendirildiğinde, epoksi reçinenin özgül ağırlığının en yüksek, polyester reçinenin özgül ağırlığının ise en düşük olduğu, fenolik reçinenin elastiklik modülünün en yüksek, polyester reçinenin elastiklik modülünün ise en düşük olduğu, epoksi reçinenin çekme mukavemetinin polyester ve fenolik reçineden yüksek olduğu, polyester reçinenin kopma uzamasının en yüksek, fenolik reçinenin kopma uzamasının en düşük olduğu görülmektedir. Kompozit rüzgâr türbin kanatlarında yaygın olarak polyester ve epoksi reçineler kullanılmaktadır.

-Takviye elemanı: Kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak ise fiberler kullanılmakta olup fiberler kompozit yapının temel mukavemetini sağlayan elemandır. Günümüzde kompozit yapılarda genel olarak bor, karbon, silisyum karbür, aramid ve cam fiber kullanılmaktadır (Uysal, 2008).

Cam fiberler, mineral camlardan (silika, alümina, kireç, magnezya vb.) yapılmakta olup maliyetlerinin düşük olması ve üretim proseslerinin oldukça basit olması nedeniyle kompozit malzemelerde en yaygın kullanılan fiber çeşididir. Günümüzde cam fiber olarak E-Cam, D-Cam, R-Cam, S-Cam, C-Cam ve A-Cam kullanılmakta olup bu cam çeşitlerinden E-Cam takviye malzeme olarak rüzgâr türbin kanatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Uysal, 2008).

Karbon fiberler cam fiberlerden daha iyi mekanik özelliklere ve daha az yoğunluğa sahip olmasına rağmen maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı belirli tasarımlarda kullanılmaktadır. Karbon fiberlerin HS Karbon, HM Karbon, UHM Karbon, HM Karbon gibi çeşitleri bulunmaktadır (Uysal, 2008).

Kevlar olarak bilenen aramid fiberlerin mekanik özellikleri iyi olmasına rağmen basma ve eğilme dayanımları düşüktür. Aramid fiberler genellikle balistik uygulamalarda kullanılmaktadır. Aramid fiberlerin Kevlar 29, Kevlar 49, Kevlar 149, Twaron, Technora gibi çeşitleri bulunmaktadır.

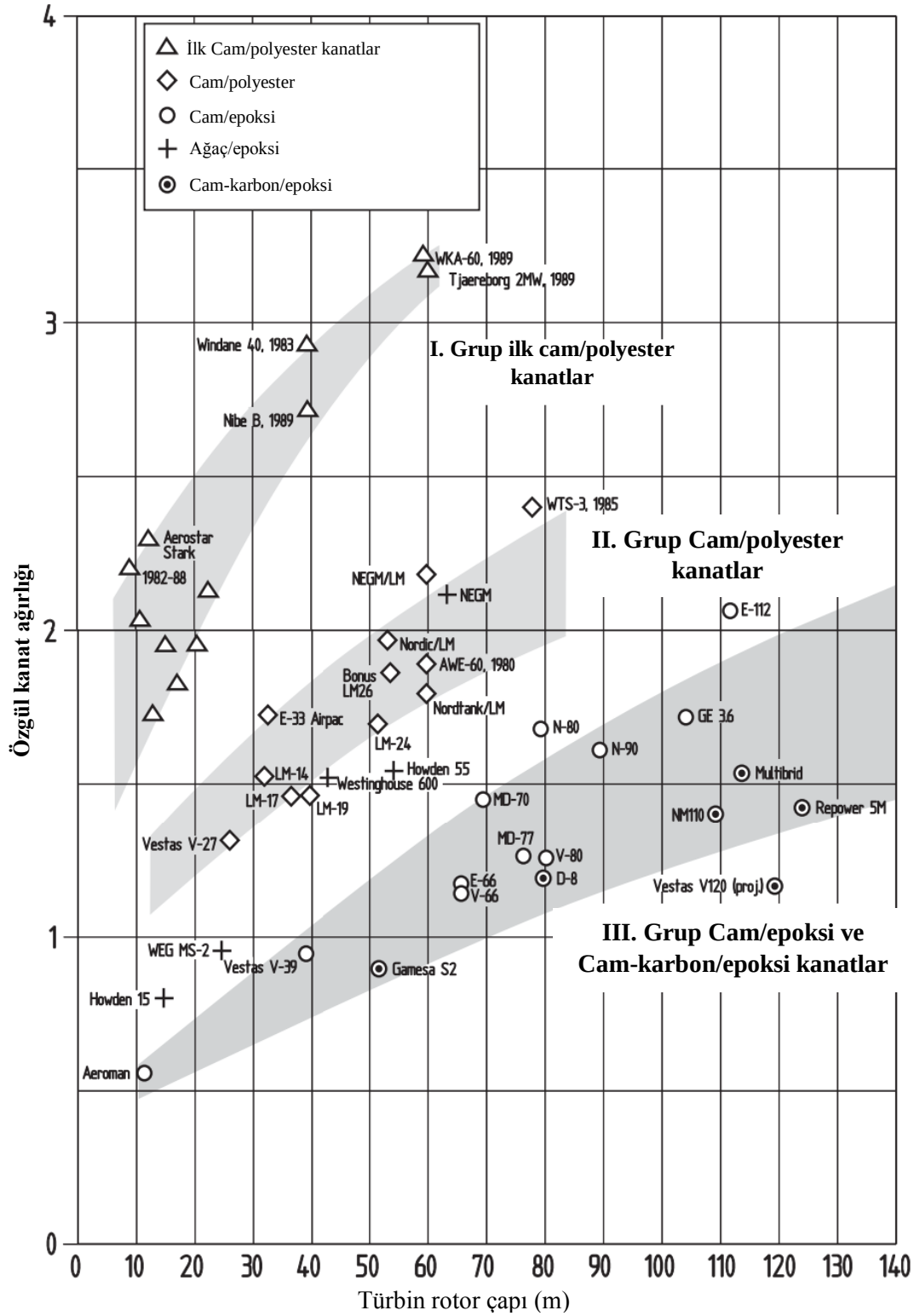
Bor (B), Bor karbür (B_4C) ve Silisyum Karbür (SiC) fiberler seramik fiberler olarak bilinmektedir. Bu fiberlerin maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı uygulama alanları sınırlıdır (Uysal, 2008). Kompozit malzemelerde kullanılan fiber malzemelerden E-Cam, R-Cam, HS Karbon, HM Karbon, UHM Karbon, Kevlar 29, Kevlar 149, Twaron, Tchnora, Bor, Bor karbür ve Silisyum Karbürün mekanik özellikleri Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanları (Berthelot, 1999)

Mekanik Özellik	E-Cam	R-Cam	HS Karbon	HM Karbon	UHM Karbon	Kevlar 29	Kevlar 149	Twaron	Technora	Bor	Bor Karbür	Silyum Karbür
Yoğunluk (g/cm ³)	2,6	2,5	1,75	1,81	1,95	1,44	1,47	1,44	1,39	2,6	2,6	3
Çap (µm)	10-20	-	5-7	5-7	5-7	12	12	12	12	100-150	100-150	100-150
Elastiklik Modülü (GPa)	73	86	210	400	600	60	160	60	90	430	430	410
Çekme Dayanımı (MPa)	3400	4400	3000-4000	2800	2000	3000	2400	2600	2800	3800	4000	3900

Rüzgâr türbin kanatlarında ekonomik olması ve istenilen özellikleri sağlaması nedeniyle cam fiber tercih edilmektedir. Mekanik özellikleri iyi olmasına rağmen maliyetleri yüksek olduğu için karbon fiber ve aramid fiber rüzgâr türbin endüstrisinde fazla kullanılmamaktadır.. Seramik fiberler ise kırılmalıklarının yüksek olmasından dolayı rüzgâr türbinlerinde tercih edilmemektedir (Uysal, 2008).

Rüzgâr türbin kanatlarında en uygun malzemenin seçiminde kanat ağırlığı önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Kanat ağırlığı kanat tasarımı ile kullanılan malzemeye bağlıdır. Günümüzde modern rüzgar türbinlerinde cam takviyeli kompozit malzemeler kullanılmakta olup bu kompozit malzemenin de birçok çeşidi bulunmaktadır. Bu malzemelerden rüzgar türbin kanatları için en uygun olanının belirlenmesi amacıyla farklı kanat tasarımları Hau ve Renouard tarafından değerlendirilerek ve Şekil 4.10'da bulunan grafik oluşturulmuştur. Bu grafikte kanat tasarımlarının rotor çapına göre iki boyutlu kanat kesitlerinin ağırlıkları **ölgül kanat ağırlığı** olarak tanımlanmıştır (Hau, 2006).

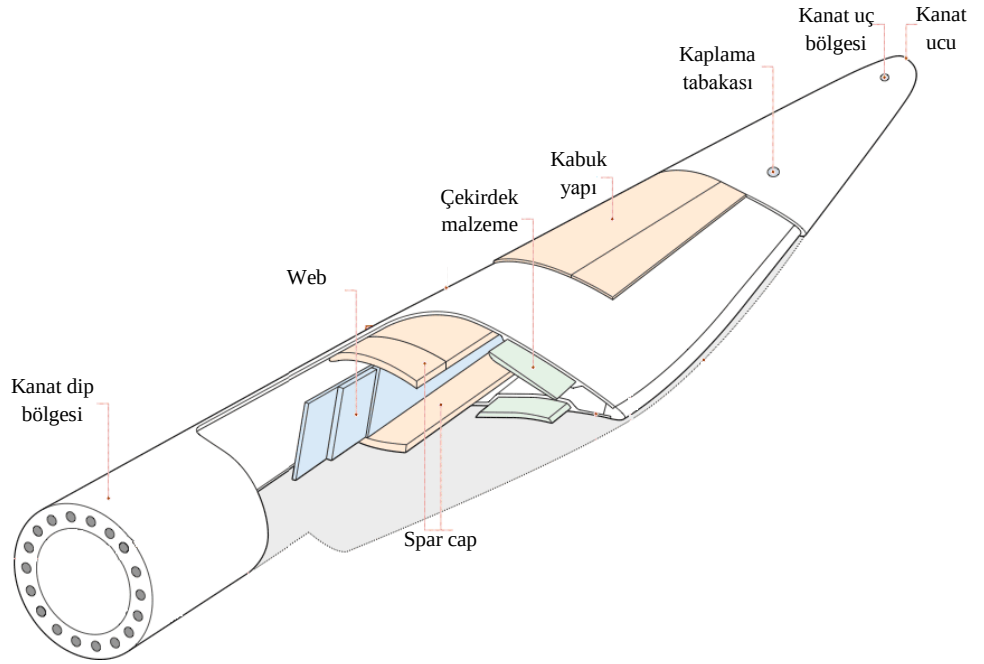


Şekil 4.10. Farklı kanat tasarımlarının özgül ağırlıkları (Hau, 2006).

Şekildeki farklı kanat kanat tasarımları ile ilgili yapılan çalışma değerlendirildiğinde ilk olarak türbin rotor çapı arttıkça kanat özgül ağırlıklarının da arttığı görülmektedir. Kanat ağırlıklarındaki bu artış kanada etki eden yerçekimi ve atalet kuvvetlerinin de artmasına neden olduğundan kanat ağırlığındaki artışın minimum seviyede olması istenmektedir. Bu nedenle günümüzde rüzgâr türbin kanat malzemesi olarak düşük özgül kanat ağırlığına sahip olan

E-cam/epoksi ve cam-karbon/epoksi malzemeler tercih edilmelidir. Ancak karbon fiber kanatların üretim maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle günümüzde yaygın olarak cam/epoksi kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Ayrıca günümüzde büyük boyutlardaki rüzgâr türbinlerinde (5 MW ve üzerinde güce sahip türbinler) fiber malzeme olarak karbon fiber ya da cam fiber ile karbon fiberin birlikte kullanıldığı tasarımlar ile ilgili çalışmalar da yapılmaktadır.

Günümüzde kanat ağırlığının düşük seviyede tutulması için farklı parçalardan oluşan kanat tasarımları kullanılmaktadır. Bu tasarımlar kanada etki eden yükler ve kanadın zorlanma halleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Kanada etki eden yükler ve kanadın zorlanma biçimleri ilerleyen bölümlerde izah edilecektir. Şekil 4.11’de günümüzde modern rüzgar türbinlerinde kullanılan kanat tasarımı verilmiştir.



Şekil 4.11. Modern rüzgâr türbin kanadı (URL-13)

Modern rüzgâr türbin kanatlarında; kanat dip bölgesi ile kanat dış yapısı cam fiber ya da karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerden, iç destek yapı olarak bilinen web ile spar ise sandviç kompozit malzemelerden imal edilmektedir. Kanatta kullanılan sandviç kompozit malzemelerde en üst tabakadan en alt tabakaya doğru sırasıyla cam ya da karbon fiber takviyeli kompozit, çekirdek malzeme (balsa ağacı ya da köpük) ve cam ya da karbon fiber takviyeli kompozit malzeme bulunmaktadır. Kanadın en dış kısmında bulunan kaplama tabakası ise poliüretan boya ya da jel coat malzeme kullanılarak oluşturulmaktadır.

4.3.2 Rüzgâr türbin kanadı imalatı

1970'lerin başlarındaki enerji krizi, enerji üretiminde rüzgâr türbinlerinin kullanılmaya başlanmasını sağlamıştır. Bazı devletlerin destekleriyle rüzgâr türbinlerini ile ilgili Ar-Ge faaliyetleri hız kazanmış ve yeni imalat teknolojileri geliştirilerek rüzgâr türbin üreticileri tarafından kullanılmaya başlanmıştır (Höyland, 2010). Rüzgâr türbin kanadı imalatında ilk zamanlar açık kalıp yöntemi kullanılırken yapılan çalışmalar sonucu vakum torbalama ile el yatırma yöntemi ve vakum infüzyon yöntemleri geliştirilerek kullanılmaya başlanmıştır.

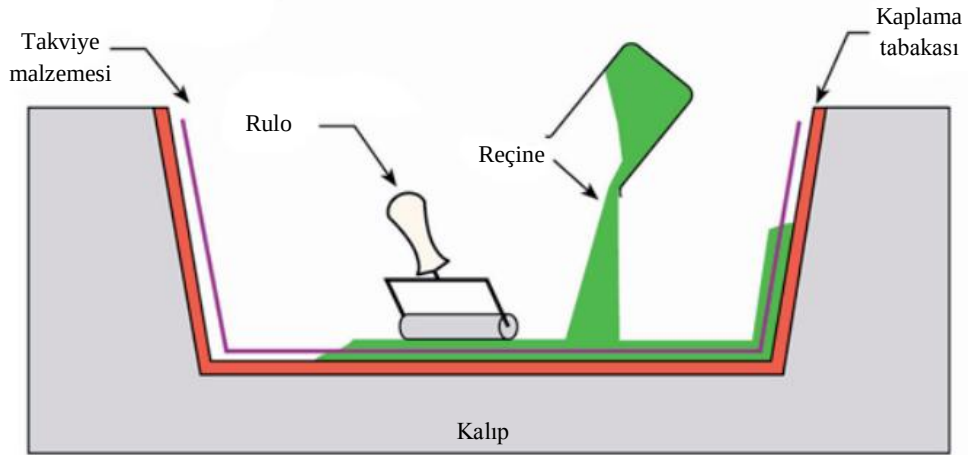
Rüzgâr türbin kanatları genel olarak alt ve üst olmak üzere iki dış (kabuk) yapı ve bunların ortasında bulunan bir destek elemandan oluşmaktadır. Kanadın dış yapısının imalatı için ilk olarak bir kanat kalıbı hazırlanır ve aşağıda anlatılan üretim yöntemlerinden birisi kullanılarak kanat kabuk yapısı imal edilir. Kanadın destek yapısı I ya da dikdörtgen giriş olarak üretilir. Kanat destek yapısı imal edildikten sonra kanat dış yapısı ile destek yapı uygun yapıştırıcılar kullanılarak birleştirilerek ve kanat imal edilmektedir.

Rüzgâr türbin kanatların performansı kullanılan üretim yöntemine de bağlıdır. Bu nedenle rüzgar türbinlerinden iyi bir performans sağlanmasında kanadın imalat yöntemi de önemlidir. Aşağıda rüzgâr türbin kanatlarında kullanılan üretim yöntemleri karşılaştırmalı izah edilmiştir.

4.3.2.1. El yatırma yöntemi

Kompozit malzemelerin temel imalat yöntemlerinden birisi olan el yatırma yöntemi takviye malzemenin kalıplara yatırılıp kalıp üzerine sıvı reçine uygulanması ve bu işlemin her bir tabaka için tekrarlanarak kanadın elde edilmesi şeklindedir (Karabağ, 2011).

Bu yöntemde ilk olarak hazırlanan kanat kalıbına kaplama tabakası spreyle tabancası, fırça ya da rulo ile uygulanır. Kaplama tabakası yeterince sertleştğinde üzerine takviye malzemesi, takviye malzemesinin üzerine ise reçine uygulanır. Daha sonra bir rulo ile reçinenin takviye malzemesi üzerine iyice yayılması ve reçinin takviye tabakasına daha iyi nüfuz etmesi sağlanır. Takviye elemanı ve reçine arasında boşluk kalmaması için reçine yeterli sertliğe ulaşana kadar rulolama işlemine devam edilir (Karabağ, 2011). Şekil 4.12'de el yatırma yöntemiyle kanat üretimi şematik olarak gösterilmiştir.

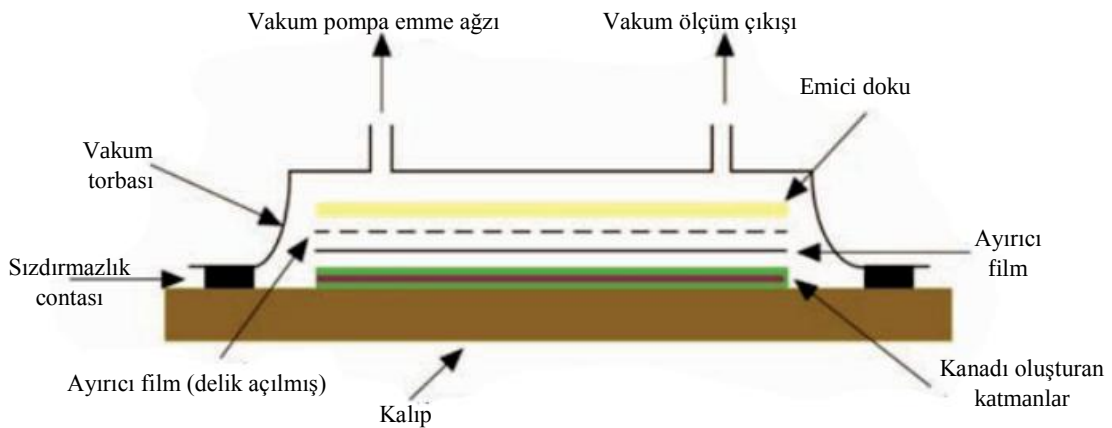


Şekil 4.12. El yatırma yöntemi (SP Systems, 2001)

Bu metodun olumsuz yanlarından birisi çalışanlarda alerjik rahatsızlıklara neden olmasıdır. Bu nedenle bu yöntemin kullanıldığı yerlerde gelişmiş havalandırma sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu metodun diğer bir dezavantajı ise bu metotla üretilecek kanadın kalitesinin çalışanın becerisine bağlı olmasıdır (Höyland, 2010).

4.3.2.2. Vakum torbalama yöntemi

Vakum torbalama yöntemi rüzgâr türbin kanatlarının imali için havacılık sanayisinden uyarlanmış bir teknolojidir. Bu teknolojiye el yatırma yönteminden farklı olarak, reçine kalıp yüzeyine serildikten sonra reçine reaksiyonu hızlanıp jelleşme kıvamına gelmeden önce kalıp iç kısmı sıcaklığa ve basınca dayanıklı vakum torbası ile kapatılarak sızdırmazlığın sağlanmasının ardından sisteme vakum yapılmasıdır. Bu vakumlama işleminin amacı üründen el yatırma yöntemiyle alınamayan hava kabarcıklarının vakum vasıtasıyla üründen uzaklaştırılması ve reçinenin lifler arasına daha kolay nüfuziyetinin sağlanmasıdır (Karadağ, 2011). Şekil 4.13’de vakum torbalama yöntemiyle rüzgâr türbin kanadı üretimi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Vakum torbalama yöntemi (SP Systems, 2001)

Şekilden görüldüğü gibi bu yöntemde, ayrıca yardımcı malzemeler de kullanılmaktadır. Bu malzemelerden **emici doku** yüzeye serilen fazla reçineyi emme amacıyla, **ayırıcı film** emici doku ise ürünün emici doku üzerine yapışmasını engellemek amacıyla kullanılmaktadır. Bu yöntemde vakum uygulaması için mutlaka ısı ve basınca dayanıklı bir vakum torbası (membran) kullanılmalıdır. Bu membran el yatırması yöntemiyle yapılan ürünün tamamını kaplayacak şekilde yerleştirilmektedir. Kalıp kenarlarına ise sızdırmazlığın sağlanması amacıyla sızdırmazlık contası ya da bantlar kullanılmaktadır (Karadağ, 2011).

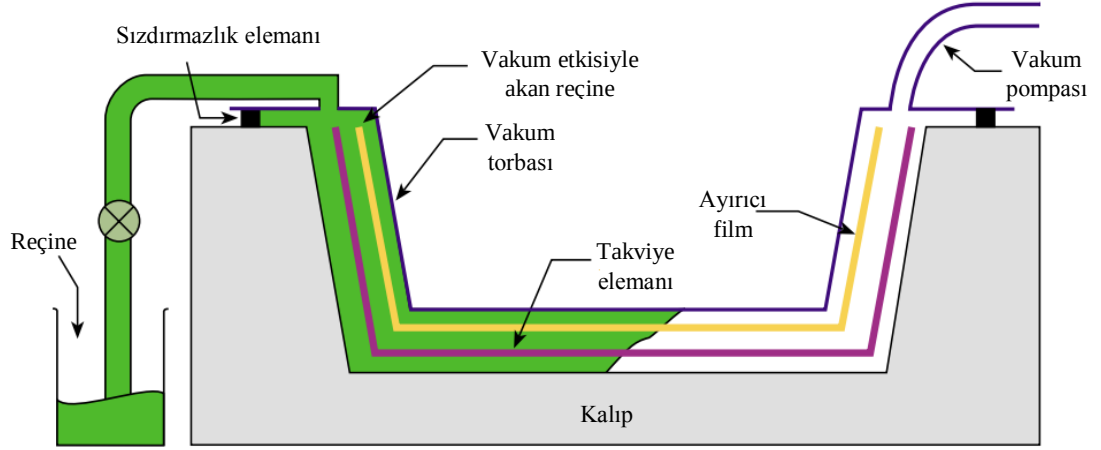
Bu yöntem ile kaliteli bir ürün elde edilmesi için ürün tamamen sertleşene kadar vakum işlemi sürdürülmelidir. Bu yöntemde dışarıdan ısı verilerek daha hızlı üretim sağlanmaktadır. Bu yöntem ile kapalı bir ortam oluşturularak sağlık açısından zararlı olabilecek uçucu maddelerin solunması ve emilimi azaltılmaktadır. Bu yöntemin tek dezavantajı üretim maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Bu nedenle rüzgâr türbin endüstrisinde belirli üreticiler tarafından kullanılmaktadır (Höyland, 2010).

4.3.2.3. Vakum infüzyon yöntemi

Bu yöntemin temel prensibi, vakum altına alınmış kuru takviye ve dolgu malzemelerinin oluşan basınç farkından yararlanılarak doyurulması şeklindedir. Bu yöntem 1950'lerde geliştirilmiş olup rüzgâr türbin endüstrisinde 1990'larda kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemin en önemli özelliği takviye elemanının düzgün bir şekilde reçine ile kaplanmasıdır. Bu yöntem ürünün içindeki hava boşluklarını el yatırması yönteminden daha iyi uzaklaştırmakta olup reçinenin çalışanlara zararını azaltmaktadır. Bu yöntemle üretilen ürünün mekanik özellikleri vakum torbalama yöntemiyle üretilen ürünün özellikleriyle karşılaştırıldığında vakum torbalama yönteminin daha iyi olduğu görülmektedir (Höyland, 2010).

Literatürde vakum ortamında reçine infüzyonu mantığına dayanan ve farklı isimlerde çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında küçük birtakım farklılıklar olmakla birlikte bu işlemlerin temel mantığı ve basamakları aşağıda verilmiştir (Şekil 4.14):

- Takviye malzemeler bir kalıp içerisine serilir
- Serilen takviye malzemesi vakum torbalama yönteminde olduğu gibi plastik bir vakum filmi ve sızdırmazlık elemanları ile dış ortamdan izole edilir.
- İzole edilen ortamın içinde bulunan hava bir vakum pompası yardımıyla boşaltılır.
- İzole edilen ortama reçine gönderilerek takviye malzemenin reçineye doyumu sağlanır.
- Takviye malzemesi reçineye doyduğunda reçine girişi kapatılarak reçinenin sertleşmesi beklenir (Höyland, 2010).



Şekil 4.14. Vakum infüzyon yöntemi (SP Systems, 2001)

Vakum infüzyon yönteminin rüzgâr türbin kanatlarında kullanılmaya başlanması ile birlikte kalıp yapım teknolojileri oldukça gelişmiş, kendinden ısıtmalı, vakum girişleri hazır, izolasyon yapılarak ısı kayıplarının minimum seviyeye indirildiği kalıplar geliştirilerek ürün kalitesinin daha da artması sağlanmıştır (Karadağ, 2011). Vakum torbalama yöntemiyle daha iyi mekanik özelliklere sahip rüzgâr türbin kanatları imal edilmesine rağmen günümüzde yaygın olarak vakum infüzyon yöntemi kullanılmaktadır. Rüzgâr türbin kanatlarının boyutları arttıkça vakum torbalama yöntemiyle kanat imalatı yapan üreticilerin de vakum infüzyon yöntemini tercih etmesi beklenmektedir (Höyland, 2010).

4.4 Rüzgâr Türbinlerinin Aerodinamik Tasarımı

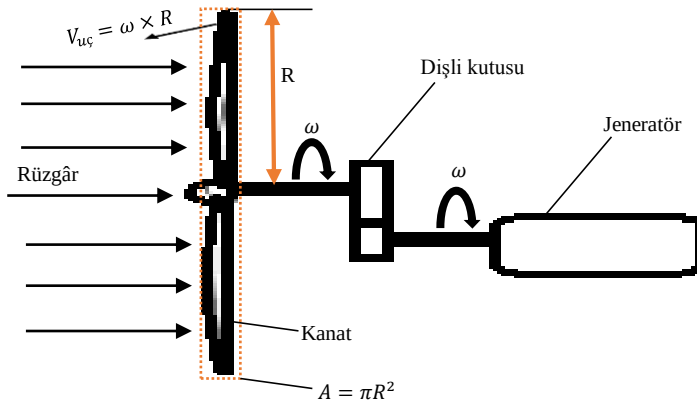
Rüzgar türbinlerinin temel fonksiyonu havanın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmektir. Rüzgar türbininin performansı türbinin aerodinamik tasarım parametreleri ile kanat geometrisine bağlı olup aşağıda bu özellikler değerlendirilmiştir.

4.4.1 Rüzgâr türbinlerinin aerodinamik tasarımı parametreleri

Rüzgar türbini analizinin yapılabilmesi için rüzgar türbini aerodinamik tasarım parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametreler enerji ve temel parametreler, aerodinamik teoriler ve kayıplar olarak gruplandırılmış olup türbin performansına etkileri aşağıda izah edilmiştir.

4.4.1.1 Enerji ve temel parametreler

Rüzgâr türbinlerinde kanatlar, rüzgârın hareketinden faydalanarak dönmektedir. Şekil 4.15’de rüzgâr türbininin genel yapısı (kanatlar, dişli kutusu ve jeneratör) verilerek kanat ve millerin dönüş yönleri, kanat uç-hız oranı ve kanat geometrik büyüklükleri verilmiştir. Rüzgâr gücünü (N) etkileyen parametreler; rüzgâr hızı (v), havanın yoğunluğu (ρ) ve kanadın süpürme alanıdır (A).



Şekil 4.15. Rüzgâr türbininin genel yapısı

V rüzgâr hızıyla hareket eden m kütleli havanın kinetik enerjisi (E) denklem (4.3)’de verilmiştir.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.3)$$

Havanın kütsel debisi ($\dot{m}$) olarak ifade edildiğinde rüzgâr gücü (N);

$$N = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2}\dot{m}v^2 = \frac{1}{2}(\rho AV)v^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (4.4)$$

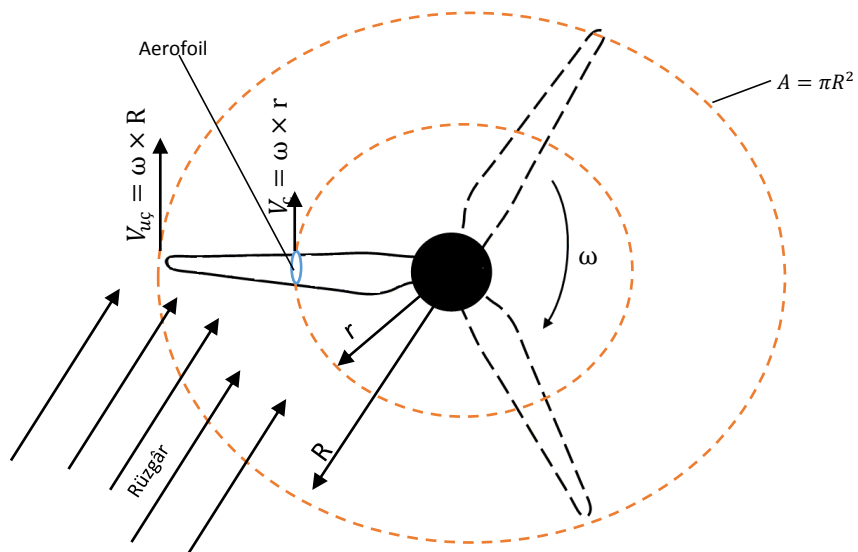
denklemleri kullanılarak belirlenmektedir (Şenel, 2012).

Rüzgâr türbinlerinden elektriksel güç üretimi (N_E) amacıyla türbinin hangi rüzgâr hızında (v) güç üretimine başlayıp hangi rüzgâr hızında güç üretiminin durması gerektiğini belirten hızlar **tasarım hızları** olarak bilinmektedir. Bu hızlar; türbinin devreye giriş hızı (u_C), nominal hızı (u_R) ve devreden çıkış hızı (u_F) şeklindedir. Rüzgâr türbinlerinde maksimum enerji üretimi yapan minimum hız **nominal hız (u_R)** olup bu hız değeri 10-15 m/s arasında olmaktadır. Rüzgâr türbinleri belli bir rüzgâr hızında üretime başlanmakta olup belli bir rüzgâr hızından sonra ise türbini korumak amacıyla durdurulmaktadır. Rüzgâr türbinlerinde enerji üretiminin başladığı hız **devreye giriş hızı (u_C)**, türbinin durdurulduğu hız ise **devreden çıkış**

The graph shows the energy flux density N_E (Watt) on the y-axis versus the velocity V (m/s) on the x-axis. The curve is divided into four regions by vertical red lines at U_C , U_R , and U_F . In region I ($0 < V < U_C$), $N_E = 0$. In region II ($U_C < V < U_R$), N_E increases from 0 at U_C to a value at U_R . In region III ($U_R < V < U_F$), N_E is constant at the plateau level. In region IV ($V > U_F$), N_E is 0.

Uç-hız oranı (λ): Rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansının belirlenmesinde önemli parametrelerden biri olan uç-hız oranı; kanat uç hızının ($V_{uc} = \omega \times R$) rüzgâr hızına ($V_{rüzgâr}$) oranıdır (Şekil 4.17).

$$\lambda = \frac{V_{u\zeta}}{V_{rüzgâr}} = \frac{\omega \times R}{V_{rüzgâr}} \quad (4.5)$$



67

Yatay eksenli modern rüzgâr türbinlerinde, iki kanatlı türbinler için uç-hız oranı 9-10; üç kanatlı türbinler için ise 6-8 arasında olmaktadır. Günümüzde kullanılan büyük boyutlardaki üç kanatlı modern rüzgar türbinlerinde ise uç-hız oranı 9-12 arasında olup geleneksel rüzgar türbinlerine göre uç-hız oranının yüksek olması kanat boyutlarından kaynaklanmaktadır (Schubel ve Crossley, 2012).

Güç Katsayısı (C_p): Önceki kısımlarda da belirtildiği gibi rüzgâr türbinlerinde, rüzgâr gücünün hangi oranda kanatlar tarafından alındığının ya da türbin verimliliğinin belirlenmesinde güç katsayısından yararlanılmaktadır. Güç katsayısı genel anlamda kanatların rüzgârdan aldığı gücün (N_R) rüzgâr gücüne (N_0) oranıdır (Şenel, 2012).

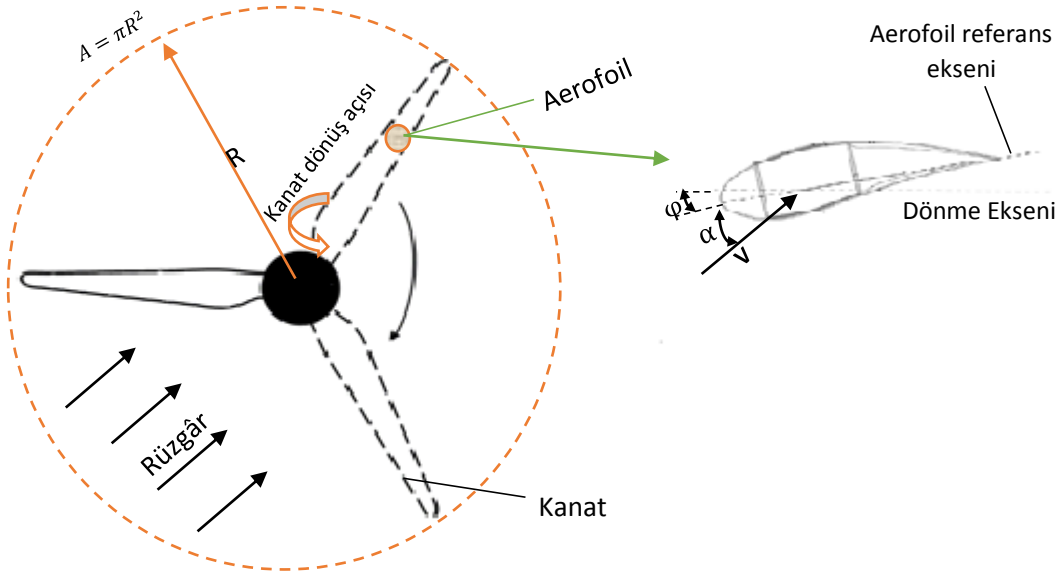
$$C_p = \frac{N_R}{N_0} \quad (4.6)$$

Katılık Oranı: Katılık oranı (K), kanatların kapladığı alanın (A_b) , kanatların dönme hareketinde süpürdüğü alana (**süpürme alanı**) (A) oranı olup denklem (4.7) ile belirlenmektedir (Şenel, 2012).

$$K = \frac{A_b}{A} \quad (4.7)$$

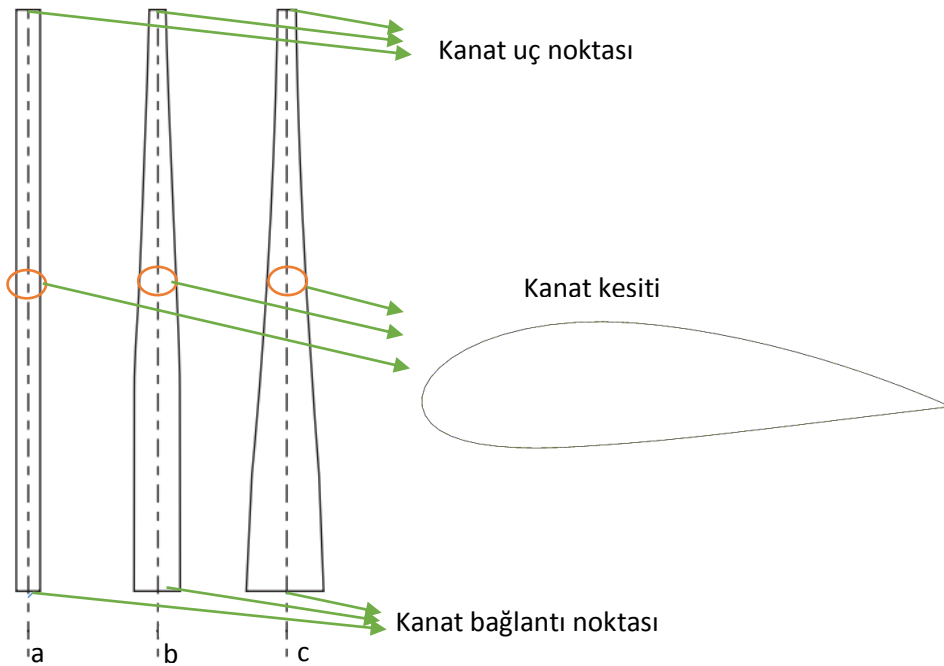
Katılık oranı, boyutsuz bir parametre olup yatay eksenli tek kanatlı rüzgâr türbinlerinde bu oran düşükken, üç kanatlı rüzgâr türbinlerinde bu oran 0,0345'in üzerindedir (Burton ve ark. 2001).

Kanat Açısı: Kanadın kendi eksenini etrafında döndürülmesi (pitch mekanizması hareketi) sırasında, aerofoil referans eksenine dönme eksenini arasında kalan açı kanat açısı (φ) olarak tanımlanmaktadır. Rüzgâr türbin kanatlarında genel olarak bu açı kanat uzunluğu boyunca bir aerofoilden diğerine değişkenlik göstermektedir (Şenel, 2012). Rüzgâr türbinlerinde kanat açısı (bağlama açısı) (φ) ve hücum açısı (α) Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18. Rüzgâr türbinlerinde kanat açısı ve hücum açısı

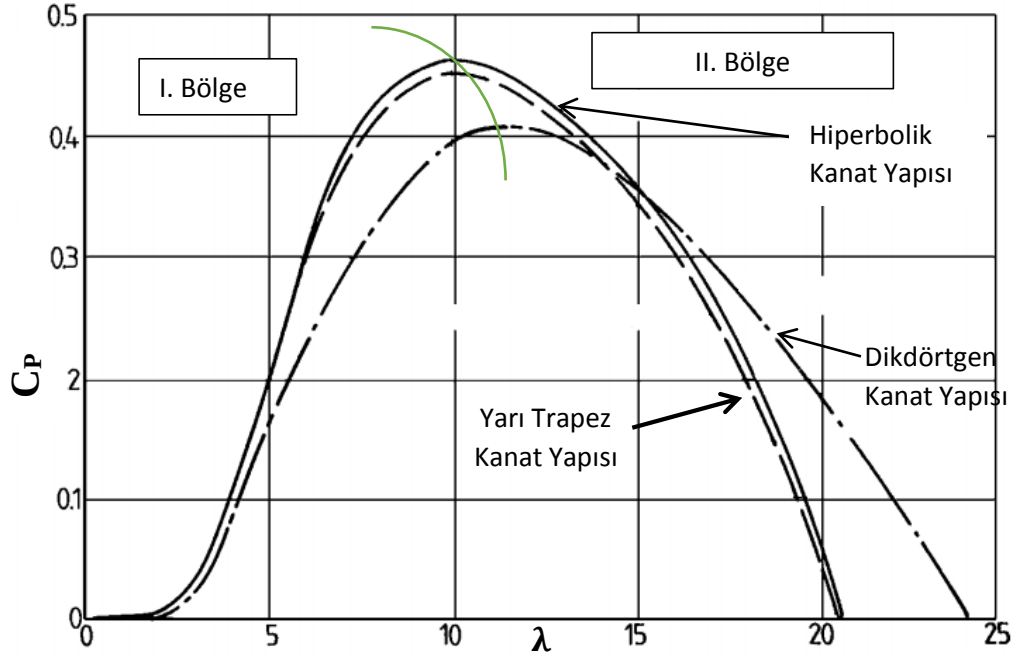
Optimum Kanat Şekli: Kanatların rüzgârdan elde ettiği güç miktarı kanadın geometrik şekline de bağlıdır. Kanadın optimum şeklinin belirlenmesi amacıyla rüzgâr türbinlerinde farklı tür kanat geometrisine sahip kanatların kullanımı ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucu belirlenen, kanat yapılarından bazıları; dikdörtgen, yarı trapez veya hiperbolik geometriye sahip yapılardır (Şenel, 2012). Şekil 4.19’da bu yapılar (a- dikdörtgen, b- yarı trapez, c- hiperbolik) verilmiştir.



Şekil 4.19. Rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılan kanat yapıları (Hau, 2006)

Şekildeki kanat yapılarından hiperbolik kanatların imalatı zordur. İmalat maliyetlerinin diğerlerine göre ucuz olmasından dolayı rüzgâr türbinlerinde genel olarak yarı trapez şeklindeki

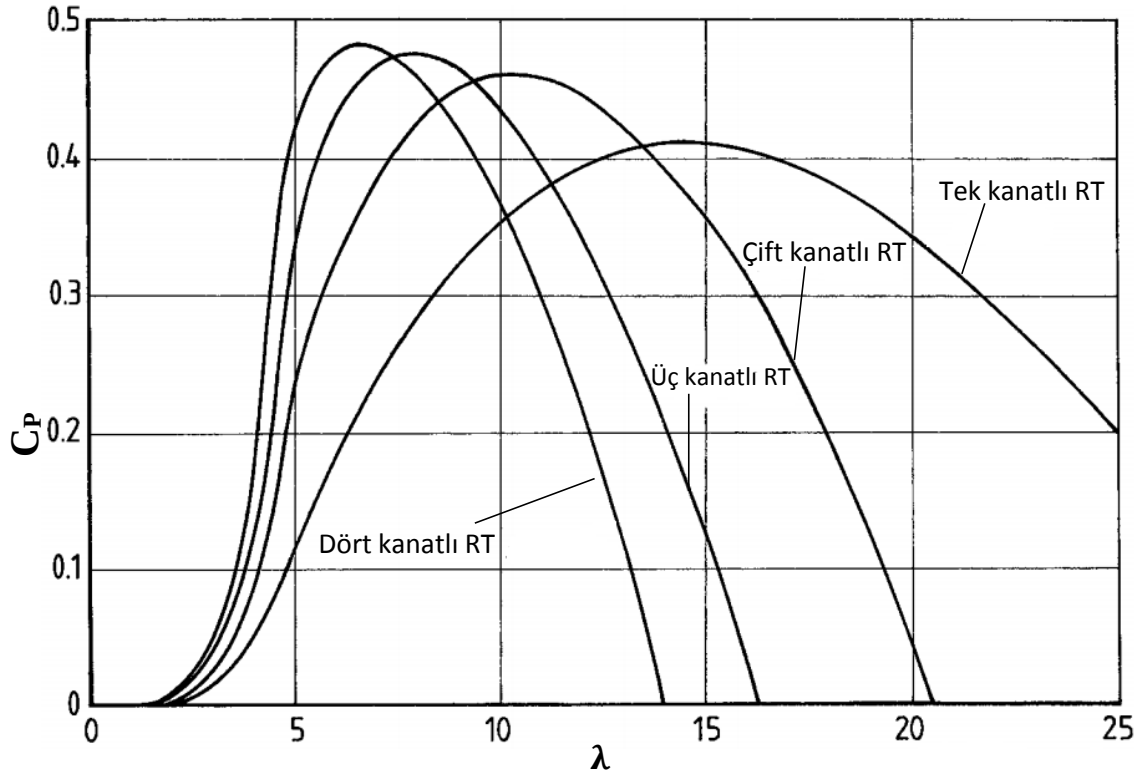
kanat yapıları tercih edilmektedir (Şenel,2012). Aynı koşullar altında yapılan deneyler sonucu farklı kanat yapılarında uç-hız oranındaki (λ) değişimin güç katsayısına (C_p) etkisi Şekil 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.20. Farklı kanat yapılarında C_p - λ değişimi (Hau, 2006)

Uç Hız oranının (λ) 10 olduğu durumda kanat yapılarının güç katsayıları (C_p) değerleri değerlendirildiğinde; hiperbolik kanat yapısında $C_{p_{maks}}$ değerinin 0.46, Yarı trapez kanat yapısında $C_{p_{maks}}$ değerinin 0.44 olduğu belirlenmiştir. Dikdörtgen kesitli kanat yapısında kanadın uç-hız oranı (λ) 12 olduğunda $C_{p_{maks}}$ değerinin 0.41 olduğu görülmektedir. C_p - λ eğrilerinin I. bölgesinde λ 'daki artışın C_p 'yi artırdığı, II. bölgesinde ise λ 'daki artışın C_p 'yi azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca uç-hız oranının (λ) 0-5 ve 20-25 aralıklarındaki değerlerinde, güç katsayısının çok düşük olduğu görülmektedir (Şenel, 2012).

Kanat sayısı: Rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansını etkileyen temel parametrelerden birisi de kanat sayısıdır. Rüzgâr türbinlerinde kanat sayısı ile kanatların dönüş hızı ters orantılıdır. Rüzgar türbinlerinde kanat sayısı arttıkça kanadın dönme hızı azalmaktadır dolayısıyla rüzgar türbinlerinde kanat sayısı arttıkça uç-hız oranı azalmaktadır. Farklı kanat sayısına sahip yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde (C_p - λ) değişimi Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21. Farklı kanat sayısına sahip rüzgâr türbinlerinde C_p - λ değişimi (Hau, 2006)

Şekilde yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde kanat sayısı arttıkça uç-hız oranının azaldığı görülmektedir. Yatay eksenli tek kanatlı rüzgâr türbinlerinde optimum uç-hız oranı 15, çift kanatlı rüzgâr türbinlerinde 10, üç kanatlı rüzgâr türbinlerinde 8, dört kanatlı rüzgâr türbinlerinde ise 7'dir. Ayrıca yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde kanat sayısı arttıkça türbin kapasite faktörünün de arttığı görülmektedir (Şenel, 2012).

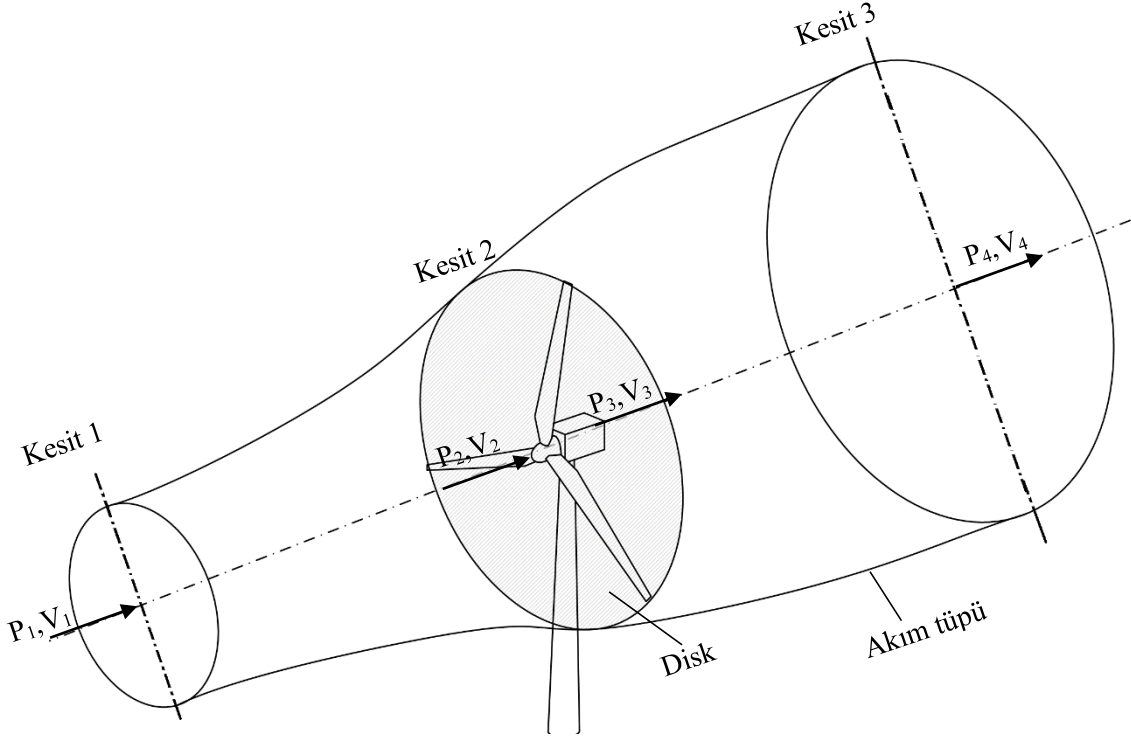
4.4.1.2 Aerodinamik teoriler

Rüzgâr türbinlerinde; hava ile kanatlar arasındaki etkileşimin belirlenmesi amacıyla Lineer Momentum Teorisi, Dönen Disk Modeli için Momentum Teorisi ve Kanat Eleman Teorisi gibi çeşitli aerodinamik teoriler geliştirilmiş olup bu teoriler aşağıda kısaca özetlenmiştir

Bir Boyutlu (Lineer) Momentum Teorisi: Yatay eksenli rüzgâr türbinleri için en basit aerodinamik model bir boyutlu (lineer) momentum teorisidir. Bu teoride etrafında hava hareketi bulunan disk için bir model geliştirilerek sonsuz sayıda kanattan oluştuğu kabul edilen diske etki eden net kuvvet belirlenmiştir (Şekil 4.22). Modelde, kanadın yeterince önündeki rüzgâr hızı (V_1), statik basınç (P_1); kanadın yeterince arkasındaki rüzgâr hızı (V_4), statik basınç (P_4); kanat girişindeki rüzgâr hızı (V_2), statik basınç (P_2); kanat çıkışındaki rüzgâr hızı (V_3), statik basınç (P_3) olarak verilmiştir (Manwell, 2002). Bu teoride; momentumun korunumu ve Bernoulli denklemlerinden yararlanılarak belirlenen diske etkiyen net kuvvet;

$$F = \frac{1}{2} \rho A V_1^2 [4a(1 - a)] \quad (4.8)$$

denkleminde yararlanılarak belirlenmektedir. Burada ρ havanın yoğunluğu, A iki nolu kesitin yüzey alanı ve a aksenal indüksiyon faktörüdür. Momentum teorisine göre aksenal indüksiyon faktörü (a) 0,2 ile 0,5 arasında olmaktadır (Manwell, 2002; Şenel, 2012).

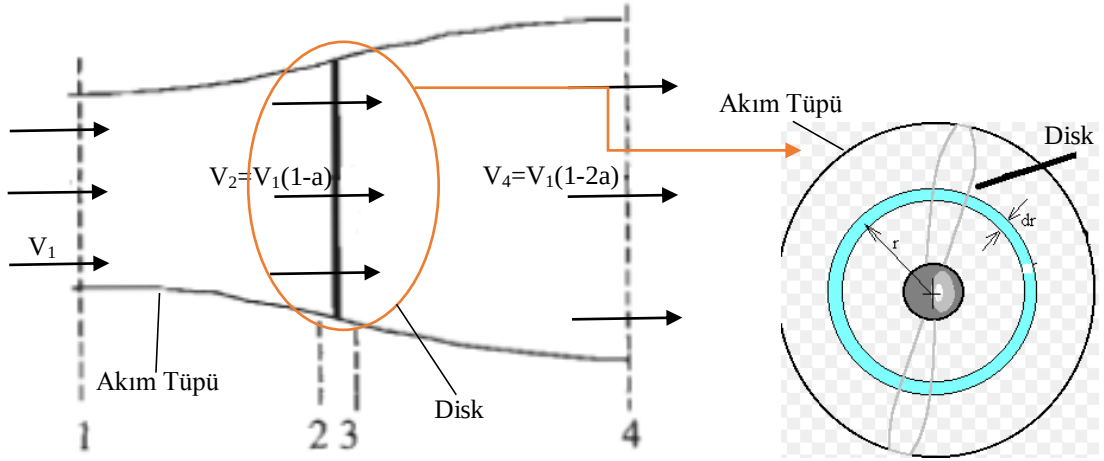


Şekil 4.22. Bir Boyutlu Lineer Momentum Teorisi için Disk Modeli (Şenel, 2012)

Bir boyutlu momentum teorisine ayrıca yatay eksenli rüzgâr türbinlerden elde edilebilecek maksimum güç katsayısı (C_{pmax}) da teorik olarak belirlenmiş olup **Betz limiti** olarak bilinen bu değer 0,5926'dır. Bu değer teorik olarak %59,26 olarak belirlenmesine rağmen, uygulamada yatay eksenli bir rüzgâr türbininin performansı hiçbir zaman bu değere ulaşamamaktadır. Bunun sebebi ise deney koşullarındaki türbinlerin sonlu sayıda kanattan oluşması, kayıplar ve kanada etki eden sürüklenme kuvvetinden kaynaklanmaktadır (Manwell, 2002; Şenel, 2012). Rüzgâr türbinlerinde oluşan kayıplar ile kanada etki eden sürüklenme kuvveti ilerleyen kısımlarda izah edilecektir.

Dönen Disk Modeli için Momentum Teorisi: Lineer momentum teorisinde sürtünme kayıpları ile girdap akımları ihmal edildiğinden rüzgâr türbininin aerodinamik performansı, bir boyutlu momentum teorisi kullanılarak belirlenenden düşük olmaktadır. Bu nedenle bir başka aerodinamik teori olan Dönen Disk Modeli için Momentum Teorisi geliştirilmiştir. Bu teoride; akım tüpü içerisine disk yerleştirilip havanın ve diskin dönme hareketi dikkate

alınarak diske etkiyen kuvvet ve moment değerlendirilmiştir. Bu teori için geliştirilen model Şekil 4.23’de verilmiştir.



Şekil 4.23. Dönen Disk Modeli için Momentum Teorisi için geliştirilen model (Şenel, 2012)

Dairesel akım tüpünde; m akışkanının kütlesi (kg), r akım tüpünün ortalama yarıçapı (m), ω kanatlarının dönüş hızı (rad/s), Ω rüzgârın dönüş hızı (rad/s) olmak üzere; rüzgârın etkisiyle ω açısal hızıyla dönen diskte oluşan güç (N_R);

$$N_R = \alpha(1 - a)\rho V \omega^2 R^4 \pi \quad (4.9)$$

şeklinde dir. Burada α açısal indüksiyon faktörü olup;

$$\alpha = \frac{\Omega}{2\omega} \quad (4.10)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Ayrıca dönen Disk Modeli için Momentum Teorisi’nden yararlanılarak türbinin güç katsayısı (C_p) da belirlenebilmekte olup bu büyüklük;

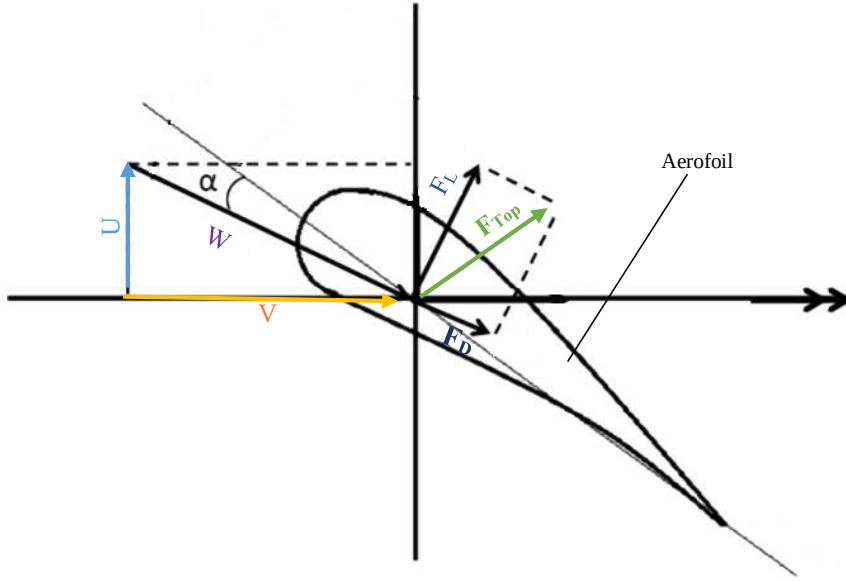
$$C_p = \frac{2\alpha(1-a)R^2 \omega^2}{V^2} = 2\alpha(1 - a)\lambda^2 \quad (4.11)$$

denkleminde yararlanılarak bulunmaktadır (Manwell, 2002; Şenel, 2012).

Kanat Elemanı Teorisi: Rüzgâr türbinlerinde kanada etki eden kuvvetlerin belirlenmesinde başka bir aerodinamik teori olan Kanat Elemanı Teorisi’nden de yararlanılmaktadır. Bu teoride; kanada etki eden bileşke rüzgâr hızı (W) dikkate alınmakta olup bu hız, kanadın hemen önündeki rüzgâr hızı (V) ve kanadın dönme hareketinden kaynaklanan rüzgâr hızının (U) bileşkesidir. Bileşke rüzgâr hızı;

$$W = \sqrt{V^2 + U^2} = \sqrt{(V(1 - a))^2 + (\omega r(1 + \hat{a}))^2} \quad (4.12)$$

denklemlerinden yararlanılarak belirlenmektedir. Bu hız ayrıca aerofoile etki eden kaldırma(F_L) ve sürüklenme (F_D) kuvvetlerinin doğrultusunu ve büyüklüğünü belirleyen hızdır. Aerofoile etki eden hızlar ve kuvvetler ile bileşkeleri Şekil 4.24’de verilmiştir.



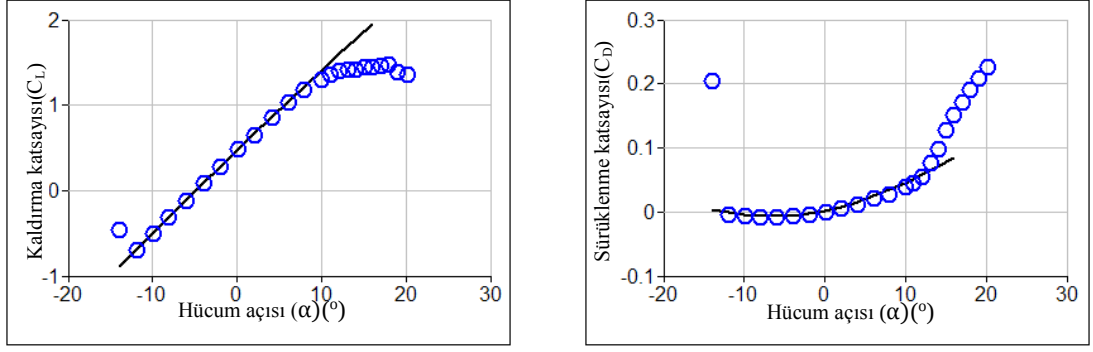
Şekil 4.24. Aerofoile etki eden hızlar ve kuvvetler

Aerofoilde; bileşke rüzgâr hızı yönünde sürüklenme kuvveti (F_D) ve rüzgâr hızına dik doğrultuda kaldırma kuvveti (F_L) oluşmaktadır. Bu kuvvetlerin büyüklüğü ise;

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho c W^2 \quad (4.13)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho c W^2 \quad (4.14)$$

denklemlerinden yararlanılarak belirlenmektedir. Burada C_L kaldırma kuvveti katsayısı, C_D sürüklenme kuvveti katsayısı, ρ havanın yoğunluğu, c aerofoil veter uzunluğu, W izafi rüzgâr hızıdır. C_L ve C_D katsayıları, belirlenen aerofoil için farklı Reynolds sayılarında yapılan deneysel çalışmalar sonucu belirlenmekte olup NACA 4415 aerofoili için belirlenen kaldırma ve sürüklenme katsayıları Şekil 4.25’de verilmiştir. Rüzgâr türbinlerinde kaldırma katsayısının (C_L) olabildiğince yüksek, sürüklenme katsayısının (C_D) olabildiğince düşük olması istenmektedir. Kaldırma katsayısının sürüklenme katsayısına oranı olan (ϵ) olarak bilinmekte olup bu parametrenin büyük olması, kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetinden daha büyük olduğu anlamına gelmektedir (Manwell, 2002; Şenel, 2012).



Şekil 4.25. NACA 4415 aerofoilin farklı hücum açılarındaki C_L ve C_D katsayıları (URL-11)

4.4.1.3. Rüzgâr Türbinlerindeki Kayıplar

Rüzgâr türbinlerinde rüzgâr gücü elektrik ya da mekanik enerjiye dönüştürülürken aerodinamik kayıplar, mekanik kayıplar ve elektriksel kayıplar gibi çeşitli kayıplar oluşmakta olup bu kayıplar aşağıda özetlenmiştir.

Rüzgâr türbinlerinde kanat profil kayıpları, kanat uç kayıpları ve girdap kayıpları gibi aerodinamik kayıplar oluşmaktadır. Bu kayıplardan **kanat profil kayıpları**, kanadın aerodinamik şekli nedeniyle oluşan profilin sürüklenmesinden meydana gelen kayıplar olup bu kayıplar;

$$\eta_{profil} = 1 - \frac{\lambda}{\varepsilon} \quad (4.15)$$

denkleminde yararlanılarak belirlenmektedir. Bu kayıpların azaltılması, kanattan daha fazla güç elde edilebilmesi amacıyla farklı aerofoil tasarımları yapılmıştır (Şentürk, 2007).

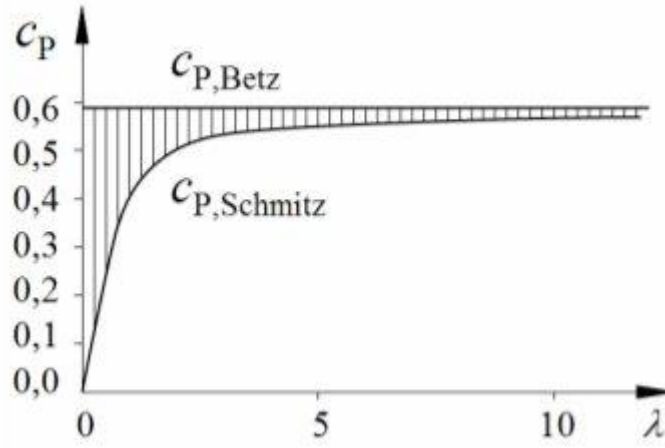
Rüzgâr türbinlerinde kanat ucunda meydana gelen hava hareketi nedeniyle girdap oluşarak kanat ucunda aerodinamik kayıplara sebep olmaktadır. Bu kayıplar **kanat ucu kayıpları** olarak bilinmekte olup,

$$\eta_{uç} = 1 - \frac{1.84}{B\lambda} \quad (4.16)$$

denkleminde yararlanılarak belirlenmektedir (Şentürk, 2007). Kanat ucu kayıpları kanat sayısı ve uç-hız oranı bağlıdır. Kanat sayısı ve uç-hız oranı arttıkça kanat uç kayıpları da artmaktadır. Rüzgâr türbinlerinde kanat uç kayıplarının azaltılması amacıyla çeşitli kanat uç geometrileri geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar yürütülmektedir.

Rüzgâr türbinlerinde, Lineer Momentum Teorisi'ne göre rüzgâr hızının kanat düzlemi öncesi ve sonrasında değişmediği kabul edilmektedir. Fakat Dönen Disk Modeli için Momentum Teorisi'ne göre ise kanada çarpan hava kütlesi, kanat sonrasında doğrultusunu değiştirerek girdap oluşturmaktadır. Bu girdap nedeniyle oluşan kayıplar (**Girdap Kayıpları**)

ise Schmitz tarafından verilen Şekil 4.26'daki $C_{P,Schmitz}$ - λ değişim grafiğiyle belirlenmektedir (Şentürk, 2007).



Şekil 4.26. $C_{P,Schmitz}$ - λ değişimi (Şenel, 2012)

$C_{P,Schmitz}$ - λ eğrisinden veriler alınıp en küçük kareler metoduna göre elde edilen $C_{P,Schmitz}$ eşitliği;

$$C_{P,Schmitz} = 0.00296\lambda^2 - 0.005305\lambda^1 + 0.28834\lambda + 0.1022 \quad (4.17)$$

şeklindedir. Bu denklemde kolerasyon katsayısı (r) 0,97 olarak belirlenmiş olup rüzgâr türbinlerinde oluşan aerodinamik kayıplar dikkate alınarak türbinin güç katsayısı (C_p);

$$C_p = C_{P,Schmitz} \times \eta_{uç} \times \eta_{profil} \quad (4.18)$$

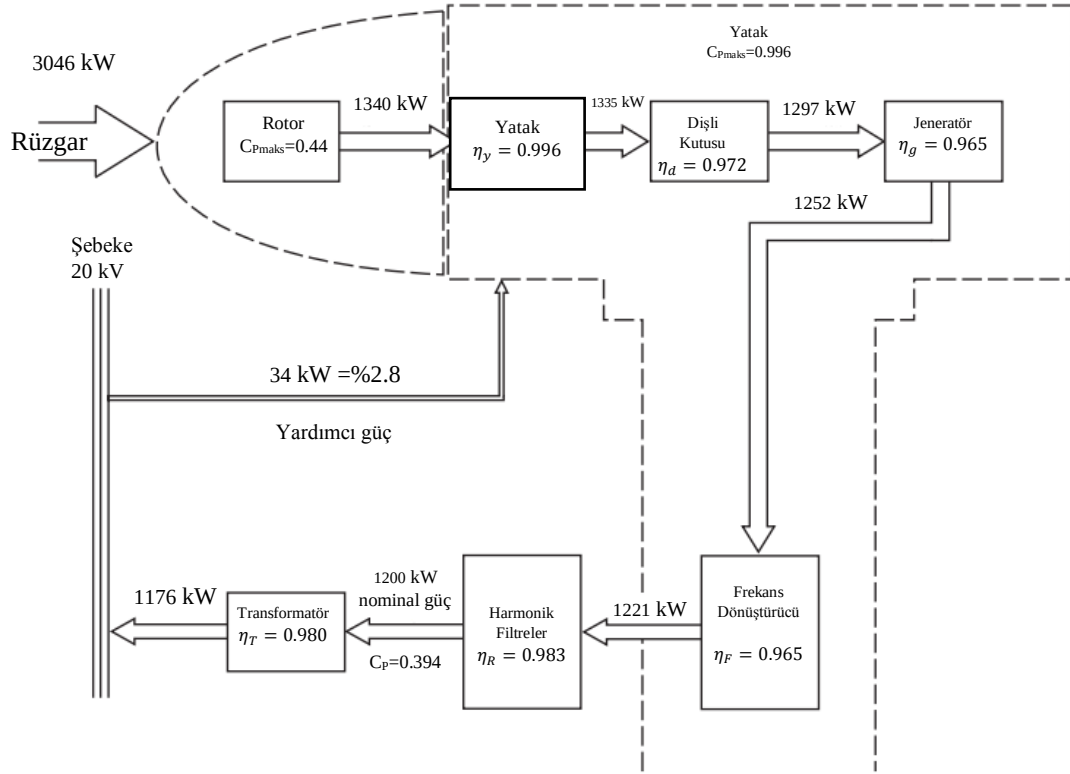
$$C_p = (0.00296\lambda^2 - 0.005305\lambda^1 + 0.28834\lambda + 0.1022) \times \left(1 - \frac{1.84}{B\lambda}\right) \times 1 - \frac{\lambda}{\varepsilon} \quad (4.19)$$

şeklindedir (Şenel, 2012).

Rüzgâr türbinlerinde ayrıca mekanik ve elektriksel elemanlarda da çeşitli kayıplar meydana gelmektedir. Bu kayıplar;

- Ana şaftın sızdırmazlık elemanları ve yataklarındaki sürtünme kayıpları,
- Dişli kutusundaki kayıplar,
- Elektrik jeneratörü ve inverterdeki kayıplar
- Üretilen enerjinin şebekeye iletimindeki kayıplar,

şeklindedir (Şenel, 2012). 1.2 MW'lık örnek bir rüzgâr türbininin mekanik ve elektriksel elemanlarındaki kayıplar Şekil 4.27'de verilmiştir.



Şekil 4.27. 1.2 MW nominal güçteki bir rüzgâr türbinindeki kayıplar (Şenel, 2012)

Şekildeki rüzgâr türbinindeki mekanik bileşenlerin kayıpları değerlendirildiğinde, 3046 kW'lık rüzgâr gücünün %44'ünün kanatlar tarafından alındığı, alınan gücün % 0.4'lük kısmının yataklarda kaybedilerek dişli kutusuna aktarıldığı, dişli kutusuna aktarılan gücün ise % 0.38'lük kısmının dişli kutusunda kaybedilerek jeneratöre aktarıldığı görülmektedir. Bu türbinde ayrıca kanatlar tarafından alınan gücün 1340 kW, jeneratöre aktarılan gücün ise 1200 kW olduğu kanatlar ile jeneratör arasındaki mekanik ve elektriksel elemanlarda 140 kW'lık bir güç kaybının oluştuğu görülmektedir (Şenel, 2012).

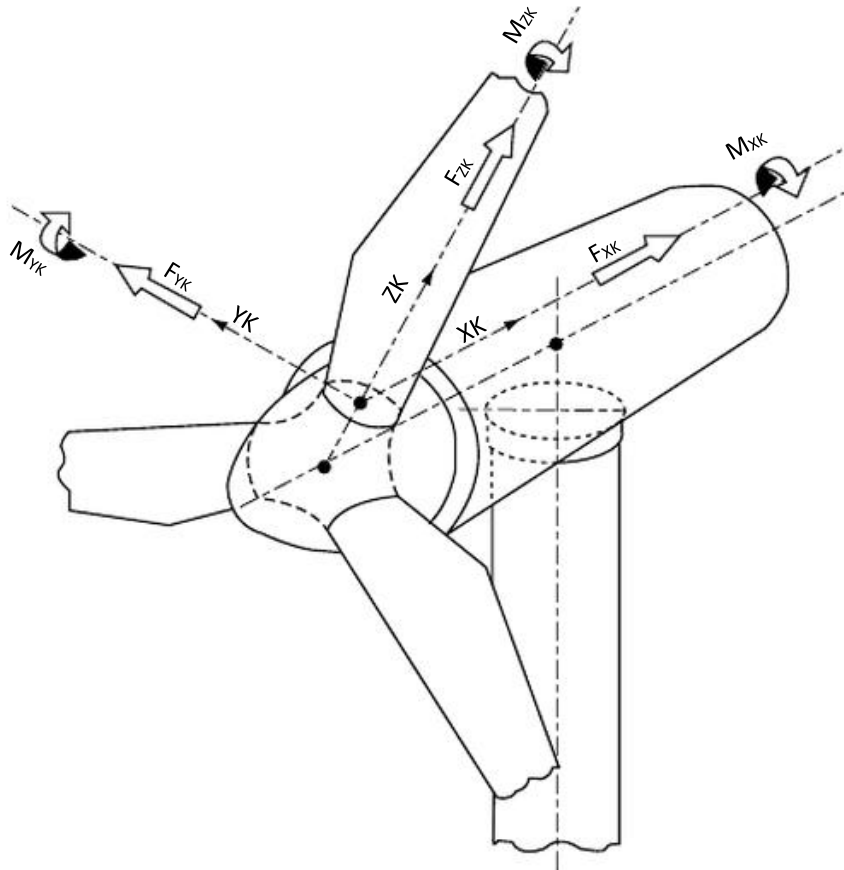
4.5 Rüzgâr Türbin Kanadının Yapısal Tasarımı

Rüzgâr türbin kanadı tasarımında, kanadın yüksek rüzgâr hızlarındaki dayanımı da önemlidir. Kanada rüzgâr kaynaklı yükler, kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan yükler ve kanadın hareketinden kaynaklanan yükler etki etmektedir. Bu kuvvetler normal ve kayma gerilmeleri oluşturmakta, bu gerilmelerin kullanılan malzemeye özgü mukavemet sınırını aşması durumunda da yapıda hasar oluşmaktadır. Bu kısımda kanada etki eden yükler ve kanadın zorlanma biçimleri değerlendirilmektedir.

4.5.1 Rüzgâr türbin kanadına etki eden yükler

Rüzgâr türbin kanatlarına, rüzgârın neden olduğu aerodinamik yükler, kanadın ağırlığından kaynaklanan yerçekimi yükleri, kanadın hareketinden kaynaklanan santrifüj kuvvetleri, kanadın ve türbinin yön değiştirmesinden kaynaklanan jiroskop kuvvetleri etki etmektedir. Rüzgâr türbinleri bu kuvvetlerin etkileri yanında aşırı soğuk veya sıcak, güneş radyasyonu, erozyon ve deprem gibi etkilere de maruz kalmaktadır. Rüzgâr türbinleri bu yükler altında öngörülen kullanım ömründe sağlıklı bir şekilde çalışabilmelidir. Bu nedenle kanat tasarımı yapılırken kanadın kullanım ömrü boyunca maruz kalabileceği yüklerin değerlendirilmesi gerekmektedir. Kanada etki eden kuvvetleri ve kanadın zorlanma hallerini değerlendirebilmek için **kanat koordinat sistemi** tanımlanmıştır (Şekil 4.28).

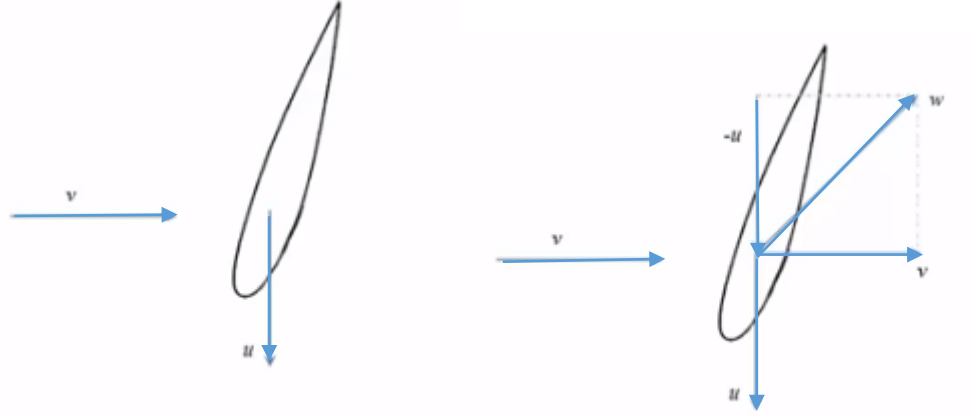
Kanat koordinat sisteminde XK, YK ve ZK koordinat düzlemlerini, F_{XK} , F_{YK} ve F_{ZK} sırasıyla XK, YK ve ZK yönlerindeki kuvvetleri ve M_{XK} , M_{YK} ve M_{ZK} ise XK, YK ve ZK yönlerindeki momentleri temsil etmektedir. Kanada etki eden yüklerden; aerodinamik yükler **a**, yerçekimi yükleri **y**, atalet (santrifüj) yükleri ise **s** sembolüyle gösterilmiş olup bu yükler aşağıda özetlenmiştir.



Şekil 4.28. Kanat koordinat sistemi (Liu. ve ark, 2010)

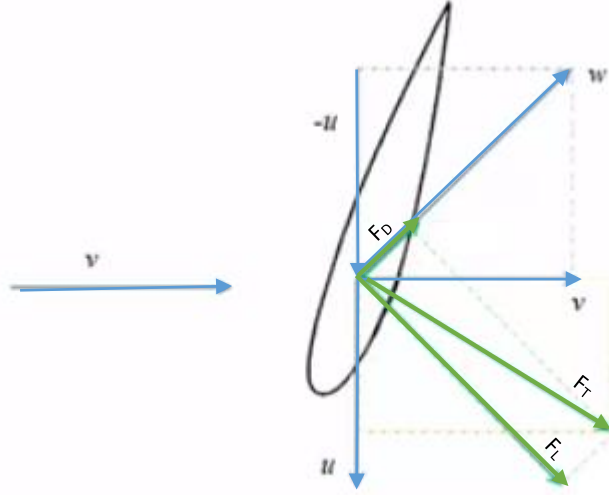
4.5.1.1. Aerodinamik Yükler

Rüzgâr türbin kanadına etki eden aerodinamik yükler gelen rüzgâr kaynaklıdır. Bu yükleri belirlemek için kanadı oluşturan aerofoiler dikkate alınmaktadır. u hızıyla aşağı yönlü hareket eden bir aerofoile v hızlı bir rüzgâr etki ettiğinde aerofoilde w izafi hızı oluşmaktadır (Şekil 4.29).



Şekil 4.29. Kanatta meydana gelen hızlar (Manwell, 2002)

Modern yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin kanat kesitleri, akış sırasında kanat üzerinde meydana gelen yüklerden optimum gücün elde edilmesi amacıyla geliştirilmiş olan özel profillerden (aerofoil) oluşmaktadır. Bu profiller kanadın üst ve alt yüzeyi arasında bir basınç oluşturarak yüksek basınç tarafından alçak basınç yönüne doğru bir kaldırma kuvveti (F_L) oluşumunu sağlamaktadır. Bu profillerde ayrıca izafi hız yönünde bir sürüklenme kuvveti (F_D) de oluşmaktadır. Bu kuvvet kanat profilini izafi hız yönünde itmeye çalışmaktadır. Bu kuvvetin değeri hiçbir zaman sıfır olmamakta olup bu kuvvetin azaltılması amacıyla farklı aerofoiller geliştirilmiştir (DNV, 2002). Şekil 4.30'da aerofoile etki eden kaldırma (F_L) ve sürüklenme kuvveti (F_D) ile bu kuvvetlerin bileşkesi (F_T) gösterilmiştir.



Şekil 4.30. Aerofoile etki eden kuvvetler (DNV, 2002).

Bu iki kuvvetin büyüklüğü aşağıdaki bağıntılardan yararlanılarak belirlenmektedir (DNV,2002).

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho c W^2 \quad (4.20)$$

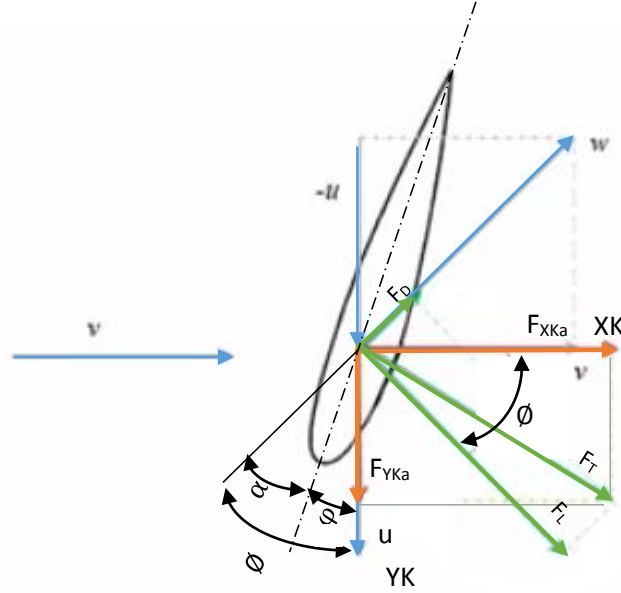
$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho c W^2 \quad (4.21)$$

Burada C_L kaldırma kuvveti katsayısı, C_D sürüklenme kuvveti katsayısı, ρ havanın yoğunluğu, c aerofoil profil hattı uzunluğu, w ise izafi rüzgâr hızıdır. C_L ve C_D katsayıları farklı Reynolds sayılarında ve farklı hücum açıları için yapılan deneyler sonucu belirlenmektedir (DNV, 2002).

Kanada etki eden toplam aerodinamik kuvvet, kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvvetinin bileşkesi alınarak belirlenmektedir.

$$F_T = \sqrt{F_L^2 + F_D^2} \quad (4.22)$$

Toplam aerodinamik kuvvet, kanat koordinat sisteminde normal kuvvet (F_{XKa}) ve teğetsel kuvvet (F_{YKa}) olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Bu kuvvetler Şekil 4.31’de gösterilmiştir.



Şekil 4.31. Kanat koordinat sisteminde kanada etki eden normal ve teğetsel kuvvetler

Kanat koordinat sisteminde kanada etki eden normal kuvvet (F_{XKa}) ve teğetsel kuvvet (F_{YKa}) aşağıdaki bağıntılardan yararlanılarak belirlenmektedir.

$$F_{XKa} = \frac{1}{2} \rho c W^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) \quad (4.23)$$

$$F_{YKa} = \frac{1}{2} \rho c W^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) \quad (4.24)$$

Burada ϕ kanada etki eden izafi hızın (w) YK kanat koordinatıyla yaptığı açı olup hücum açısı (α) ve bağlama açısının (φ) toplamıdır (Liu ve ark., 2010).

4.5.1.2. Yerçekimi Yükleri

Yerçekimi yükleri, rüzgâr türbini kanadının ağırlığından kaynaklanan yüklerdir. Bu yükler türbin boyutlarının karesi ile orantılı olarak değişmektedir. Yerçekimi yükleri rotor çapının 20 m’den küçük olduğu küçük rüzgâr türbinlerinde dikkate alınmamakta olup rotor çapının 70 m’den büyük olduğu rüzgâr türbinlerinde kritik seviyeye ulaşmaktadır. Rüzgâr türbinlerine etki eden yerçekimi yüklerinin kanat koordinat sistemindeki bileşenleri aşağıdaki bağıntılardan yararlanılarak belirlenmektedir.

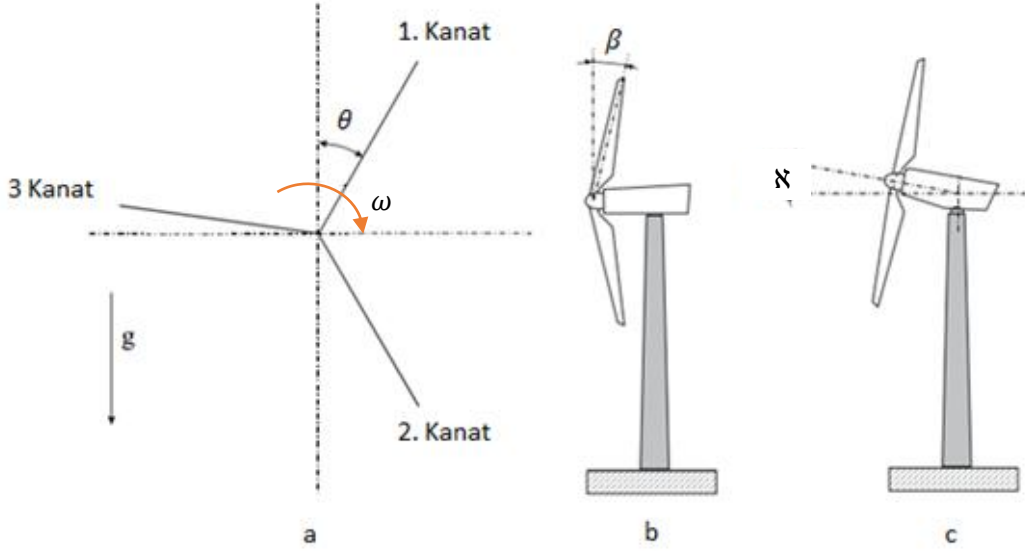
$$F_{XKy} = \bar{m} g \cos \theta \sin \beta \cos \aleph \quad (4.25)$$

$$F_{YKy} = \bar{m} g \sin \theta \cos \aleph \quad (4.26)$$

$$F_{ZKy} = \bar{m} g \cos \theta \cos \beta \cos \aleph \quad (4.27)$$

Burada $\bar{m}$ birim kanat kesit kütlesi, g yerçekimi ivmesi, θ kanat azimuth açısı, β rotor koniklik açısı, $\aleph$ ise kanat eğim açısıdır (Liu ve ark., 2010). Birim kanat kesit kütlesi ($\bar{m}$) kanadın ağırlığı kanat uzunluğuna oranlanarak belirlenmekte olup kanadın et kalınlığının bir ölçüsü

olarak değerlendirilmektedir. Yatay eksenli üç kanatlı rüzgar türbinlerinde birim kanat kesit kütlesi kanat bağlantı noktasından kanat ucuna doğru azalmaktadır. Kanat azimuth açısı, kanadın saat yönünde dönüşü sırasında kanat ile kanadın düşey konumu arasında kalan açı olup 0° kanat azimuth açısında kanat ucu yukarı yönü göstermektedir (Şekil 4.32a). Koniklik açısı, kanat ile düşey düzlem arasındaki açıdır (Şekil 4.32b). Eğim açısı ise rüzgâr türbininin kanat ve gövde kısımlarının yatay düzlemle yaptığı açıdır (Şekil 4.32c) (URL-9).



Şekil 4.32. Kanat azimuth, koniklik ve eğim açıları (URL-9)

4.5.1.3. Santrifüj Yükleri

Kanadın kendi eksenini etrafındaki dönme hareketi nedeniyle oluşan atalet yükleri, kanat koordinat sisteminde ZK ekseninde ve XK eksenlerinde F_{ZKs} ve F_{XKs} bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu bileşenlerden F_{ZKs} santrifüj çekme kuvveti, F_{XKs} ise santrifüj kesme kuvveti olup bu bileşenler aşağıdaki bağıntılardan yararlanarak belirlenmektedir (Schubel ve Crossley, 2012).

$$F_{ZKs} = \bar{m}\omega^2 r \cos \beta \quad (4.28)$$

$$F_{XKs} = \bar{m}\omega^2 r \sin \beta \quad (4.29)$$

Burada $\bar{m}$ birim kanat kesit kütlesi, ω kanadın açısal hızı, r kanat kesitinin kanat kök bölgesine olan uzaklığı, β ise koniklik açısıdır.

Kanada etki eden atalet kuvvetleri değerlendirildiğinde, bu kuvvetlerin kanadın açısal hızıyla orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Rüzgâr türbin kanatları helikopter kanatlarından daha düşük açısal hızlarla döndüğünden atalet kuvvetleri de düşük seviyededir. Bu nedenle küçük rüzgâr türbin kanatları için atalet kuvvetleri ihmal edilebilmektedir. Ancak günümüzde rüzgâr türbin kanatlarının boyutları büyüdüğünden kanada etki eden atalet yükleri

de kanat tasarımı için önemli hale gelmiştir. Bu yüzden kanat tasarımında atalet yüklerinin de dikkate alınması gerekmektedir (Hau, 2006).

Kanatta ayrıca kanadın dönme açısındaki değişim (pitch mekanizmasının hareketi) ve yönelme açısındaki değişim (yaw mekanizmasının hareketi) nedeniyle jiroskop kuvvetleri oluşmaktadır. Bu kuvvetlerin büyüklüğü kanadın dönme açısı ve yönelme açısındaki değişim yavaşlatılarak (saniyede 0.5°) azaltılabilmektedir (Hau, 2006).

Rüzgâr türbin kanatları bu kuvvetlerin yanında türbinin işletme döneminde meydana gelen hatalar nedeniyle oluşabilecek kuvvetlere de maruz kalabilir. Ancak bu kuvvetler diğerlerinin yanında çok küçük olduğundan genellikle ihmal edilmektedir (Hau, 2006).

Kanat koordinat sisteminde kanada etki eden toplam yükler, XK, YK ve ZK eksenlerine etki eden yüklerin bileşkesi alınarak belirlenmekte olup bu eksenlerde kanada etki eden toplam yükler aşağıdaki bağlantılardan yararlanılarak belirlenmektedir (Liu ve ark., 2010).

$$F_{XK} = F_{XKa} + F_{XKy} + F_{XKs} \quad (4.30)$$

$$F_{YK} = F_{YKa} + F_{YKy} \quad (4.31)$$

$$F_{ZK} = F_{ZKy} + F_{ZKs} \quad (4.32)$$

Kanat koordinat sisteminde rüzgar türbin kanadına, XK yönünde aerodinamik, yerçekimi ve santrifüj yükler, YK yönünde aerodinamik ve yerçekimi yükleri, ZK yönünde ise yerçekimi ve santrifüj yükler etki etmektedir.

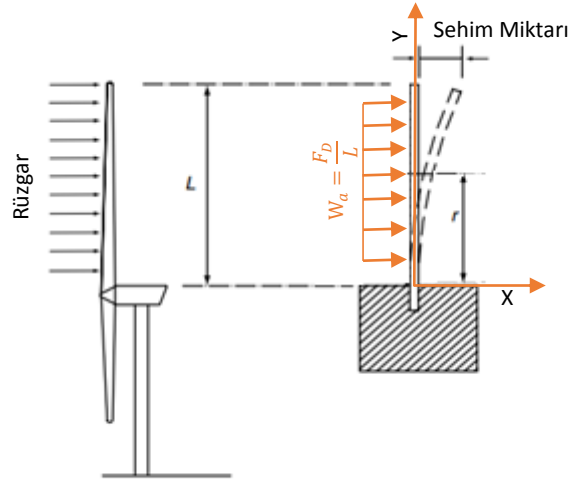
Rüzgar türbin kanatları yukarıda bahsedilen kuvvet etkileri nedeniyle farklı zorlanmalara maruz kalmaktadır. Aşağıda bu zorlanma halleri özetlenmiştir.

4.5.2 Rüzgar türbin kanadının zorlanma halleri ve gerilmeler

Rüzgar türbin kanatları aerodinamik yükler ve yerçekimi yükleri nedeniyle eğilmeye zorlanmakta olup bu zorlanma halleri aşağıda izah edilmiştir.

4.5.2.1 Aerodinamik yükler nedeniyle oluşan eğilme (Flapwise Bending)

Rüzgar türbin kanatları, kanadın hücum tarafına etki eden aerodinamik yükler nedeniyle bir eğilme momentine maruz kalmaktadır. Bu moment nedeniyle kanadın eğilme halinin değerlendirilmesi için kanat bir ankastre kiriş olarak kabul edilmekte olup bu eğilme hali ve eğilme halinin değerlendirilmesi için kullanılan yapısal model Şekil 4.33’de verilmiştir.



Şekil 4.33. Aerodinamik yükler nedeniyle kanadın eğilmesi (Schubel ve Crossley, 2012)

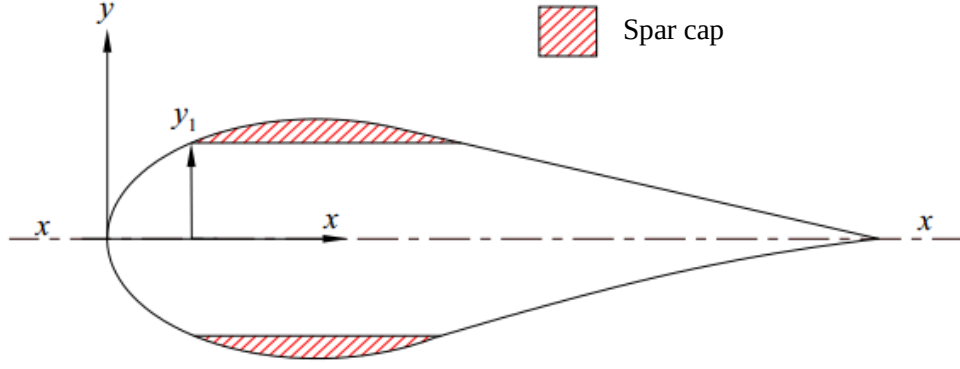
Kanat aerodinamik sürüklenme kuvveti (F_D) etkisiyle eğilmeye zorlanmaktadır. Bu kuvvet kanadın bütün yüzeyine aynı oranda etki ettiğinden kanadı eğmeye zorlayan kuvvet, sürüklenme kuvvetinin birim uzunluğuna tekabül eden yayılı yük olarak dikkate alınmaktadır

Kanadın herhangi bir noktasındaki eğilme momenti değişimi ise;

$$M_{eğ} = -\frac{1}{2} W_a (L - r)^2 \quad (4.33)$$

denkleminde yararlanılarak belirlenmektedir (Schubel ve Crossley, 2012). Burada eğilme momentinin negatif olması eğilmenin seçilen koordinat sisteminin tersi yönünde oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca kanatta en çok sehimin uç noktasında oluşmaktadır. Başka bir ifadeyle kanat ucu eğilme momentine karşı daha hassas olmaktadır.

Kanadın herhangi bir noktasındaki aerodinamik yüklerin neden olduğu eğilmenin belirlenmesi amacıyla kanadın o noktadaki kesiti dikkate alınmalıdır. Rüzgar türbinlerinde kanada en fazla aerodinamik yük kanat yatay konumdayken etki etmektedir (Şekil 4.34). Bu nedenle kanadın aerodinamik yükler nedeniyle eğilmesinde yatay pozisyonda konumlanmış kanat kesiti (aerofoil) dikkate alınmıştır. Burada renkli olarak taranmış kısımlar iç destek parçasının yatay bileşenidir (Spar cap).



Şekil 4.34. Kanadın kesit görüntüsü (Schubel ve Crossley, 2012)

Seçilen kanat kesitinde eğilme gerilmesi temel kiriş eğilme bağıntısından yararlanılarak belirlenmiş olup;

$$\sigma_{eğ} = \frac{M_{eğ} y}{I_{xx}} = \frac{E y}{\rho} \quad (4.34)$$

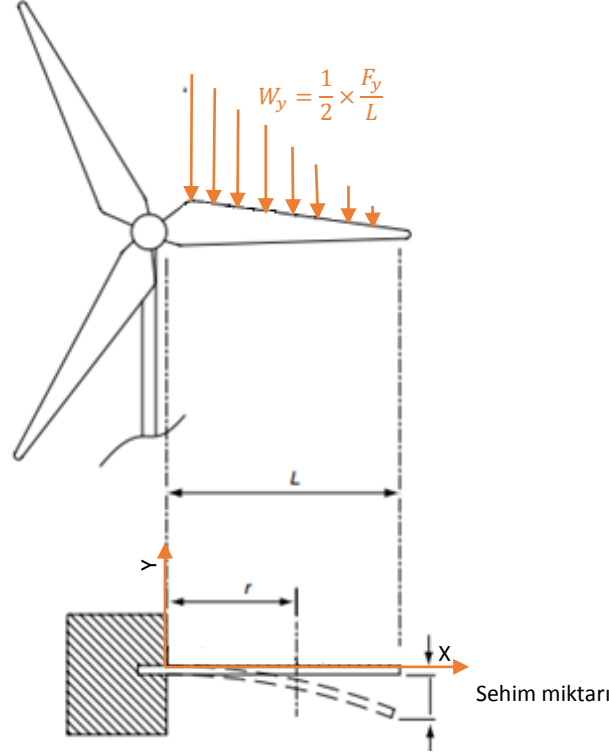
şeklindedir. Burada y xx tarafsız eksenine olan mesafe, y_1 spar cap'ın tarafsız eksene olan uzaklığı, E elastisite modülü, ρ eğilme momentinin neden olduğu deformasyonun bir ölçüsü olan eğrilik yarıçapı, I_{xx} ise kesit atalet momentidir. Kesit atalet momenti,

$$I_{xx} = \iint (y - y_1)^2 dx dy \quad (4.35)$$

denkleminde yararlanılarak belirlenmektedir (Schubel ve Crossley, 2012).

4.5.2.2 Yerçekimi yükleri nedeniyle oluşan eğilme (Edgewise Bending)

Rüzgar türbin kanatları, kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan yerçekimi yükleri nedeniyle eğilme momentine maruz kalmakta olup bu eğilme halinin değerlendirilebilmesi amacıyla kanat bir ankastre kiriş olarak kabul edilmekte olup eğilme halinin değerlendirilmesi için kullanılan yapısal model Şekil 4.35'de verilmiştir.



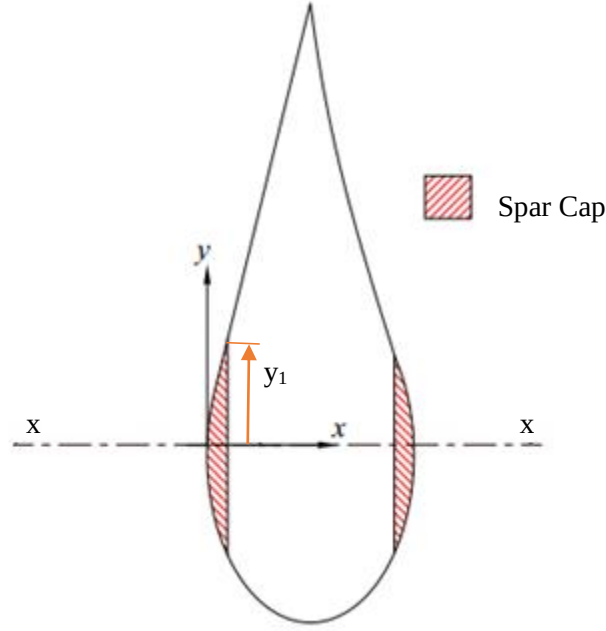
Şekil 4.35. Yerçekimi yükleri nedeniyle kanadın eğilmesi (Schubel ve Crossley, 2012)

Kanadın ağırlığı kanat bağlantı noktasından kanat ucuna doğru azaldığından kanat ağırlığı üçgen yayılı yük (W_y) olarak belirlenmiş olup kanadın kendi ağırlığı nedeniyle kanatta oluşan eğilme momenti değişimi;

$$M_{eğ} = -\frac{1}{2} W_y (L - r)^2 \quad (4.36)$$

şeklindedir (Schubel ve Crossley, 2012). Burada eğilme momentinin negatif olması eğilmenin seçilen koordinat sisteminin tersi yönünde oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca kanatta en fazla sehim uç noktasında oluşmaktadır. Başka bir ifadeyle kanat ucu eğilme momentine karşı daha hassas olmaktadır.

Kanadın herhangi bir noktasındaki yerçekimi yüklerinin neden olduğu eğilmenin belirlenebilmesi amacıyla o noktadaki kanat kesiti dikkate alınmalıdır. Rüzgar türbinleri en fazla yerçekimi yüküne kanat düşey konumdayken maruz kaldığından burada düşey konumdaki aerofoil dikkate alınmıştır (Şekil 4.36). Şekilde renkli olarak taranmış kısımlar iç destek parçasının düşey bileşenidir (Spar cap).



Şekil 4.36. Kanadın kesit görüntüsü (Schubel ve Crossley, 2012)

Kanatta yerçekimi yükleri nedeniyle oluşan eğilme gerilmesini belirlemek için aerodinamik yükler nedeniyle oluşan eğilme gerilmesinin belirlenmesinde kullanılan denklemlerden (Denklem 4.36 ve 4.37) yararlanılmaktadır.

Kanadın yerçekimi yükleri ve aerodinamik yükler nedeniyle eğilmesi arasındaki farklılık spar cap'ın tarafsız eksene olan uzaklığından (y_1) kaynaklanmaktadır. Aerodinamik yüklerden kaynaklı eğilmede y_1 spar cap'ın tarafsız eksene olan uzaklığını belirtirken, yerçekimi yüklerinden kaynaklı eğilmede y_1 spar cap'ın genişliğini belirtmektedir. Aerodinamik yüklerden kaynaklanan eğilmede $y-y_1$ değerindeki artış I_{xx} kesit atalet momentini arttırmakta (Denklem 4.37) dolayısıyla kanadın eğilme dayanımını (Denklem 4.36) yükseltmektedir. Ancak yerçekimi yüklerinden kaynaklanan eğilmede $y-y_1$ değeri azaldığından, aerodinamik yüklerdeki eğilme durumunun aksine kanadın eğilme dayanımını azaltmaktadır.

Rüzgar türbin kanatlarının bilgisayar destekli yük analizinde sonlu elemanlar metodunun (SEM) kullanıldığı bilgisayar destekli mühendislik (CAE) yazılımları kullanılmaktadır. Bu çalışmada kanada etki eden yüklerin analizinde **ANSYS** yazılımından yararlanılacaktır.

4.6 Tasarım Optimizasyonu

Optimizasyon bir problemin en iyi çözümünü bulma işlemi olarak tanımlanmaktadır. Bir problemin optimizasyonu için bazı tanımlamalar yapılmalıdır (amaç fonksiyonu, tasarım alanı,

tasarım değişkenleri, kısıtlar vb.). Tasarım sonucu elde edilmek istenen hedefe ulaşmada kullanılan fonksiyona **amaç fonksiyonu**, optimizasyon yapılacak bölge ya da geometriye **tasarım alanı**, tasarımı oluşturan fonksiyonun değişkenlerine **tasarım değişkenleri**, tasarım probleminde çözümün sağlanması gereken koşullar ise **kısıtlar** olarak tanımlanmaktadır (Peter ve Christensen, 2008)

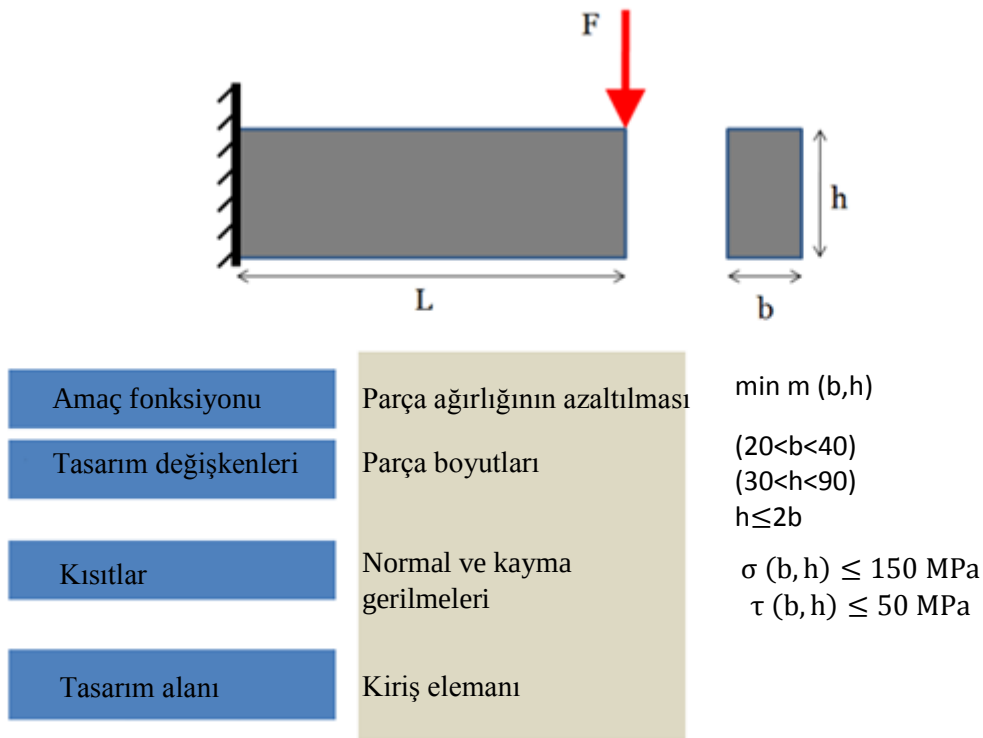
Optimizasyonun mühendislik anlamı ise verilen koşullar altında en iyi sonucun elde edilmesi işlemidir. Mühendislik sistemlerinde çeşitli optimizasyon yaklaşımlarından yararlanılmaktadır. Bu yaklaşımlardan birisi olan tasarım optimizasyonu aşağıda özetlenmiştir.

Tasarım optimizasyonu: Gerilme, frekans, sıcaklık gibi istenilen bütün şartları sağlayan, ağırlık, maliyet veya istenilen başka kriterleri minimuma indiren tasarımın elde edilmesi işlemidir.

Bir tasarım optimizasyonu probleminin modellenmesi üç aşamadan oluşmaktadır. Bunlar;

- 1- Minimize veya maksimize edilecek bir kriter(amaç fonksiyonu),
- 2- Amacı gerçekleştirmede kullanılacak parametreler(tasarım değişkenleri),
- 3- Tasarımın sağlanması gereken şartlar (kısıtlar)

şeklinde olup bu parametrelere örnek bir eleman Şekil 4.37’de gösterilmiştir (Kurtaran, 2005).



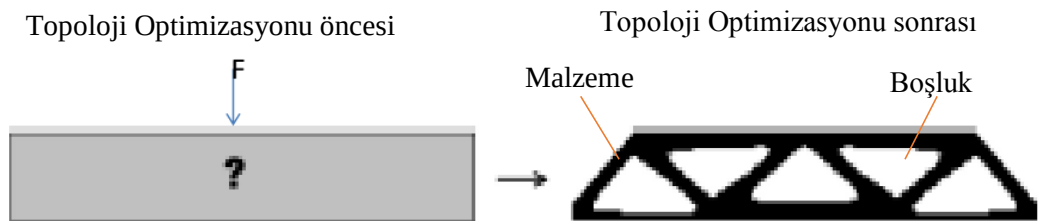
Şekil 4.37. Bir ankastre kirişin tasarım optimizasyonu (URL-14)

Şekilde görüldüğü gibi boyutları $b \times h \times L$ olan bir kiriş elemanı F kuvveti etkisiyle eğilmeye zorlanmaktadır. Bu kirişin ağırlığının azaltılması ($\min m(b,h)$) istenmektedir. Bu amaçla kirişin tasarım optimizasyonunda; kirişin ağırlığının azaltılması amaç fonksiyonu, kirişi oluşturan elemanların bulunduğu alan tasarım alanı, kirişin kayma ve akma gerilmeleri kısıtlar, kirişin boyutları ise tasarım değişkenleri olarak belirlenmiştir. Burada kirişin b uzunluğunun 20 ile 40, h uzunluğunun 30 ile 90 arasında olması istenmekte olup h 'ın b 'nin iki katında küçük eşit olması, ayrıca kirişin normal gerilmesinin 150 MPa, kayma gerilmesinin 50 MPa'dan düşük olması istenmektedir.

Boyut optimizasyonu, şekil optimizasyonu ve topoloji optimizasyonu olmak üzere üç tasarım optimizasyonu metodu bulunmakta olup bu metotlar aşağıda özetlenmiştir.

4.6.1 Topoloji optimizasyonu

Matematiğin anabilim dallarından birisi olan topoloji Yunanca'da yer, yüzey veya uzay anlamına gelen topos ve bilim anlamına gelen logos sözcüklerinden türetilmiştir olup uzaylar veya yüzeyler bilimi anlamına gelmektedir. Topoloji optimizasyonu ise bir yapıda belirlenen kısıtlar altında amaç fonksiyonunu sağlayan en uygun malzeme dağılımının bulunmasıdır. Topoloji optimizasyonunda tasarımın iyileştirilmesi için belirli bir hacim (tasarım alanı) içinde bulunan malzeme dağılımı ile boşluklar belirlenmektedir. Bu yöntemde tasarım değişkenleri, yapıyı oluşturan elemanlardır. Bu yöntem bir yapının ağırlığının azaltılması ya da yapının doğal frekansının değiştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır (Howard, 2008). Şekil 4.38'de bir kirişin topoloji optimizasyonu gösterilmiştir.

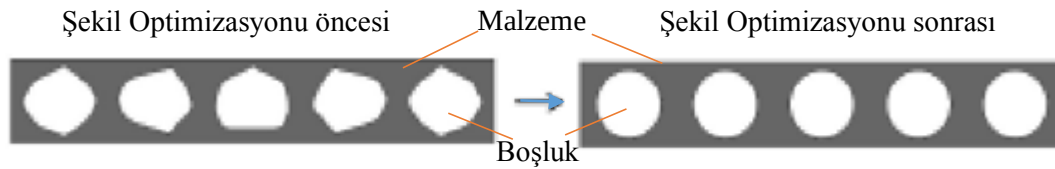


Şekil 4.38. Bir kirişin topoloji optimizasyonu (URL-14)

Şekildeki F yüküne maruz kalan bir kirişin topoloji optimizasyonunda parçanın optimum malzeme dağılımının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla soldaki kirişin topoloji optimizasyonu sonucu sağdaki yapı elde edilmiştir. Topoloji optimizasyonu sonrası belirlenen yapıda malzeme bulunması gereken kısımlar ile boşluklar şekilde gösterilmiştir.

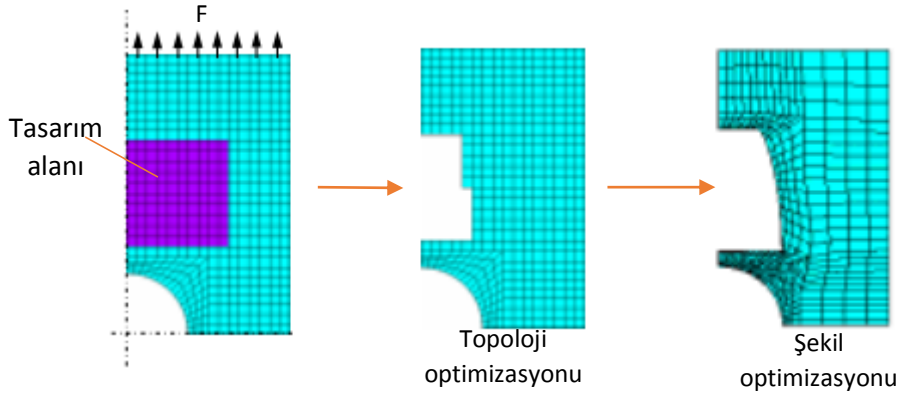
4.6.2 Şekil optimizasyonu

Şekil optimizasyonu ile yapının topolojisi sabit tutularak, yapının geometrisinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Yapıdaki boşluklar (delik çapı), köşe yuvarlatmalar gibi parametreler şekil optimizasyonu ile belirlenmektedir. Bu yöntemde tasarım değişkenleri, tasarımın şeklini belirlemektedir. Şekil 4.39’da bir kirişe uygulanan şekil optimizasyonu gösterilmiştir. Burada yapının topoloji optimizasyonu belirlenen şekli solda, şekil optimizasyonu sonraki belirlenen şekli sağda verilmiştir



Şekil 4.39. Bir kirişin şekil optimizasyonu (URL-14)

Şekilde kirişin şekil optimizasyonu ile yapının son hali belirlenmiştir. Şekil optimizasyonu, topoloji optimizasyonunun sınırlanmış bir halidir. Bu yöntemde önceden belirlenmiş bir topolojideki yapının belirlenen bir amaca uygun geometrisi belirlenmektedir. Şekil 4.40’da bir yapının topoloji optimizasyonu ve şekil optimizasyonu gösterilmiştir.



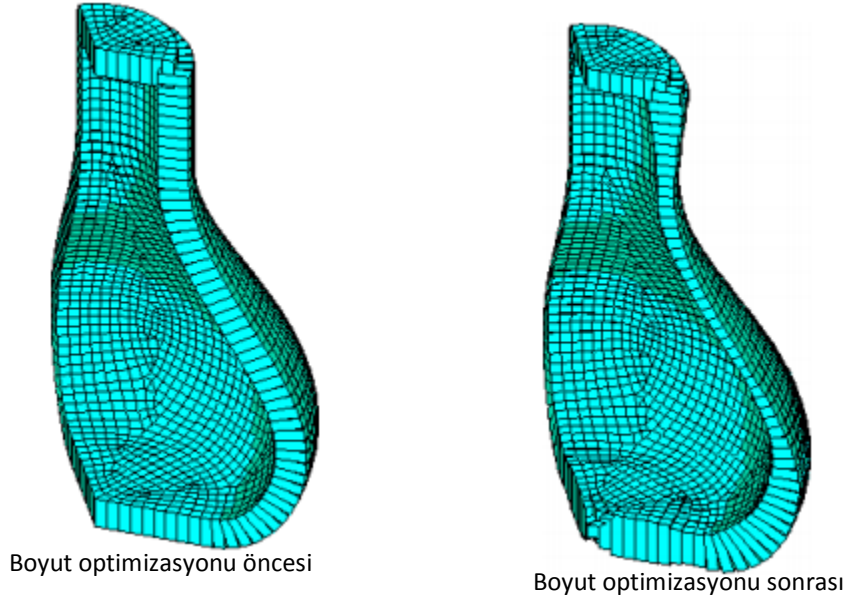
Şekil 4.40. Bir yapının topoloji ve şekil optimizasyonu (Bakhtary ve ark., 1996)

Şekilde F yüküne maruz kalan bir yapıda belirlenen tasarım alanına ilk olarak topoloji optimizasyonu sonra ise şekil optimizasyonu uygulanarak yapının belirlenen tasarım alanının optimum malzeme dağılımı belirlenmiştir. Yapının topoloji optimizasyonu ile belirlenen tasarım alanındaki malzeme bulunması gereken kısımlar ile boşluklar belirlenmiş, şekil optimizasyonu ile ise bu belirlenen yapının formu iyileştirilmiştir.

4.6.3 Boyut (hacim) optimizasyonu

Boyut optimizasyonu tasarım optimizasyonu türleri arasında en basit algoritmaya sahip olanıdır. Bu yöntem ile tasarıma ait şekil ve topolojide değişiklik yapılmaksızın sadece yapının kalınlık, genişlik, yükseklik, atalet momenti gibi tasarım değişkenlerinin belirlenmesi için

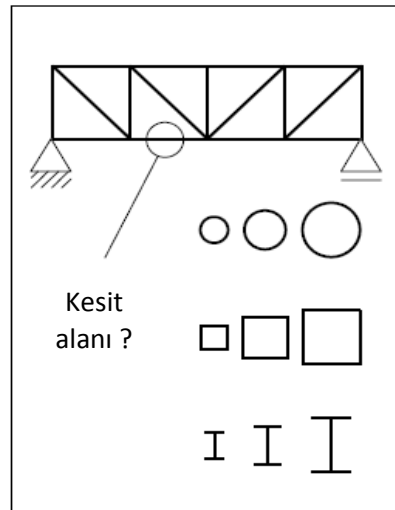
kullanılmaktadır (Lee, 1999; Lee ve ark, 2007). Bir şişenin boyut optimizasyonu Şekil 4.41’de verilmiştir.



Şekil 4.41. Bir şişenin boyut optimizasyonu (Bakhtiary ve ark. 1996)

Şekildeki şişenin boyut optimizasyonunu öncesi şişe bütün yüzeylerindeki et kalınlığı aynı olarak verilmiştir. Boyut optimizasyonu sonraki ise şişenin farklı noktalarında farklı et kalınlıkları elde edilmiştir. Bu çalışma boyut optimizasyonunun parçaların et kalınlıklarının belirlenmesinde kullanılabileceğini göstermektedir.

Boyut optimizasyonu ayrıca bir yapıda uygun kesit alanının belirlenmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Şekil 4.42’de verilen bir kafes sistemin boyut optimizasyonunda, kafes sistem için dairesel, dörtgen veya I profil kesitten hangisinin en uygun olduğunun belirlenmesi amaçlanmaktadır.



Şekil 4.42. Bir kafes kirişin boyut optimizasyonu (URL-14)

Topoloji Optimizasyonu ile yapının en uygun başlangıç şekli belirlendiğinden tasarım işlemlerinde ilk olarak topoloji optimizasyonundan yararlanılmalıdır. En iyi başlangıç şekline sahip kavramsal tasarım elde edildikten sonra boyut ve şekil optimizasyonu ile tasarım detaylandırılmalıdır. Boyut ve şekil optimizasyonu, hem tasarım uzayındaki bölgesel geometrileri hem de fiziksel ölçüleri değiştirdiği için yapının dayanımını iyileştirmektedir (Balaban, 2011). Bu şekilde Tasarım optimizasyonu ile yapıdan istenilen en iyi performans elde edilmektedir.

Dış yapı ve iç destek yapı olmak üzere iki bileşenden oluşan rüzgar türbin kanatlarında dış yapının tasarımı aerodinamik özellikler dikkate alınarak yapılmaktadır. İç yapının tasarımı ise kanadın mekanik özellikleri dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu çalışmada belirlenen 2MW'lık rüzgar türbin kanadının iç destek yapısına topoloji optimizasyonu uygulanarak iç destek yapının en uygun hali belirlenmeye çalışılacaktır.

5. KANADIN KATI MODELLENMESİ, TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

5.1 Statik Analiz ve Oluşturulan Modeller

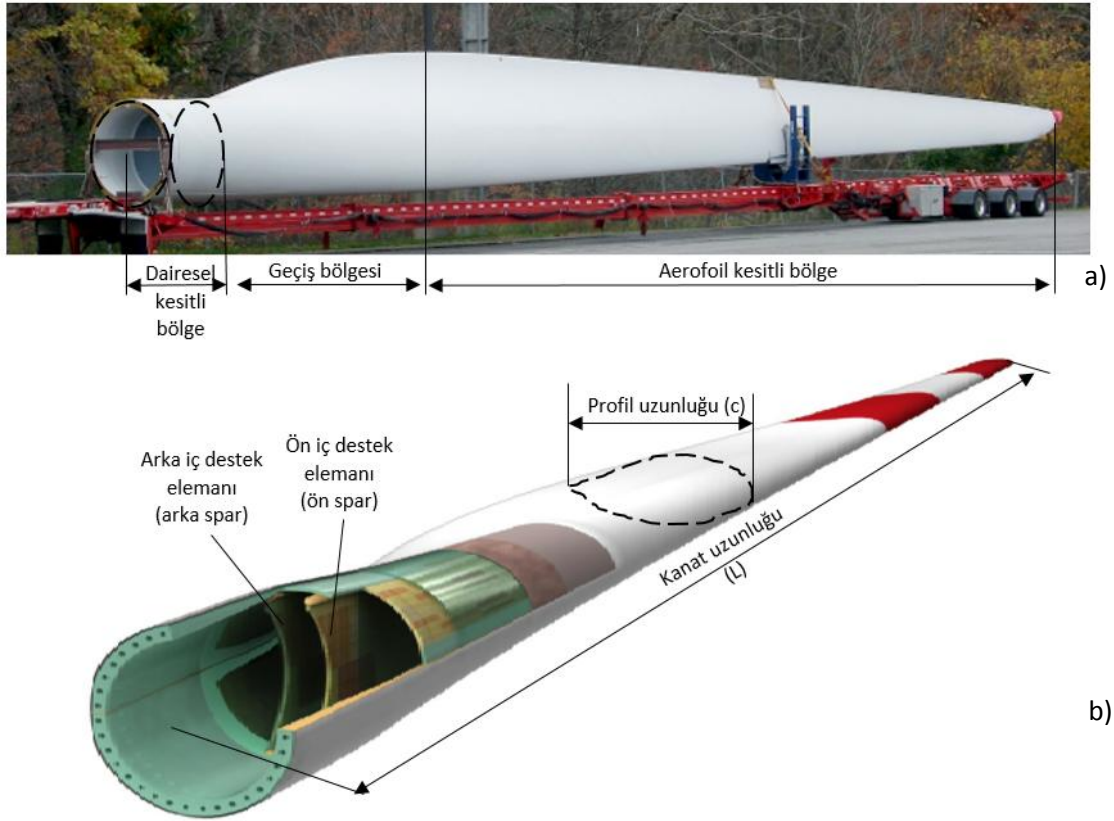
Rüzgâr türbinleri gibi akışkan kaynaklı yüklere maruz kalan sistemlerin mekanik davranışının belirlenmesi için **Akışkan-Yapı Etkileşimi (FSI)** analizi yapılmalıdır. Akışkan-yapı etkileşimi analizi, sistemin aerodinamik davranışın belirlenmesi ve bu davranış dikkate alınarak sistemin mekanik davranışının değerlendirilmesi işlemidir. Bu çalışmada kanadın mekanik davranışının belirlenmesinde analizin kolayca yapılabilmesi amacıyla kanadın dönmediği, sabit olduğu ve kanada etki eden yüklerin yönünün değişmediği kabul edilerek kanadın **statik analiz**i yapılmıştır.

Önceki bölümlerde rüzgâr türbinleri, yatay eksenli rüzgâr türbin elemanları, yatay eksenli rüzgâr türbin kanatları, bu kanatlarda kullanılan malzemeler ve bu kanatların imalat yöntemleri ve bu kanatların tasarım parametreleri ile ilgili genel bir değerlendirme yapılmıştır. Bu kısımda ise akışkan kaynaklı yüklere maruz kalan 2 MW'lık rüzgâr türbin kanadının mekanik davranışı değerlendirilmektedir. Bu amaçla ilk olarak **Blade Dynamics** firmasına ait 2 MW'lık **D49** kanadının katalog bilgilerinden yararlanılarak kanadın tasarım parametreleri belirlenmiş ve **ANSYS** yazılımının katı modelleme modülü olan **Design Modeler** programında kanadın katı modeli ile kanat etrafındaki akış ortamının katı modeli oluşturulmuştur. Daha sonra farklı rüzgâr hızlarında kanada etki eden aerodinamik yüklerin belirlenmesi amacıyla kanat etrafındaki akış ortamı **FLUENT** yazılımına aktararak akış analizi yapılmış ve kanada etki eden basınçlar ile kanat etrafındaki havanın hız dağılımı belirlenmiştir. Akış analizi sonucu kanat yüzeyinde oluşan basınçlar kanada etki eden aerodinamik yükleri temsil etmektedir. Bu nedenle, bu yüklerin kanadın mekanik davranışına etkisi de değerlendirilmelidir. Kanadın mekanik davranışını (gerilme ve şekil değiştirmeler) belirlemek amacıyla **ANSYS Workbench** yazılımında akışkan-yapı etkileşim analiz modeli oluşturulmalıdır. Bu model, akış analizi sonucu belirlenen kanada etki eden basınç dağılımlarının kanadın mekanik davranışına etkisini belirlemektedir. Bu çalışmada, farklı rüzgâr hızlarında (0, 5, 15, 25, 50 m/s) E-Cam/Epoksi kompozit malzemeli kanada aerodinamik ve yerçekimi yüklerinin etki ettiği kabul edilerek kanadın mekanik davranışı değerlendirilmiştir. Ayrıca, teorik çalışmada kanadın iç destek elemanının optimum şeklinin belirlenmesi amacıyla **ANSYS** yazılımında **topoloji optimizasyonu** uygulaması yapılarak iç destek yapının optimum şekli elde edilmeye çalışılmıştır.

5.2 Rüzgâr Türbin Kanadı ve Akış Ortamı Katı Modellerinin Oluşturulması

5.2.1 Kanat katı modelinin oluşturulması

Katı model, Bilgisayar Destekli Tasarımda (BDT) bir parçanın geometrik modelini tanımlamak için gerekli olan kafes ve yüzey geometrisini ifade etmektedir. Bu bölümde seçilen **Blade Dynamics** firmasına ait **D49** kodlu 2 MW'lık bir rüzgâr türbin kanadının katı modeli oluşturulmaktadır. Katı modeli oluşturulması düşünülen seçilmiş bir kanat ve temel parametreleri Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Katı modeli oluşturulması düşünülen kanat resmi (URL-21; URL-22)

Kanadın katı modelinin oluşturulması için kanadın bazı büyüklüklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 5.2'de tipik bir kanattan alınan AA kesiti üzerinde **kanat profil uzunluğu (c)** ve **kanat bağlama açısı (φ)** gibi aerofoilin temel büyüklükleri görülmektedir.

Daha açıkça modelde esas alınacak temel boyutlar ve tanımlanan açılar aşağıdaki gibidir;

α : Hücüm açısı

λ : Uç-hız oranı

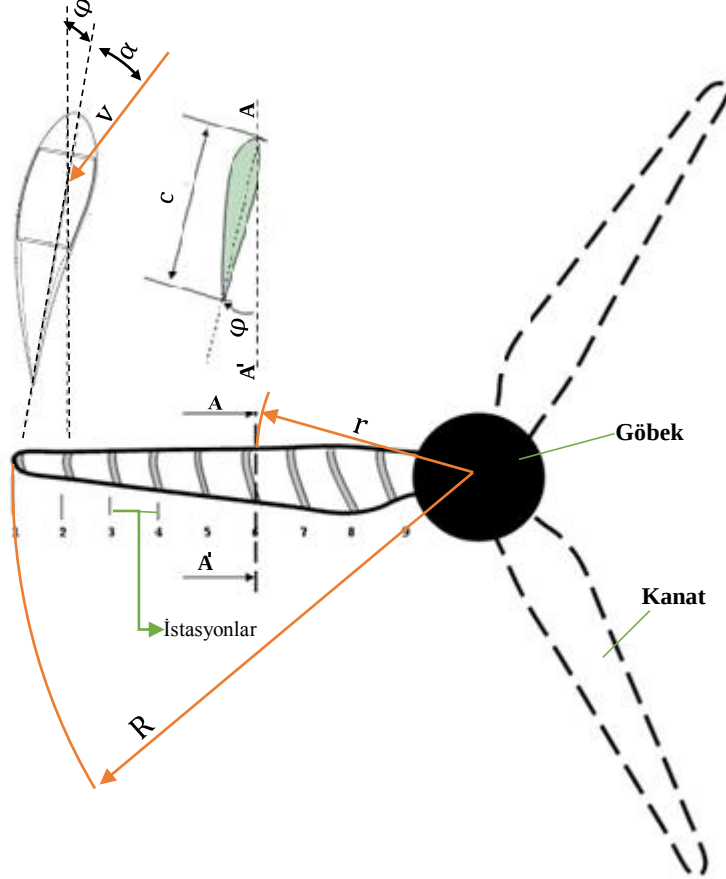
φ : Kanat bağlama açısı

r : Kanadın üzerinden alınan herhangi bir aerofoilin kanat bağlantı noktasına uzaklığı

c : Profil uzunluğu

R : Kanadın rotor yarıçapı

v : Rüzgâr hızıdır



Şekil 5.2. Yatay eksenli üç kanatlı rüzgâr türbini (URL-12)

Modern rüzgâr türbin kanatları, kök kısmından uç kısmına doğru dairesel kesitten büyük aerofoil kesite ve daha sonra küçük aerofoil kesite sahip bir geometride tasarlanmaktadır. Aerofoil kesitinde eğrinin giriş ve çıkış uçlarını birleştiren doğruya **profil uzunluğu (c)**, profil giriş hattı ile pervane düzlemi arasında kalan açıya da **bağlama açısı (φ)** denir. Kanat, şeklini alabilmesi için kanat **istasyon** olarak isimlendirilen dilimlerden meydana gelmekte olup bu istasyonlarda ise farklı profil uzunluğu (c) ve bağlama açılarına (φ) sahip aerofoil bulunmaktadır (Özdamar, 1999). Kanadın belirlenen istasyon noktalarındaki bağlama açısı (φ) ile profil uzunlukları (c) sırasıyla;

$$\varphi = \arctan\left(\frac{2}{3*\lambda*r}\right) - \alpha \quad (5.1)$$

$$C = \frac{8*\pi*R*\sin\varphi}{3*B*C_L*\lambda} \quad (5.2)$$

denklemlerinden yararlanılarak belirlenmektedir. Burada r kanat elemanın (aerofoilin) kanat bağlantı noktasına olan uzaklığı, α kanadın hücum açısı, R kanadın rotor yarıçapı, B kanat sayısı ve C_L kaldırma kuvveti katsayısıdır(Manwell, 2002).

Yatay eksenli bir rüzgâr türbin kanadının katı modelinin oluşturulması için;

- 1- İlk olarak kanat sayısı (B), uç hız oranı (λ), kanadın rotor yarıçapı (R), kaldırma kuvveti katsayısı (C_L) gibi tasarım parametrelerinin belirlenmesi,
- 2- Kanadın oluşturulmasında kullanılacak istasyon noktalarının belirlenmesi,
- 3- Denklem 5.1 ve 5.2’den yararlanarak her bir istasyon noktası için profil uzunluğu (c) ve bağlama açısı (φ) değerlerinin belirlenmesi,

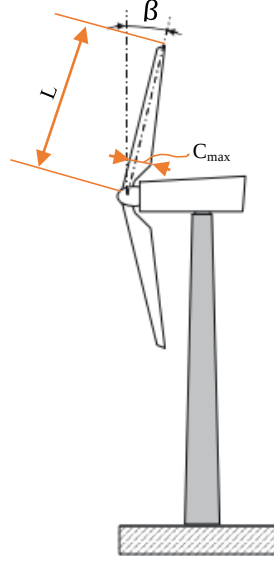
gerekmektedir.

Bu çalışmada 2MW’lık rüzgâr türbin kanadı değerlendirilmiştir. Bu kanadın bazı tasarım parameteleri Blade Dynamics firmasının D49 kanadının katalog bilgileri (URL-1) esas alınarak belirmiş olup bu bilgiler Çizelge 5.1’de verilmiştir. Ayrıca kullanılan katalog bilgilerinde tasarım parametrelerinden bazıları Şekil 5.3’de gösterilmiştir. Burada L kanat uzunluğu, β koniklik açısı ve c_{max} maksimum profil uzunluğudur.

Çizelge 5.1. D49 kanadının teknik özellikleri

Genel Özellikler	
Nominal Güç (N_n)	2000 kW
Nominal Açısal Hız (ω_n)	1,6441 rad/s
Dönme Yönü	Saat Yönü
Geometrik Özellikler	
Kanat Uzunluğu (L)	48,63 m
Maksimum Profil Uzunluğu (c_{max})	3,608 m
Koniklik Açısı (β)	-1°
Aerodinamik Özellikler	
Uç Hız Oranı (λ)	9,4
Maksimum Güç Faktörü (C_{pmax})	0,49
Mekanik Özellikler	
Kütle (Kg)	6150 kg (tek kanat)
Malzeme	E-Cam/Epoksi

D49 kanadının katalog bilgileri değerlendirildiğinde, seçilen kanadın 2 MW'lık bir nominal güce, 48,63 m uzunluğa, -1° 'lik bir koniklik açısına (ön eğilme açısı) sahip olduğu, Kanat malzemesi olarak E-Cam/Epoksi kullanıldığı ve kanadın kütlesinin 6150 kg olduğu belirlenmiştir.



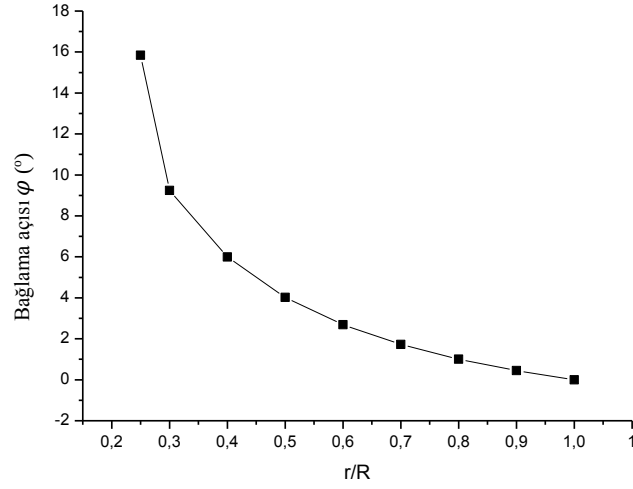
Şekil 5.3. Kanat koniklik açısı, kanat uzunluğu ve maksimum profil uzunluğu (URL-9)

Kanadın katı modelinin oluşturulması için istasyon noktalarındaki bağlama açıları ve profil uzunluklarının belirlenmesi gerekmektedir. 2 MW'lık kanadın tasarımı için Denklem 5.1 ve 5.2'den yararlanılarak belirlenen profil uzunlukları (c) ve bağlama açıları (φ) Çizelge 5.2'de verilmiştir.

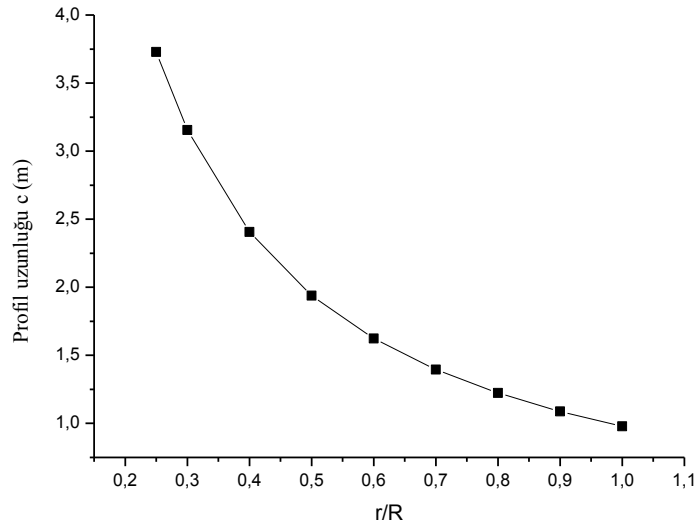
Çizelge 5.2. Modellenen kanadın tasarım parametreleri

Profil İstasyonu	r/R	r	Bağlama Açısı φ ($^\circ$)	Profil Uzunluğu c (m)
2	0,25	12,1575	15,84	3,7284
3	0,3	14,589	9,24	3,1556
4	0,4	19,452	6,00	2,4057
5	0,5	24,315	4,02	1,9383
6	0,6	29,178	2,68	1,6230
7	0,7	34,041	1,73	1,3943
8	0,8	38,904	1,01	1,2225
9	0,9	43,767	0,45	1,0873
10	1	48,63	0,00	0,9786

Kanatın belirlenen geometrik özellikleri değerlendirildiğinde; en büyük profil uzunluğunun 3,728 m olduğu, en büyük bağlama açısı değerinin $15,84^\circ$ olduğu görülmektedir. Kanat profil uzunluğu, katalog değerleri ile karşılaştırıldığında % 3,34'lük bir fark olduğu görülmektedir. Kanat tasarımı ile ilgili yeterli bilgi bulunamadığından kanat profil uzunlukları belirlenen değerler olarak kabul edilmiştir. Belirlenen kanat bağlama açılarının kanat boyunca değişimi Şekil 5.4'de, kanat profil uzunluklarının kanat boyunca değişimi ise Şekil 5.5'de verilmiştir.



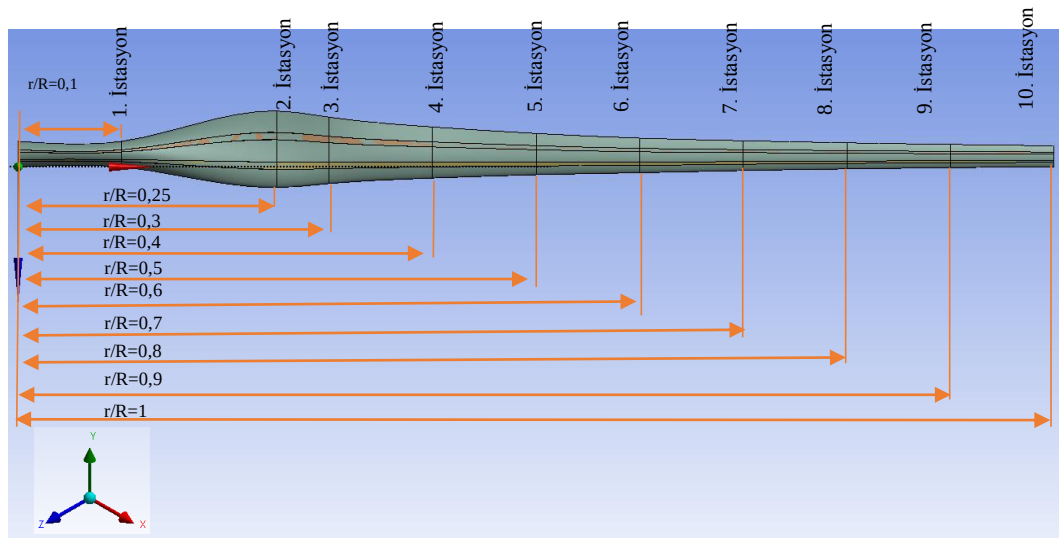
Şekil 5.4. Kanat uzunluğu boyunca kanat bağlama açısının değişimi



Şekil 5.5. Kanat uzunluğu boyunca kanat profil uzunluğunun değişimi

Kanat uzunluğu boyunca, kanat profil uzunluğu ve kanat bağlama açısının değişimi değerlendirildiğinde, kanadın kök bölgesinden uzaklaştıkça profil uzunluğu ve bağlama açısı

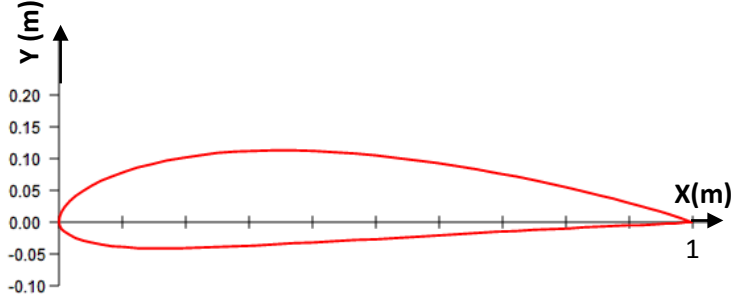
Kanat formunun oluşturulabilmesi için ilk olarak kanadın belirli noktalarında dilimler (**istasyon noktaları**) belirlenmelidir. Burada istasyon noktaları kanadın şeklini alması için kullanılan dilimlerdir. Bu çalışmada istasyon noktaları olarak kanat uzunluğunun %10, %25, %30, %40, %50, %60, %70, %80, %90, %100'ü olarak belirlenmiş olup belirlenen istasyon noktaları Şekil 5.6'da verilmiştir.



- 1- Kanat katı modelinin oluşturulması için ilk olarak kanadın istasyon noktalarında bulunan, kanadın formunu oluşturan profil (aerofoil) belirlenir. Bu çalışmada **NACA 4415** aerofoili seçilmiştir.
- 2- Belirlenen istasyon noktaları için aerofoili oluşturan koordinatlar programa girilir.

Burada bütün istasyon noktalarında kullanılan tek bir aerofoilin koordinatları programa tanıtılmaktadır. Bu koordinatlar www.aerofoiltools.com'dan alınarak ikinci ve onuncu istasyonlar arasındaki 9 istasyonda kullanılmıştır.

- 3- Programa girilen koordinatlar sonucu program tarafından aerofoil geometrisi oluşturulur (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. NACA 4415 aerofoil geometrisi (URL-24)

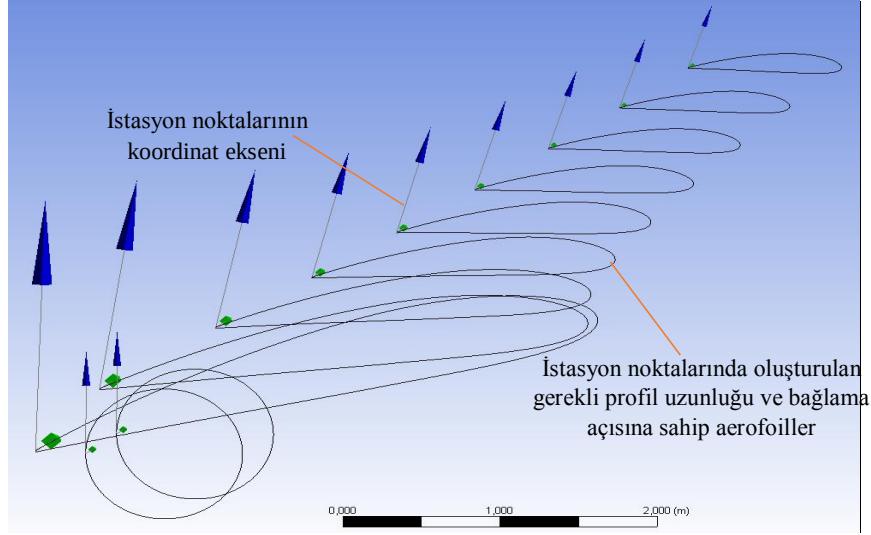
Şekildeki aerofoili tanımlayan koordinatlar 1 m'lik profil uzunluğuna (c) sahip aerofoilin koordinatlarıdır. İstasyon noktalarının hepsini aynı aerofoil geometrisi kullanıldığından burada tek bir aerofoili oluşturan koordinatlar tanımlanmış ve tek bir aerofoil geometrisi oluşturulmuştur.

- 4- Oluşturulan aerofoil geometrisi **translate** komutuyla bütün istasyon noktalarına aktarılır.

Bu işlem sonrası aerofoil kesite sahip bütün istasyon noktalarında 1 m profil uzunluğunda aerofoiller oluşturulmuş olur. Ancak modern rüzgar türbin kanatlarında sabit profil uzunluğunda profiller kullanılmamakta farklı profil uzunluklarına sahip aerofoiller kullanılmaktadır. Bu nedenle bir sonraki adımdaki profil uzunluğunun ve aerofoilin pozisyonunun değiştirilmesi işlemine başvurulmaktadır.

- 5- İstasyon noktalarında oluşturulan aerofoil geometrilerinin profil uzunlukları (c) önceden belirlenen değere ölçeklendirilerek gerekli bağlama açısına (ϕ) sahip olacak şekilde döndürülür (Şekil 5.8).

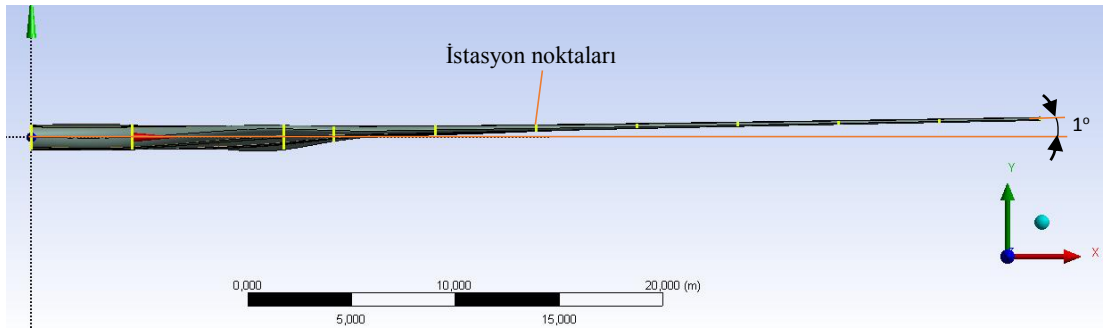
Modern rüzgar türbin kanatları düz bir geometriye sahip değildir. Modern rüzgar türbin kanatları, bağlantı noktası ile uç istasyonlarda farklı büyüklükteki ve farklı pozisyonlardaki aerofoillerden oluşmakta olup kanat profil uzunluğu (c) ve bağlama açısı (ϕ) kanadın geometrisini belirlemektedir. Bu nedenle kanadın istasyon noktalarındaki aerofoiller **scale** komutuyla gerekli profil uzunluğuna (c) büyütülür ve gerekli bağlama açısına (ϕ) sahip olacak şekilde döndürülmektedir.



Şekil 5.8. İstasyon noktalarında oluşturulan aerofoiller

- 6- İstasyon noktalarındaki aerofoiller kanat geometrik olarak -1° lik koniklik açısına (β) (ön eğilme) sahip olacak şekilde konumlandırılır.

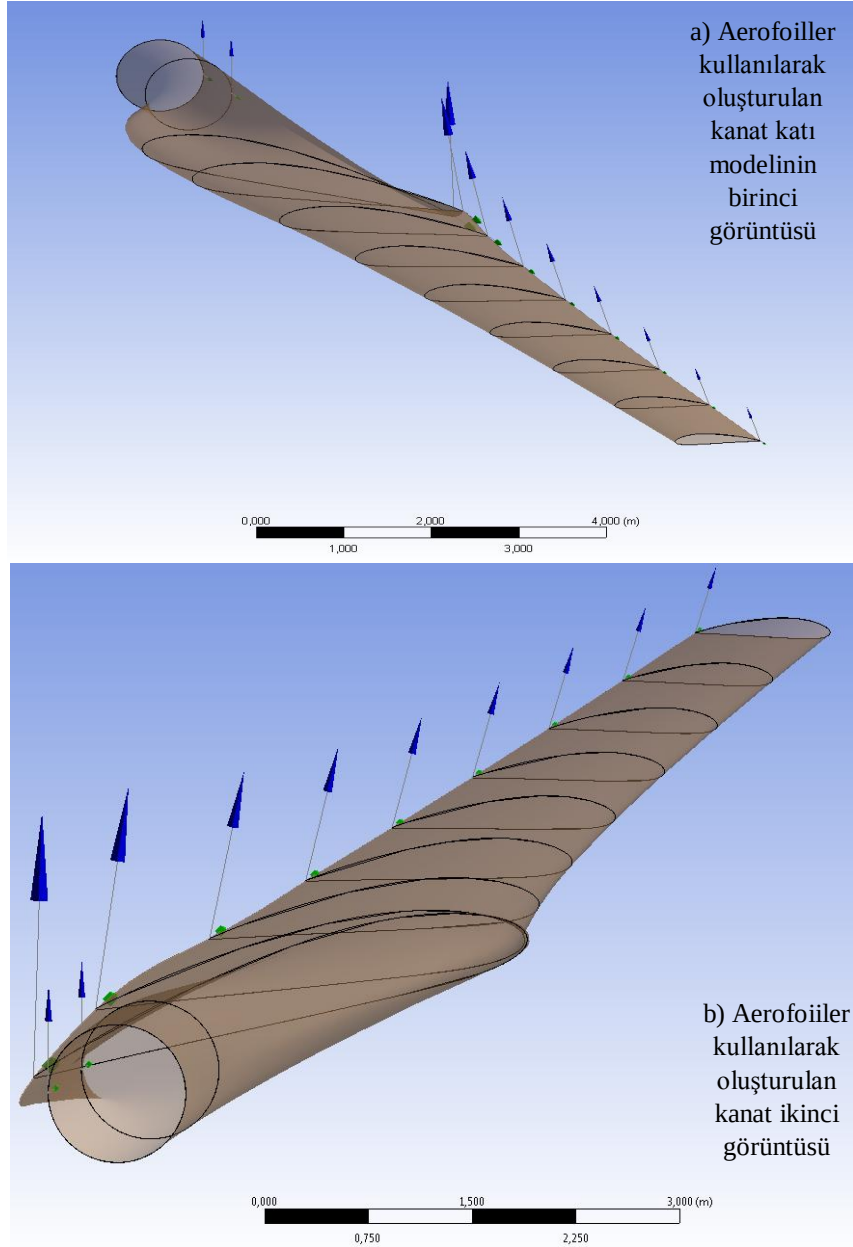
Rüzgar türbin kanatları, yüksek rüzgar hızlarından kaynaklanan şekil değişimleri nedeniyle kuleye çarparak sisteme zarar verebilmektedir. Bu nedenle rüzgar türbin kanatları geometrik olarak belli bir koniklik açısına (ön eğilmeye) sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır. Kanada geometrik olarak ön eğilme verilmesi kanadın belli bir ön gerilmeye sahip olması anlamına gelmektedir. Seçilen kanadın katalog bilgilerinde, kanadın -1° lik koniklik açısına (ön eğilme) sahip olması gerektiği belirtilmektedir. Kanadın -1° lik ön eğilmeye sahip olması kanada koordinat ekseninin tersi yönünde 1° lik açı verilmesidir (Şekil 5.9). Burada kanadın y ekseninde saat yönünün tersine 1° lik eğilmeye sahip olması amacıyla istasyon noktalarının koordinatları y ekseninde yeniden konumlandırılmıştır.



Şekil 5.9. Ön eğilmeli kanat için konumlandırılan istasyon noktaları

- 7- İstasyon noktalarında oluşturulan aerofoillerden yararlanılarak **skin/loft** komutuyla kanat katı modeli oluşturulur (Şekil 5.10).

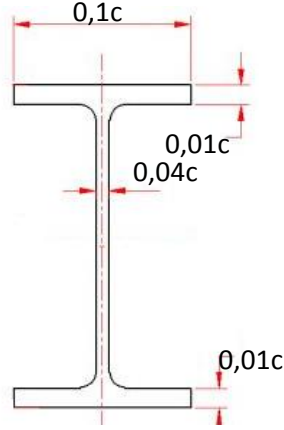
Burada kanat katı modeli kanadın dış yapısıdır. Kanadın dış yapısı kabuk yapıda (Shell) eleman olarak modellenmekte olup bu modellemede, belirlenen istasyon noktalarındaki profillerden yararlanılmaktadır. Programda skin/loft komutuyla belirlenen istasyon noktalarından geçen kanat dış yapısı oluşturulur. Burada dış yapı yüzey olarak elde edilmekte olup şekildeki birinci kanat görüntüsü uç kısımdaki aerofoillerin, ikinci kanat görüntüsü dip kısımdaki dairesel kesitin gösterilmesi için verilmiştir.



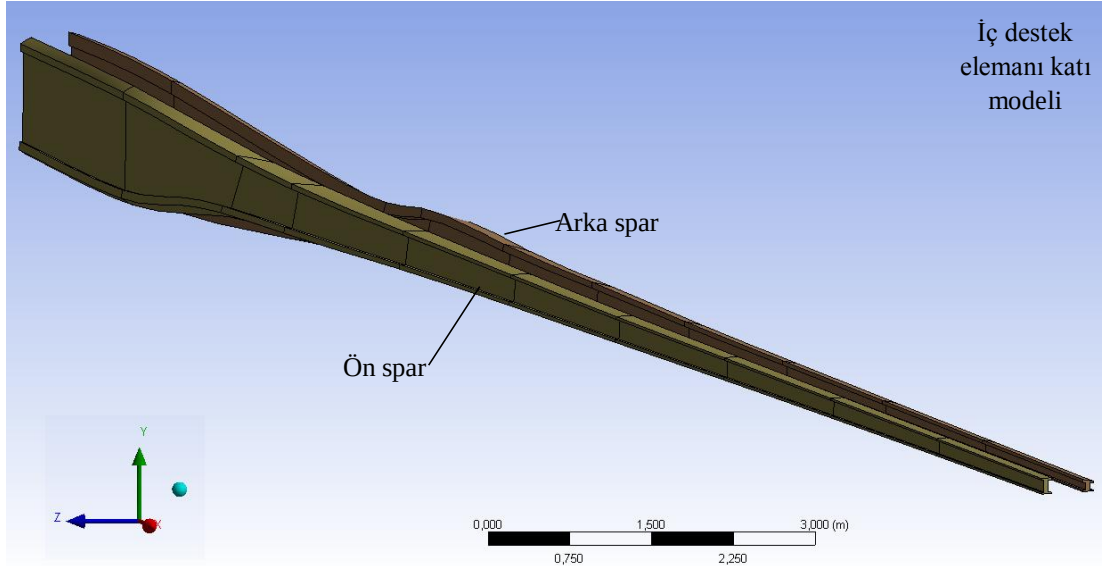
Şekil 5.10. Oluşturulan kanadının katı modeli

Kanadın dış yapısının katı modeli oluşturulduktan sonraki adım kanadın iç destek elemanlarının katı modelinin oluşturulmasıdır. Bu çalışmada iç destek elemanı olarak I profil kiriş kullanılmıştır. Kullanılan I kirişin boyutları profil uzunluğuna bağlı olarak değişmekte olup kanadın iç destek elemanı olarak kullanılan kiriş ve boyutları Şekil 5.11’de verilmiştir.

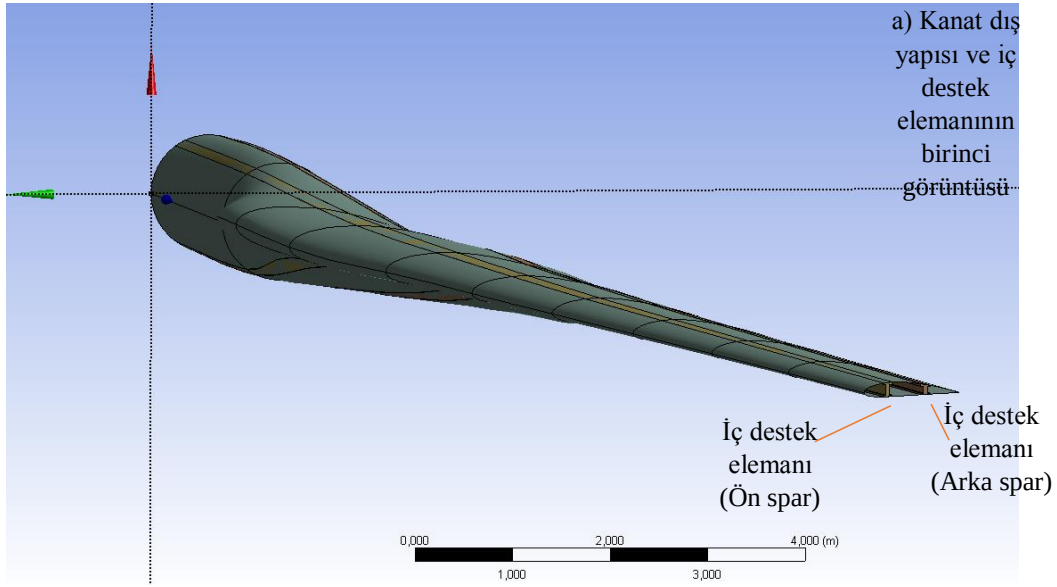
Kullanılan 2 adet iç destek elemanı (spar) istasyon noktalarında aerofoilin 0,25c ve 0,65c'lik profil uzunluklarında konumlandırılmış olup bu elemanlar kanadın kök kısmından uç kısmına kadar uzanmaktadır (Kullanılan I profil kiriş uzunluğu 48,63 m'dir.) (Höyland, 2010). Katı modeli oluşturulan iç destek elemanları (spar) Şekil 5.12'de verilmiştir. Oluşturulan dış yapı ve iç destek elemanlarının katı modeli Şekil 5.13 ve 5.14'de verilmiştir.



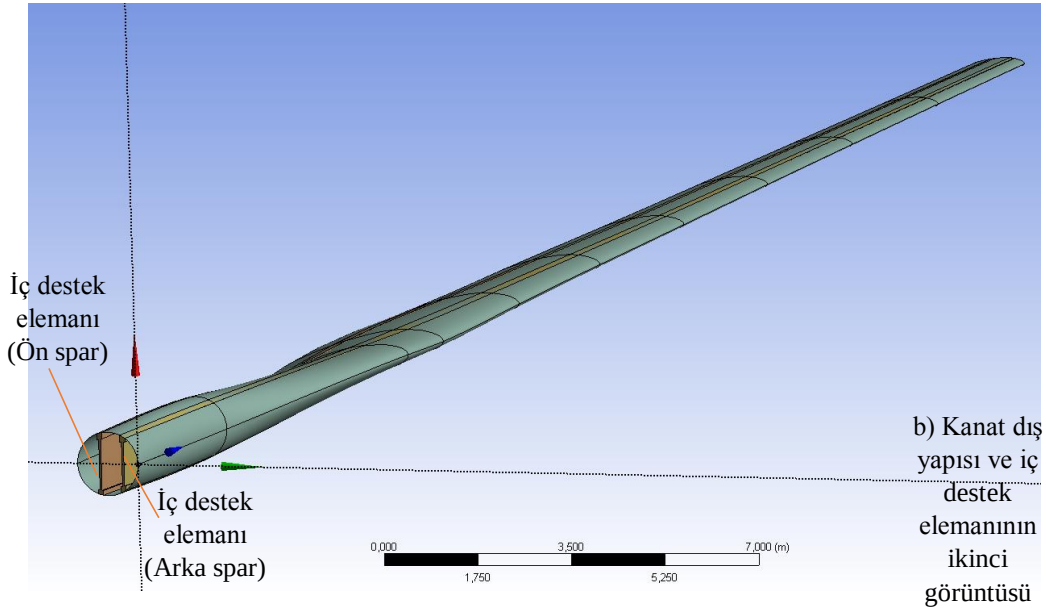
Şekil 5.11. İç destek elemanı olarak kullanılan I profilli kirişin profil boyutları (Griffin 2001; Locke ve Valencia, 2004; Höyland, 2010)



Şekil 5.12. İç destek elemanlarının (spar) katı modeli



Şekil 5.13. Kanat dış yapısı ve iç destek elemanının katı modeli (birinci görüntü)



Şekil 5.14. Kanat dış yapısı ve iç destek elemanının katı modeli (ikinci görüntü)

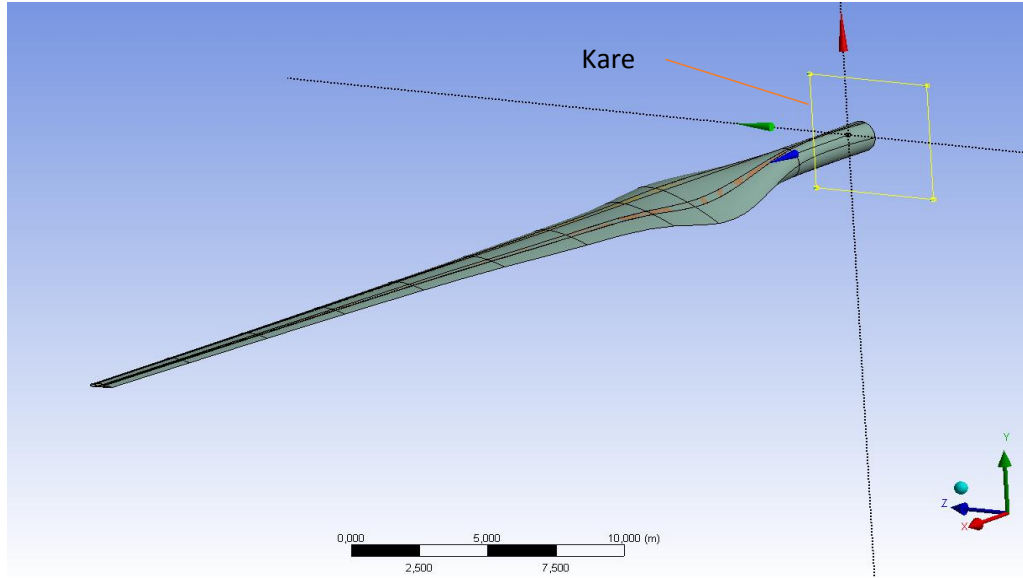
Şekildeki kanat katı modeli, 48,63 m uzunluğunda olup dış yapısı ve iç destek elemanlarından oluşmaktadır. Katı modeli oluşturulan kanat, kök kısmından başlayarak 4,863 m ($r/R=0,1$) uzunluğa kadar **dairesel kesite**, 4,863 m uzunluktan 12,1575 m uzunluğa kadar **geçiş kesitine** (dairesel kesitten aerofoil kesite geçiş), 12,1575 m'den kanat ucuna (48,63 m) kadar **aerofoil kesite** sahiptir. Kanat katı modeli, aerofoil kesitin başladığı noktada (12,1575 m) $15,84^\circ$ lik bağlama açısı olarak bilinen bir açığa sahiptir. Bu açı kanat ucuna doğru giderek azalmakta ve en uçtaki istasyonda 0° olmaktadır. Ayrıca, kanat katı modeli, kanadın şekil değişimini azaltmak amacıyla uç kısmından -1° lik koniklik açısına (ön eğilme) sahip olacak şekilde tasarlanmıştır (kanada saat yönünün tersi yönde 1° lik ön eğilme verilmiştir).

Burada oluşturulan kanat katı modeli, kabuk şeklindeki dış yapı ve iki iç destek elemanından meydana gelmektedir. Burada kanat dış yapısının et kalınlığı ile ilgili herhangi bir tanımlama yapılmamaktadır. Kanat dış yapısının et kalınlığı ilerleyen kısımlarda belirlenmektedir.

5.2.2. Akış ortamı katı modelinin oluşturulması

Kanadın katı modelinin oluşturulmasından sonraki adım kanat etrafındaki akışın değerlendirilebilmesi için akış ortamının katı modelinin oluşturulmasıdır. Üç kanatlı rüzgâr türbinlerinde kanatlar 120° 'lik açısal pozisyonlarda konumlanmıştır. Bu nedenle kanadın aerodinamik davranışının belirlenmesinde bir kanat ve etrafındaki akış ortamını modellemek ve bu akış ortamında akış analizi yapmak bütün sistem aerodinamik davranışının belirlenmesi için yeterli olacaktır. Bu çalışmada bir kanat ve etrafındaki akış ortamı modellenmiş olup yapılan işlemler aşağıda izah edilmiştir.

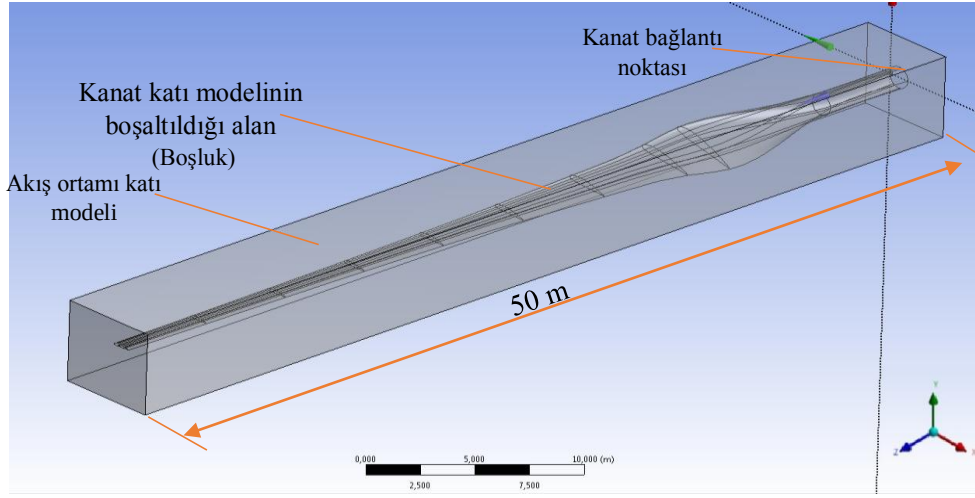
- 1- Kanadın etrafında akış ortamının sınırlarını oluşturacak kare bir geometri belirlenir. Bu çalışmada kanadın dış şeklinin oluşturulmasında kullanılan kare geometri sarı renkli olarak Şekil 5.15'de gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Akış ortamının dış sınırlarını oluşturan kare geometri

- 2- Belirlenen geometri kanat boyunca uzatılarak dikdörtgenler prizması şeklinde bir geometri oluşturulur. Bu geometri akış ortamının dış sınırlarını oluşturmaktadır.
- 3- Kanadın etrafındaki geometriden kanat geometrisi çıkarılarak akış ortamının katı modeli elde edilmektedir. Bu geometri, programda **boolean** komutu kullanılarak dikdörtgen prizma geometriden akış ortamının iç sınırını oluşturan kanat

geometrisinin boşaltılmasıyla elde edilmektedir. Katı modeli oluşturulan akış ortamı Şekil 5.16’de gösterilmiştir.



Şekil 5.16. Katı modeli oluşturulan akış ortamı

Dikdörtgen prizmadan kanat katı modelinin çıkarılmasıyla elde edilen akış ortamı katı modelinin geometrik özellikleri Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Katı modeli oluşturulan akış ortamının geometrik özellikleri

Özellik	Büyüklik
Kenar Sayısı	8
Uç Sayısı	23
Yüzey Sayısı	17
Yüzey Alanı	1161,1 m ²
Hacim	926,05 m ³

5.3 Kanadın Aerodinamik Davranışı ve Teorik Model

Rüzgâr türbinlerinde, kanadın aerodinamik davranışının belirlenmesi amacıyla çeşitli aerodinamik teorilerden, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği’nden (**HAD**) ve geliştirilen özel yazılımlardan yararlanılmaktadır.

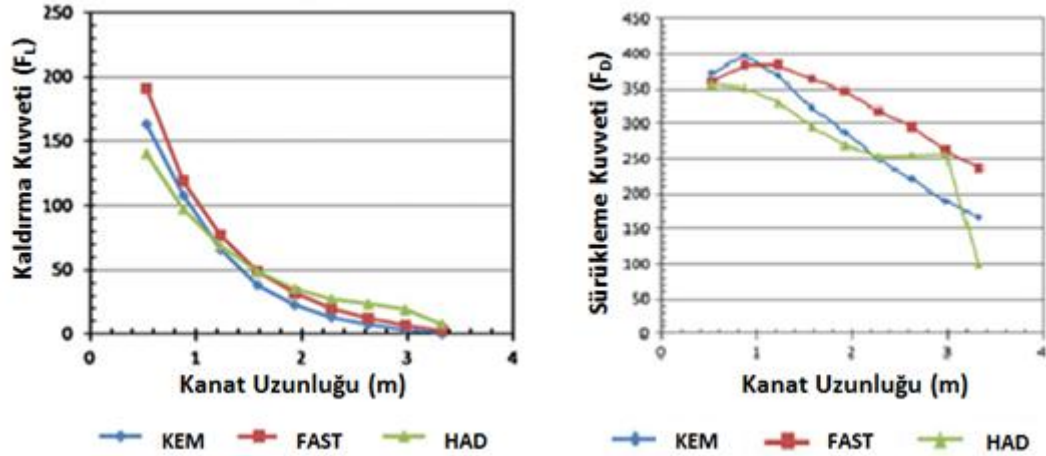
Kanadın aerodinamik davranışının belirlenmesinde ilk olarak **Lineer Momentum Teorisi**, **Dönen Disk Modeli için Momentum Teorisi** ve **Kanat Elemanı Momentum Teorisi(KEM)** gibi çeşitli aerodinamik teorilerden yararlanılmaktadır. Bu teoriler kanadın aerodinamik tasarım parametrelerinin belirlenmesi kısmında özetlenmiştir.

Kanadın aerodinamik davranışının belirlenmesinde ikinci olarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği’nden (**HAD**) yararlanılmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

doğadaki akışkan davranışlarının belirlenmesinde kullanılan numerik bir yaklaşımdır (Yılmaz, 2009). Rüzgâr türbin kanadına Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği'nden yararlanılarak akış analizi yapıldığında, kanat yüzeyinde oluşan basınç dağılımı ile kanat etrafındaki havanın hız dağılımı elde edilmektedir.

Rüzgâr türbinlerinde; hava ile kanatlar arasındaki etkileşimin belirlenmesinde üçüncü olarak geliştirilen özel yazılımlardan yararlanılmaktadır. Bu özel yazılımlardan birisi **FAST** (Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence) yazılımıdır. FAST Oregon Devlet Üniversitesi ve Utah Üniversitesi Ulusal Rüzgâr Teknoloji Merkezi tarafından geliştirilen yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin aerodinamik ve mekanik davranışını belirlemede kullanılan özel bir yazılımdır.

Kanadın aerodinamik davranışının belirlenmesinde yukarıda bahsedilen üç yaklaşımdan da yararlanılmaktadır. Kanadın aerodinamik davranışının belirlenmesinde kullanılan Kanat Elemanı Momentum Teorisi (**KEM**), Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (**HAD**) ve **FAST** yaklaşımlarıyla bulunan 3,5 m'lik kanada etki eden aerodinamik yükler Şekil 5.17'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Wu ve Young, 2012).



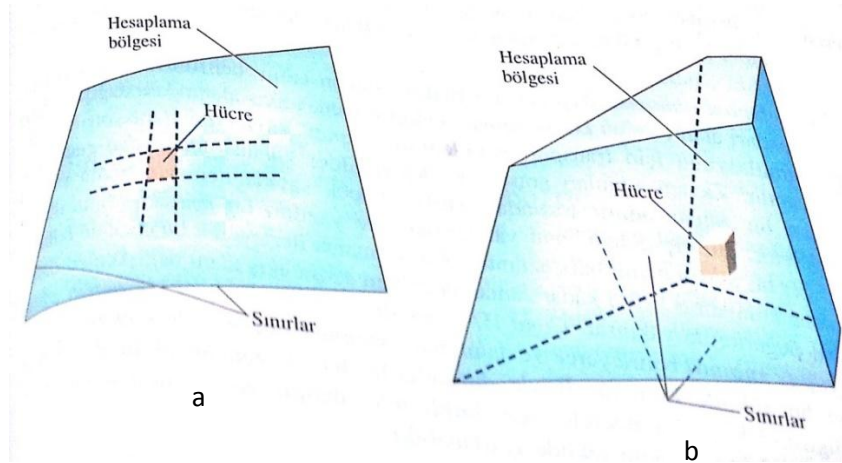
Şekil 5.17. Farklı yaklaşımlarla belirlenen 3,5 m'lik kanada etki eden aerodinamik yükler (Wu ve Young, 2012)

Şekildeki farklı metotlarla belirlenen aerodinamik yükler (kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvveti) değerlendirildiğinde **KEM**, **FAST** ve **HAD** ile belirlenen kuvvet dağılımlarının birbirine benzer olduğu görülmektedir. Fakat **FAST** ve **HAD** ile belirlenen rüzgâr yüklerinin (Wu ve Young, 2012) çalışmada gerçek rüzgâr yüklerine daha yakın olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada kanadın aerodinamik davranışının belirlenmesinde **Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği'nden (HAD)** yararlanılmaktadır.

5.3.1 Hesaplamalı akışkanlar dinamiğiyle genel aerodinamik analiz

Bu bölümde hesaplamalı akışkanlar dinamiğiyle akış veya aerodinamik analizin temel prensipleri özetlenmiştir. Viskoz, sıkıştırılamaz, Newton tipi akışkanın sürekli (daimi) laminar akışı için hareket denklemleri, **Süreklilik (Korunum) Denklemi** ve **Navier-Stokes (Transport) Denklemi**dir. Bu denklemler akış bölgesindeki akış özelliklerinin belirlemede kullanılmaktadır. Akışkanlar mekaniğinde bu işlemleri analitik olarak çözmek zor olduğundan bu denklemlerin çözümü bilgisayar yardımıyla numerik metotlar kullanılarak yapılmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılan metotlardan birisi olup bu metotla akışın diferansiyel denklemlerini çözmek için genel olarak aşağıda belirtilen adımlar takip edilmektedir.

- 1- Bir **hesaplama bölgesi** seçilir, seçilen bölgede **ağ yapısı** oluşturularak hesaplama bölgesi **hücre** olarak bilinen çok sayıda küçük elemana bölünür. İki boyutlu bölgelerde hücreler alanlar şeklinde(Şekil 5.18a), üç boyutlu bölgelerde hücreler ise hacimler şeklindedir(Şekil 5.18b). Buradaki her bir hücre Süreklilik ve Navier-Stokes denklemlerinin çözüldüğü küçük kontrol hacimleridir. Bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümünün niteliği büyük oranda ağın niteliğine bağlıdır. Bu nedenle ağ mümkün olduğunca sık olmalıdır. Şekil 5.18’de akış analizi için tanımlanan bölgeler gösterilmiştir.



Şekil 5.18. Akış analizi için tanımlanan bölgeler (Çengel ve Cimbala, 2008)

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yaklaşımıyla iki boyutlu bir hesaplama bölgesinde ağ yapısı oluşturulduğunda, oluşturulan ağ yapısı her biri hücre olarak bilinen çok sayıda alana, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı ile üç boyutlu bir hesaplama bölgesinde ağ yapısı oluşturulduğunda ise oluşturulan ağ yapısı hücre olarak bilinen çok sayıda hacme ayrılmaktadır.

- 2- Hesaplama bölgesinin iki boyutlu akış için her bir **kenarında**, üç boyutlu akış için her bir **yüzeyinde** sınır şartları belirlenir.
- 3- Akış analizinde kullanılacak **akışkan türü** (su, hava, benzin vb.) ve özellikleri (sıcaklık, yoğunluk, viskozite vb.) belirlenir.
- 4- Sayısal parametreler ile çözüm algoritmaları seçilir. Sayısal parametreler ve çözüm algoritmaları hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımlarında mevcuttur. Akışkan analizinin türüne göre (akış analizi, termal analiz vb.) uygun algoritma ve sayısal parametreler seçilir.
- 5- Hesaplama bölgesindeki her bir hücrenin bütün akış alanı değişkenleri için başlangıç değerleri belirtilir. Bu değerler problemin çözümü için başlangıç şartlarıdır. Bu değerlerin doğru olup olmaması sonucu değiştirmemekte olup çözüme ulaşmada kullanılacak iterasyon sayısını etkilemektedir. Çözüme yakın başlangıç değeri belirlenerek çözüme ulaşmada kullanılacak iterasyon sayısı ve çözüm zamanı azaltılabilmektedir.
- 6- Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğiyle akış analizinde, başlangıç değerleri ile başlanarak, Süreklilik denklemi ve Navier-Stokes denkleminin ayrı formülleri her bir hücre için iteratif (döngüsel) olarak çözülür. Navier-Stokes denkleminin tüm terimleri toplandığında, **artık** (residual) olarak tanımlanan bir değer belirlenir. Bu değer çözüm bölgesindeki her bir hücre için sıfır olduğunda çözüm elde edilir. Ancak hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümünde bu toplam hiçbir zaman sıfır olmaz (numerik hata), iterasyonlar yapıldıkça bu değer azalır (çözüme yakınsanır). Bu değer belirlenen, kabul edilebilir hata miktarından az olduğunda çözüme yakınsanmış ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğiyle akış analizi işlemi tamamlanmış olur.
- 7- Çözüme yakınsandığında elde edilen hız ve basınç gibi akış alanı değişkenleri grafiksel olarak çizilir ve analiz edilir.
- 8- Akış alanının basınç düşüşü gibi genel özellikleri ile bir cisim üzerine etkiyen kuvvetler (kaldırma ve sürüklenme kuvveti) ve momentler yakınsamış çözümden hesaplanır (Çengel ve Cimbala, 2008).

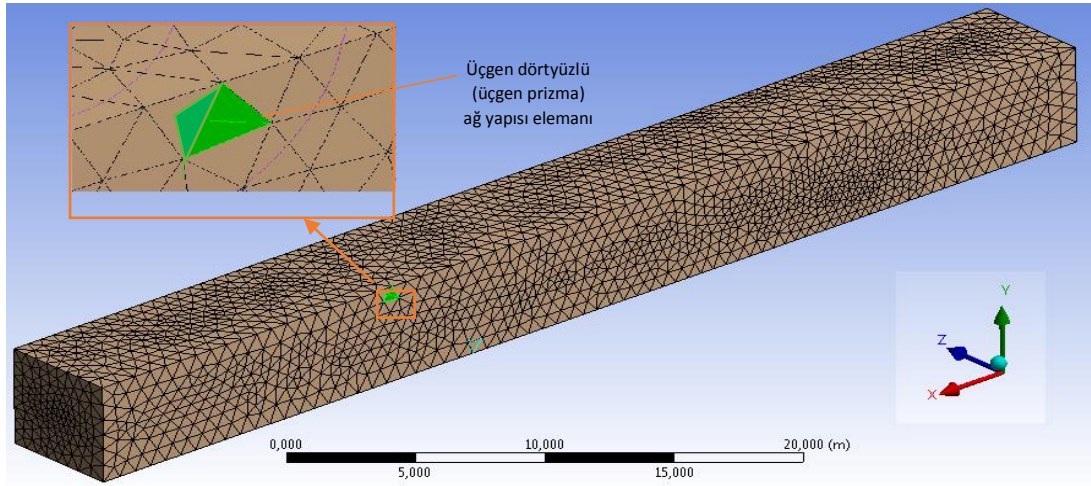
5.3.2 Kanadın akış analizi

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile kanadın aerodinamik davranışının belirlenmesi amacıyla çeşitli yazılımlardan yararlanılmaktadır. Bu çalışmada seçilen kanadın aerodinamik davranışının belirlenmesinde **ANSYS** yazılımının hesaplamalı akışkanlar dinamiği modülü olan **FLUENT** programı kullanılmış olup yapılan işlemler aşağıda özetlenmiştir.

- 1- **ANSYS Design Modeler** yazılımında oluşturulan akış ortamı katı modeli **ANSYS FLUENT** yazılımına aktarılır.
- 2- **FLUENT**'e aktarılan akış ortamının ağ yapısı oluşturulur.

Ağ yapısının oluşturulmasındaki amaç, akış ortamında hücre olarak bilinen küçük boyutlardaki çok sayıda hesaplama bölgesinin oluşturulmasıdır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde, her bir hücrede Süreklilik ve Navier-Stokes denklemlerinin çözüldüğü küçük kontrol hacimler oluşturularak sonlu hacimler yöntemiyle problemin numerik olarak çözümü amaçlanmaktadır.

ANSYS yazılımında ağ yapısı oluşumu için otomatik ağ oluşumu (automatic meshing), üçgen dörtyüzlü elemanla (üçgen prizma) ağ oluşumu (tetrahedron meshing), altıyüzlü elemanla ağ oluşumu (hexahedron meshing), süpürerek ağ oluşumu (sweep meshing), çok bölgeli ağ oluşumu (multi-zone meshing) gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada akış ortamı düzgün bir geometriye sahip olmadığından üçgen dörtyüzlü eleman kullanılarak ağ yapısı oluşturulmuştur (Şekil 5.19).

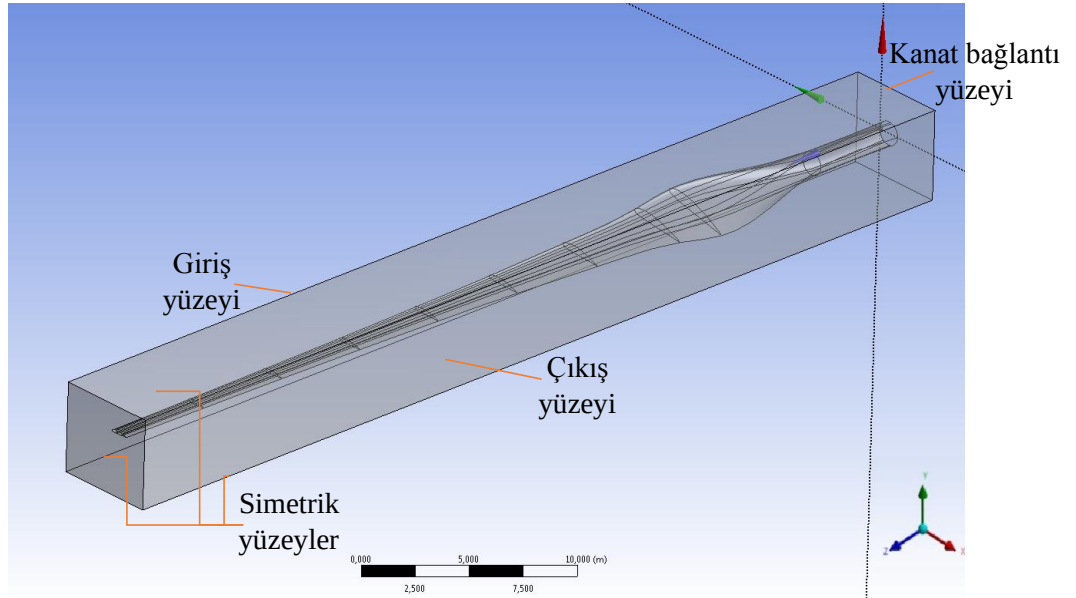


Şekil 5.19. Akış ortamında oluşturulan ağ yapısı

Bu çalışmada, hesaplama bölgesinde oluşturulan ağ yapısı **7310438 hücre (eleman)** ve **1292138 düğüm noktasından** (nod) oluşmaktadır.

- 3- Sınır koşulları belirlenir.

Bu çalışmada sınır koşulları olarak akış ortamının $-x$ yönündeki yüzeyi **giriş yüzeyi** (akışkanın akış ortamına girdiği yüzey), $+x$ yönündeki yüzeyi **çıkış yüzeyi** (akışkanın akış ortamından çıktığı yüzey), $-z$ yönündeki yüzeyi **kanat bağlantı yüzeyi** (kanadın mesnetlendiği yüzey), $+y$, $+z$ ve $-y$ yönlerindeki yüzeyleri ise **simetrik yüzeyler** (hava akımına açık yüzeyler) olarak belirlenmiştir (Şekil 5.20).



Şekil 5.20. Akış analizi için belirlenen sınır koşulları

Kanadın akış analizinde, havanın giriş yüzeyine 5, 15, 25 ve 50 m/s'lik hızlarla geldiği, çıkış yüzeyinde akışkan çıkış basıncının sıfır olduğu, kanat bağlantı yüzeyinde akış olmadığı, simetrik yüzeylerin ise havaya açık yüzeyler olduğu belirlenmiştir.

- 4- Akışkan türü tanımlanır. Bu çalışmada kullanılan akışkan türü hava olduğundan, akışkan türü olarak **hava** seçilir.
- 5- Akış analiz tipi tanımlanır. Akış analiz tipi olarak **viskoz laminar** akış seçilmiştir.
- 6- Çözüme ulaşmada kullanılacak iterasyon sayısı girilerek çözüme başlanır.

İterasyon sayısının seçimi daha doğru sonuçlar elde edilmesi açısından önemlidir. **FLUENT** yazılımında daha hassas sonuçlar elde edilmek için iterasyon sayısı yüksek seçilmelidir. Ancak yüksek eleman sayısı da problemin çözüm zamanını arttırmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada iterasyon sayısı olarak 150 belirlenmiştir.

FLUENT yazılımıyla akış analizinde, **sonlu hacimler metodundan** yararlanılmaktadır. Bu metotta akış ortamında ağ yapısı oluşturularak akış ortamı sonlu hacimlere ayrılır. Bu hacimlerde tanımlanan sınır koşulları değerlendirilerek Süreklilik Denklemi ve Navier-Stokes denklemlerinden problemin çözümü elde edilir. Şekildeki sınır koşullarından giriş yüzeyindeki hava hızı değiştirilerek farklı rüzgar hızlarında kanadın aerodinamik performansı belirlenmektedir. Akış analizi sonucu kanat etrafındaki ortamda oluşan havanın hızları ve kanat yüzeyinde oluşan basınçlar belirlenmektedir.

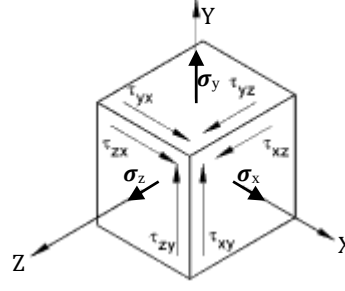
5.4 Kanadın Mekanik Davranışı ve Tasarım Esasları

5.4.1 Statik analiz

Herhangi bir makine, mekanizma, yapı veya sistemde diğer cisimlerin veya elemanların yapmış olduğu etki **kuvvet** olarak tanımlanmaktadır. Genelde cisimler arasında bulunduğu kabul edilen etkiler veya tepkiler ya doğrudan belirli dış kuvvetler ya da iç kuvvetler (bağ kuvvetleri) şeklinde ortaya çıkmaktadır. Dış kuvvetler aktif kuvvetler olarak da bilinmekte olup ağırlık, tahrik ve faydalı kuvvetler gibi doğrudan doğruya verilen kuvvetlerdir. İç kuvvetler ise incelenen cismin veya elemanın parçaları arasındaki etki ve tepkiden doğmaktadır. Bu kuvvetlerin esas özelliği veya karakteri kesit yüzeyi boyunca süreklilik arz edecek şekilde dağılım göstermesidir. Yüzeye dağılmış iç kuvvetin herhangi bir noktada dağılma veya yayılma şiddeti, birim alana düşen iç kuvvet olup **gerilme** olarak tanımlanmaktadır (Koç, 2013).

Rüzgâr türbin kanatlarının farklı rüzgâr hızlarındaki dayanımı önemlidir. Kanadın farklı rüzgar hızlarındaki mekanik davranışını (dayanım ve şekil değişimleri) belirlemek amacıyla kanadın **statik analizi** ya da **dinamik analizi** yapılmalıdır. Bu çalışmada analiz kolaylığı açısından kanadın dönmediği, sabit olduğu kabul edilmiş olup bu nedenle kanadın savrulma ve titreşim gibi etkileri değerlendirilmemiş, kanadın dinamik analizi yapılmamıştır. Bu çalışmada kanat sabit olarak kabul edildiğinden kanada etki eden yüklerin yönünün sabit olduğu (kanada etki eden yükler statik) kabul edilerek kanadın **statik analizi** yapılmıştır.

Kanadın mekanik davranışının belirlenmesi için kanatta oluşan gerilmelerin (normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri) hesaplanması gerekmektedir. Bu gerilmelerden normal gerilme σ_x , σ_y ve σ_z bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu gerilmelerden σ_x x ekseninde oluşan normal gerilme, σ_y y ekseninde oluşan normal gerilme, σ_z z ekseninde oluşan normal gerilme anlamına gelmektedir. Kayma gerilmesi ise τ_{xy} , τ_{yz} ve τ_{xz} bileşenlerinden oluşmakta olup τ_{xy} x eksenine dik y eksen yönünde oluşan kayma gerilmesi, τ_{yz} y eksenine dik z eksen yönünde oluşan kayma gerilmesi, τ_{xz} x eksenine dik z eksen yönünde oluşan kayma gerilmesi anlamına gelmekte olup bu gerilmeler Şekil 5.21’de gösterilmiştir.



Şekil 5.21. Normal gerilme ve kayma gerilmeleri

Rüzgar türbin kanatları önceki bölümlerde ifade edildiği gibi çeşitli yüklere maruz kalmakta olup aerodinamik yükler kanadı rüzgar doğrultusunda, yerçekimi yükleri ise kanadı dünyanın merkezine doğru eğmeye zorlamaktadır. Bu zorlanmaların bir sonucu olarak ise kanatta **normal gerilmeler ve eğilme gerilmeleri (σ_e)** oluşmaktadır. Ayrıca kanadın şeklinden dolayı kanat gelen rüzgar etkisiyle burulmaya da zorlanmaktadır. Bu nedenle kanatta normal gerilmelerin yanında **kayma gerilmeleri (τ)** de oluşmaktadır. Bu çalışmada kanadın mekanik davranışının belirlenmesi amacıyla kanatta oluşan normal (**σ**) ve kayma gerilmeleri (**τ**) ile bu gerilmelerin ayrı ayrı yapacağı etkiyi teorik olarak tek başına yapacağı düşünülen **eşdeğer gerilmeler (σ_{es})** değerlendirilmektedir.

Eşdeğer gerilmeler belirlenirken kırılma hipotezleri veya mukavemet varsayımlarından yararlanılmaktadır. Uygulamada birleşik gerilme hallerini belirlemek için kullanılan çeşitli kırılma hipotezleri bulunmaktadır. Bunlardan izotropik malzemeler için kullanılan önemli kırılma hipotezleri; Maksimum Normal Gerilme Hipotezi, Maksimum Şekil Değiştirme Hipotezi, Maksimum Kayma Gerilmesi Hipotezi ve Maksimum Şekil Değiştirme Enerjisi Hipotezidir (Von Mises Kriteri). Bu hipotezlerden Maksimum Kayma Gerilmesi hipotezi ile Maksimum Şekil Değiştirme Enerjisi hipotezi uygulamada daha çok kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalar ve tecrübeler, Maksimum Şekil Değiştirme hipotezinin **kırılgan**, Maksimum Kayma Gerilmesi ile Maksimum Şekil Değiştirme Enerjisi hipotezinin ise **sünek** malzemeler için uygulanabileceğini göstermektedir (Koç, 2013). Bu çalışmada eşdeğer gerilmeler belirlenirken **Maksimum Şekil Değiştirme Enerjisi Hipotezinden (Von-Mises Kriteri)** yararlanılmakta olup bu kritere göre eşdeğer gerilme;

$$\sigma_{es} = \sqrt{\sigma_e^2 + 3\tau^2} \quad (5.3)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Yukarıda izah edilen kırılma varsayımları, mekanik özellikleri malzemenin bütün yönlerinde aynı olan **izotropik malzemeler** için kullanılmaktadır. Rüzgar türbin kanatları gibi kompozit veya **anizotropik** malzemelerde ise malzeme özellikleri doğrultudan bağımsız düşünilememekte yani malzeme bütün doğrultularda aynı özelliklere sahip olamamaktadır. Bu nedenle **anizotropik** malzemelerde yukarıdaki varsayımların kullanılması sağlıklı sonuç vermemekte olup anizotropik malzemeler için özel varsayımlar geliştirilmiştir. Bu varsayımlar izotropik malzemelerde kullanılan varsayımların malzeme özellikleri dikkate alınarak genişletilmesi şeklindedir (Bakioğlu, 2009). Anizotropik malzemelerde **Hill, Hofmann, Maksimum Gerilme, Maksimum Şekil Değiştirme ve Tsai-Wu** gibi çeşitli kırılma varsayımlarından yararlanılmaktadır. Anizotropik malzemeler için sınır değerler aşıldığında yapıda kırılmanın olacağı varsayımından hareket edilmektedir. Bu kriterler, maruz kalınan kuvvetler nedeniyle oluşan gerilmelerin malzemeyi hasara uğratıp uğratmayacağının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, **Tsai-Wu** kriterine göre yapıda hasar olup olmayacağının kontrolü yapılmaktadır.

Tsai-Wu kriteriyle kırılma kontrolü için koordinat sisteminin bütün eksenlerinde oluşan farklı gerilmeleri değerlendirerek, yapıda kırılma (hasar) olup olmayacağının belirlenmesi amacıyla bir **Kırılma İndeksi (Kİ)** tanımlanmaktadır. Bu indeks;

$$Kİ = F_1\sigma_x + F_2\sigma_y + F_3\sigma_z + 2F_{12}\sigma_x\sigma_y + 2F_{13}\sigma_x\sigma_z + 2F_{23}\sigma_y\sigma_z + F_{11}\sigma_x^2 + F_{22}\sigma_y^2 + F_{33}\sigma_z^2 + F_{44}\tau_{yz}^2 + F_{55}\tau_{xz}^2 + F_{66}\tau_{xy}^2 \quad (5.4)$$

denkleminde yararlanılarak belirlenmektedir(Chen ve ark. 2014). Burada;

$$F_1 = \frac{1}{(\sigma_{x\zeta}^u - \sigma_{x_b}^u)} \quad (5.5)$$

$$F_2 = \frac{1}{(\sigma_{y\zeta}^u - \sigma_{y_b}^u)} \quad (5.6)$$

$$F_3 = \frac{1}{(\sigma_{z\zeta}^u - \sigma_{z_b}^u)} \quad (5.7)$$

$$F_{12} = -\frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{\sigma_{x\zeta}^u \sigma_{x_b}^u \sigma_{y\zeta}^u \sigma_{y_b}^u}} \quad (5.8)$$

$$F_{13} = -\frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{\sigma_{x\zeta}^u \sigma_{x_b}^u \sigma_{z\zeta}^u \sigma_{z_b}^u}} \quad (5.9)$$

$$F_{23} = -\frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{\sigma_{y\zeta}^u \sigma_{y_b}^u \sigma_{z\zeta}^u \sigma_{z_b}^u}} \quad (5.10)$$

$$F_{11} = \frac{1}{\sigma_x^u \sigma_{x_b}^u} \quad (5.11)$$

$$F_{22} = \frac{1}{\sigma_y^u \sigma_{y_b}^u} \quad (5.12)$$

$$F_{33} = \frac{1}{\sigma_z^u \sigma_{z_b}^u} \quad (5.13)$$

$$F_{44} = \frac{1}{\tau_{yz}^u{}^2} \quad (5.14)$$

$$F_{55} = \frac{1}{\tau_{xz}^u{}^2} \quad (5.15)$$

$$F_{66} = \frac{1}{\tau_{xy}^u{}^2} \quad (5.16)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Denklemlerde yer alan $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ sırasıyla x, y ve z yönlerinde oluşan normal gerilmeler, τ_{xy} x ekseninde dik y eksenine yönünde oluşan kayma gerilmesi, τ_{xz} x eksenine dik z eksenine yönünde oluşan kayma gerilmesi, τ_{yz} y eksenine dik z eksenine yönünde oluşan kayma gerilmesini belirtmektedir. Kırılma indeksinde kullanılan yukarıdaki katsayıların belirlenmesinde kullanılan normal ve kayma gerilmeleri deneysel olarak belirlenmektedir. Bu çalışmada kullanılan E-Cam/Epoksi malzemesine ait mekanik özellikler Çizelge 5.4’de verilmiştir. Ayrıca bu katsayıların belirlenmesinde kullanılan u simgesi uç (limit) gerilme değerini, ç simgesi çekme gerilmesini, b simgesi ise basma gerilmesini ifade etmektedir(Chen ve ark. 2014).

Tsai-Wu kriterine göre hasar kontrolü için **Kİ** kriterinin belirlenmesi gerekmektedir. **Tsai-Wu** kriterine göre **Kİ** 1’den büyük olduğunda yapıda hasar olduğu kabul edilmektedir(Chen ve ark. 2014). Bu çalışmada, belirlenen koşullarda kanatta hasar oluşup oluşmayacağının değerlendirilmesinde bu kriterden yararlanılmaktadır. **Kİ** incelendiğinde çekme ve basma gerilmelerinden oluştuğu görülmektedir. Bu çalışmada basma gerilmelerinin kanada etkisinin yapılabilmesi için basma gerilmelerinin mutlak değeri dikkate alınmış olup her bir yükleme durumu için kanatta oluşan **Kİ** dağılımı belirlenerek kanadın hasar kontrolü yapılmıştır.

Çizelge 5.4. E-Cam/Epoksi malzeme mekanik özellikleri(Rajadurai, J.S. ve Thanigaiyarasu, G., 2009; Höyland,2010; ANSYS V15 Help)

Parametre/Büyüklik	Sembol	Değer
Kopma gerilmesi (Çekme) (MPa)	$\sigma_{x\zeta}^u$	1100
	$\sigma_{y\zeta}^u$	35
	$\sigma_{z\zeta}^u$	35
Kopma gerilmesi (Basma) (MPa)	σ_{xb}^u	-675
	σ_{yb}^u	-120
	σ_{zb}^u	-120
Kopma gerilmesi (Kayma) (MPa)	τ_{xy}^u	80
	τ_{xy}^u	46,154
	τ_{xy}^u	80
Elastisite modülü (GPa)	E_{xx}	34,412
	E_{yy}	6,531
	E_{zz}	6,531
Poisson oranı	ν_{xy}	0,217
	ν_{xz}	0,217
	ν_{yz}	0,336
Kayma modülü (GPa)	G_{xy}	3,433
	G_{xz}	2,433
	G_{yz}	1,698
Yoğunluk (kg/m ³)	ρ_m	2000

Mekanik davranış, bir malzeme ya da yapı bir yüke maruz kaldığında, malzeme ya da yapıda meydana gelen gerilme ve şekil değiştirmelerin incelenmesini ifade etmektedir. Başka bir ifadeyle bir elemanın maruz kalınan yükler altındaki direncinin analizidir. Rüzgâr türbin kanatları büyük sistemler olduğundan kanadın mekanik davranışının analitik yöntemlerle belirlenmesi zordur. Bu nedenle kanadın mekanik davranışının belirlenmesi için numerik sonlu elemanlar metodundan (SEM) yararlanılmaktadır.

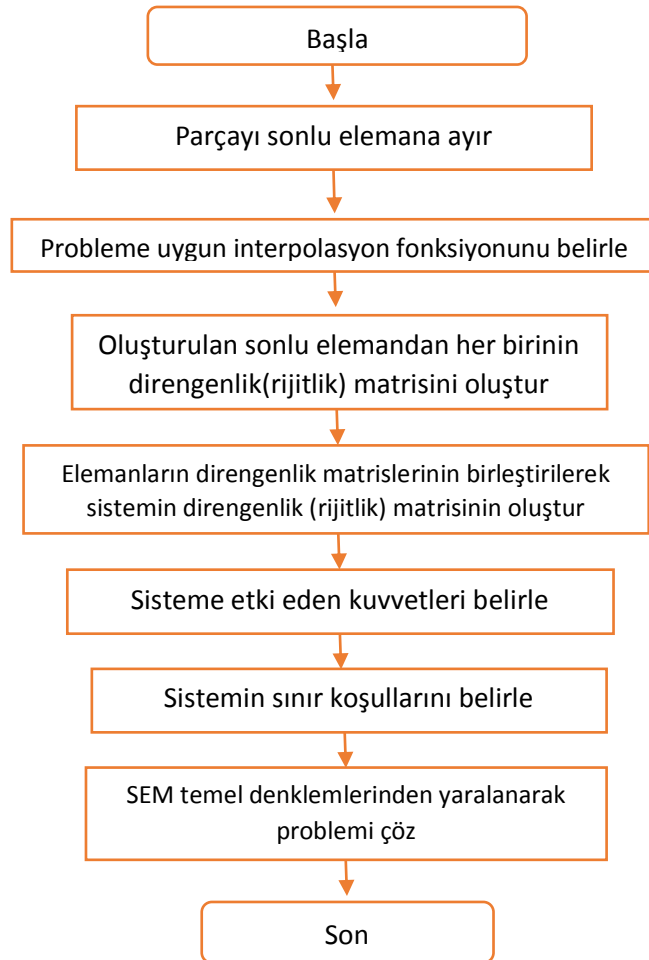
5.4.2 Sonlu elemanlar metoduyla mekanik analiz

Sonlu elemanlar metodu, karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılması ve her problemin kendi içinde çözülerek tam çözümün bulunduğu çözüm yöntemidir. Metodun üç temel niteliği vardır: İlk olarak, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi basit geometrik alt bölgeler ayrılmaktadır. İkinci olarak her elemanın temsilinde kullanılan sürekli fonksiyonlar tanımlanmaktadır. Üçüncü olarak ise problemin çözümü için istenilen değerlerin her elemanın belirli noktadaki (düğüm noktaları) değerleri bulunmaktadır. Kullanılan

yaklaşım fonksiyonları olarak genellikle polinom fonksiyonlar seçilmektedir. Seçilen polinom fonksiyonun derecesi çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlı olarak değişmektedir (Topçu ve Taşgetiren, 1998). Sonlu elemanlar metodu ile bir problemin çözümünde takip edilen adımlar Şekil 5.21’de özetlenmiştir.

Sonlu elemanlar metoduyla probleminin çözümünde kullanılan ilk adım eleman tipinin belirlenmesi ve çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrılmasıdır. Çözüm bölgesinin geometrik yapısı belirlenerek bu yapıya en uygun eleman tipi belirlenmelidir. Problemin çözümünden elde edilecek neticeler seçilen elemanların çözüm bölgesini temsili oranında problemi gerçeğe yaklaştırmaktadır. Bu nedenle problem tipine uygun elemanlar seçilerek problemin en uygun temsili sağlanmalıdır. Sonlu elemanlar metodunda çözüm bölgesinde genel olarak tek boyutlu, iki boyutlu, döl ve üç boyutlu elemanlar kullanılmaktadır (Topçu ve Taşgetiren, 1998).

Sonlu eleman probleminin çözümünde kullanılan ikinci adım interpolasyon fonksiyonunun seçimidir. İnterpolasyon fonksiyonu alan değişkeninin eleman üzerindeki değişimini temsil etmektedir. İnterpolasyon fonksiyonunun belirlenmesi seçilen eleman tipi ile çözülecek denklemin derecesine bağlıdır. Sonlu eleman problemlerinin çözümünde interpolasyon fonksiyonu olarak genellikle polinom fonksiyonlar seçilmektedir (Topçu ve Taşgetiren, 1998).



Şekil 5.21. Sonlu elemanlar metoduyla problem çözümü akış şeması

Sonlu eleman problemlerinin çözümünde kullanılan üçüncü adım eleman direngenlik matrisinin elde edilmesidir. Eleman direngenliğinin belirlenmesi, elemana etki eden dış etkenler ile alan değişkenleri arasında bir ilişki kurulmasını sağlamaktadır. Sonlu elemanlar metodunda problem tipine göre eleman direngenliği değişmektedir. (Topçu ve Taşgetiren, 1998).

Sonlu eleman probleminin çözümünde kullanılan dördüncü adım sistem direngenlik matrisinin oluşturulmasıdır. Sistem direngenlik matrisi sistemin düğüm sayısı ve her düğümdeki serbestlik derecesine bağlı olarak belirlenmektedir. Elemanlar için hesaplanan direngenlik matrisleri, elemanın üzerindeki düğüm numaralarına bağlı olarak genel direngenlik matrisinde ilgili satır ve sütuna yerleştirilmektedir. Farklı elemanlar tarafından ortak kullanılan düğümlerdeki terimler sistemin direngenlik matrisinin ilgili satır ve sütunda üst üste toplanmalıdır. Elemanların düğüm numaralaması bir sistematığe göre yapılırsa sistemin direngenlik matrisinde elemanlar diyagonal eleman üzerinde üst üste toplanmalıdır. Sistemin direngenlik matrisi genel olarak diyagonal elemana göre simetriktir (Topçu ve Taşgetiren, 1998).

Sonlu eleman probleminin çözümünde kullanılan beşinci adım sisteme etki eden kuvvetlerin (yüklerin) belirlenmesidir. Sisteme etki edecek kuvvetler tekil yükler, yayılı yükler ya da kütle yükleri şeklinde olmaktadır. Sisteme etki eden bu kuvvetler etki ettiği elemanın hangi düğüme ne yönde etki ediyorsa genel kuvvet vektöründe de aynı düğüme karşılık gelen satıra yerleştirilmelidir (Topçu ve Taşgetiren, 1998).

Sonlu eleman probleminin çözümünde kullanılan altıncı adım sınır şartlarının (sınır koşulları) belirlenmesidir. Her problemin tabii ya da yapay sınır şartları vardır. Sınır şartları, cismin çeşitli kısımlarında elastik yer değiştirmelerin ölçülebileceği bir referans sağlamaktadır. Sınır şartları cismin belli parçasında veya parçalarındaki yer değişimlerinde yapılan kısıtlamalar olarak tanımlanmaktadır. Bu kısıtlamalar, cismin rijit yer değiştirmesine engel olarak uygulanan dış yüklerin cisim tarafından taşınmasını sağlamaktadır (Topçu ve Taşgetiren, 1998).

Sonlu eleman probleminin çözümünde kullanılan son adım ise sistem denkleminin çözümüdür. Çözüm, sistemin sınır şartları dikkate alınarak direngenlik matrisinin tersinin alınması işlemidir. Bilgisayar kapasitesi ve zaman açısından çok büyük matrislerin tersini almak yerine Gauss Eliminasyon yöntemini kullanmak çözümün daha az kapasite ve daha kısa sürede yapılmasını sağladığından sonlu eleman problemlerinin çözümünde genel olarak Gauss Eliminasyon metodu kullanılmaktadır. (Topçu ve Taşgetiren, 1998).

Günümüzde sonlu elemanlar metodu yardımıyla analizler yapmak için çeşitli ticari yazılımlar geliştirilmiştir. Bu yazılımlardan **ANSYS** ürünlerin mukavemet, mekanik, titreşim

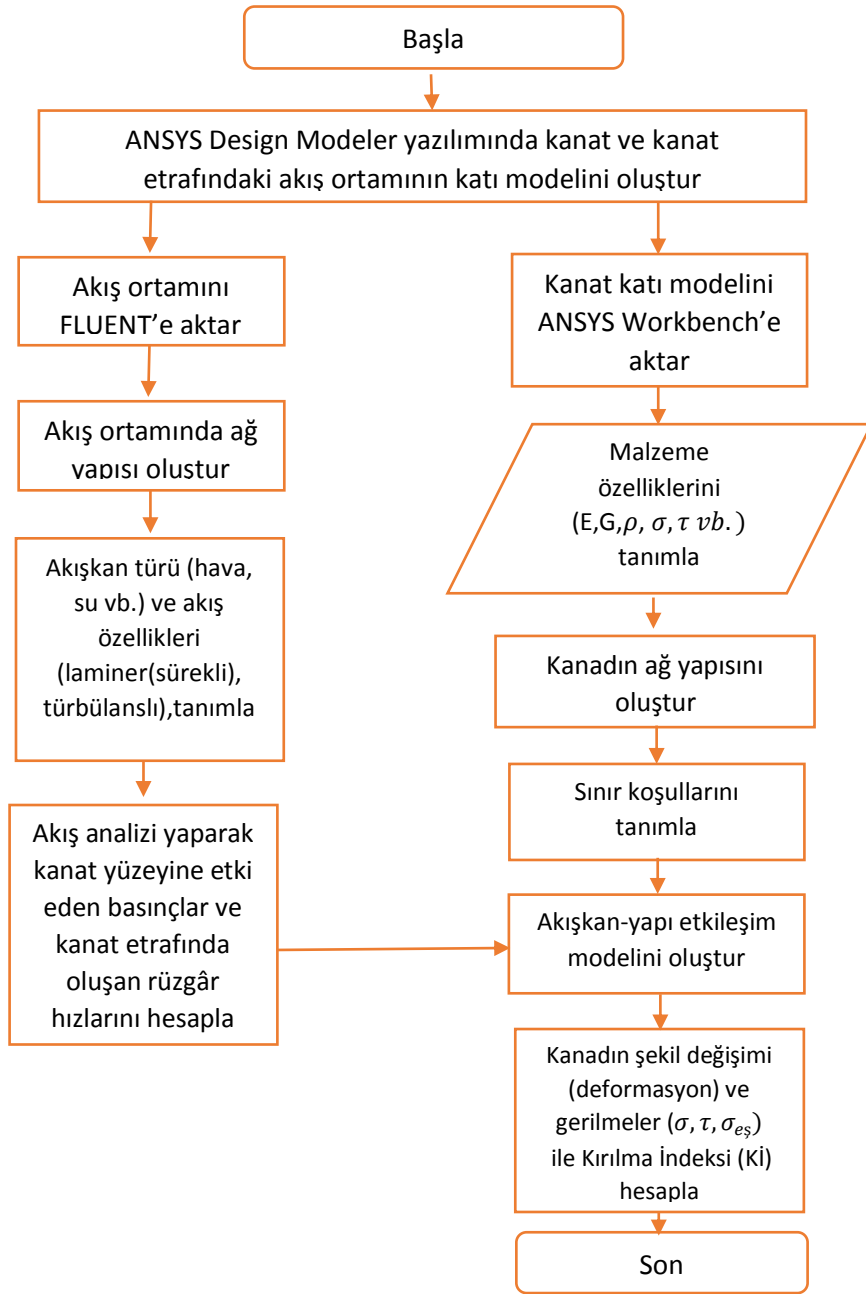
gibi yönlerden incelenmesini sağlayarak tasarım geliştirmeye yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada kanadın mekanik davranışının belirlenmesinde sonlu elemanlar metodunu esas alan **ANSYS Workbench** yazılımı kullanılarak kanadın statik analizi yapılmıştır.

5.4.3 Sonlu elemanlar metoduyla kanadın mekanik davranışı

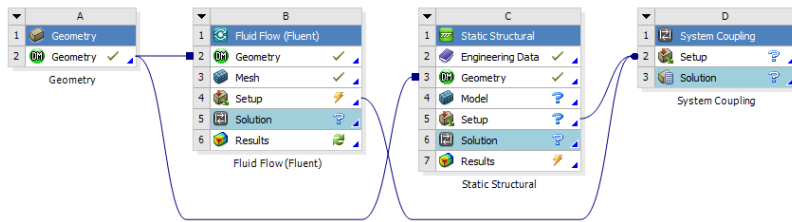
Bu çalışmada rüzgâr türbin kanadının mekanik davranışının belirlenmesi amacıyla **ANSYS Workbench** yazılımında akışkan-yapı etkileşimi (FSI) analizi yapılmaktadır. Kanadın akışkan-yapı etkileşiminde amaç, akış analizi ile belirlenen kanada etki eden aerodinamik yüklerin (kanat yüzeyinde oluşan basınçlar) kanadın mekanik davranışına etkisini tespit ederek belirlenen basınçları kanadın statik analizine aktarmaktır. **ANSYS Workbench** programında aerodinamik yükler (akış analizi sonucu kanat yüzeyinde oluşan basınçlar) ile yerçekimi yüklerinin kanadın mekanik davranışına etkisini belirlemek amacıyla akışkan-yapı etkileşim analiz modeli oluşturulmalıdır. **ANSYS Workbench** programında akışkan-yapı etkileşim analizinin akış şeması Şekil 5.22’de verilmiştir.

Sonlu elemanlar metoduyla mekanik davranışın belirlenmesinde kullanılan sınır koşulları modelin çalışma şartlarının sonlu elemanlar üzerinde tanımlanmasıdır. Bu sınır koşulları mesnetler (ankastre, hareketli vb.) ve yükler (kuvvet, basınç, moment vb.) olarak modele uygulanmaktadır. Bu çalışmada sınır koşulları olarak kanadın bağlantı noktasından mesnetlendiği, kanada yerçekimi yükleri ve aerodinamik yüklerin (akışkan-yapı etkileşim yükü) etki ettiği tanımlanmıştır.

Sınır koşulları tanımlandıktan sonra ise oluşturulan akışkan-yapı etkileşim modeliyle ise kanadın farklı rüzgar hızlarındaki şekil değişimi ile kanatta oluşan gerilmeler belirlenmiş olup Tsai-Wu kriterine göre kanadın hasar kontrolü yapılmıştır. Bu çalışmada oluşturulan akışkan-yapı etkileşim analizi için **ANSYS Workbench** programında oluşturulan model Şekil 5.23’de verilmiştir.



Şekil 5.22. ANSYS Workbench'de akışkan-yapı etkileşim analizi akış şeması



Şekil 5.23. Kanadın akışkan-yapı etkileşimi analizi için ANSYS Workbench'de oluşturulan model

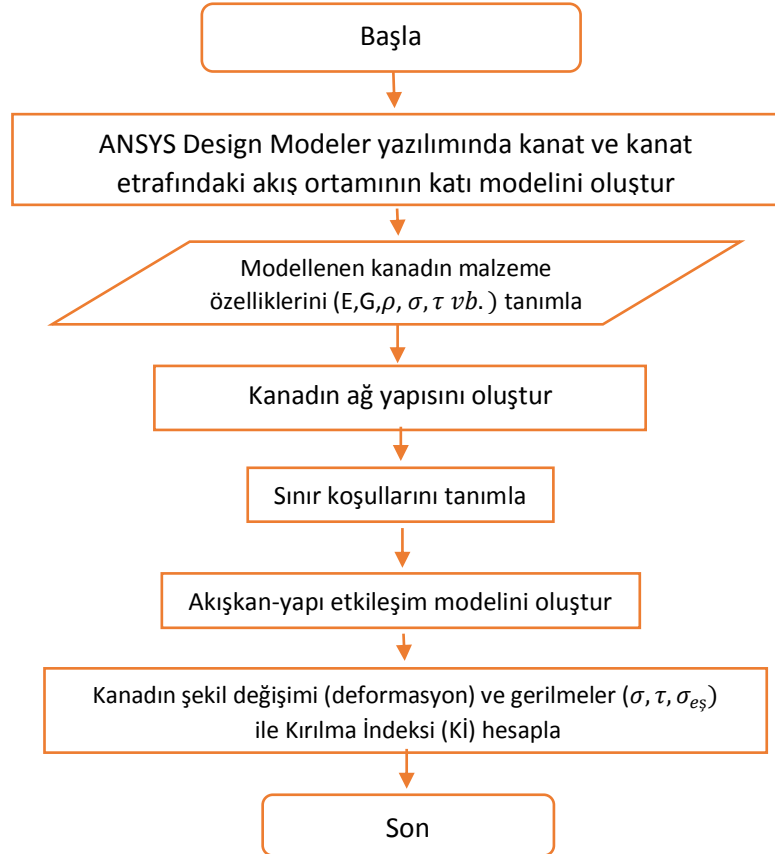
Şekildeki akışkan-yapı analizi için ANSYS Workbench yazılımında oluşturulan model, kanadın akış analiziyle statik analizinin birleştirilmesini sağlamaktadır. Bu model

oluşturularak farklı rüzgar hızlarında kanada etki eden aerodinamik yüklerin doğru bir şekilde belirlenerek kanadın statik analizine aktarımı sağlanmaktadır.

Akışkan-yapı etkileşim analizinde, aerodinamik yüklerin etkisinin değerlendirilmesinde akış analizi sonucu kanat yüzeyinde oluşan basınçlar kullanılmaktadır. Bu basınçlar akış ortamının iç yüzeyinde (akış ortamından kanat geometrisinin çıkarıldığı yüzeyler) oluşan basınçlar olup kanada etki eden aerodinamik yükleri temsil etmektedir. Kanadın geometrik özellikleri daha önce programa tanımlandığından kanada etki eden bu basınçlar program tarafından kanat yüzeyine etki eden aerodinamik kuvvetlere dönüştürülerek kanat yüzeyine uygulanmaktadır.

Bu çalışmada ayrıca kanada etki eden aerodinamik yüklere ek olarak yerçekimi yükleri de dikkate alınmaktadır. Bu yüklerin kanadın mekanik davranışına etkisini tanımlamak amacıyla kanadın statik analizi yapılmaktadır. Kanadın statik analizinin akış şeması Şekil 5.24’de verilmiştir.

Kanadın statik analizinde kullanılan sınır koşulları kanadın çalışma koşullarının sonlu elemanlar üzerine tanımlanması şeklinde olup bu problemde kullanılan sınır koşulları ilerleyen kısımlarda izah edilmiştir.



Şekil 5.24. Kanadın statik analizinin akış şeması

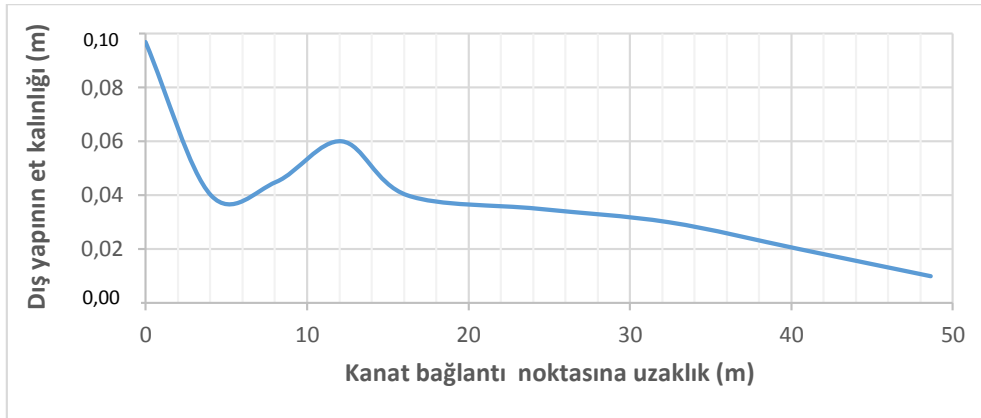
Rüzgar türbinlerinde, kanada rüzgâr kaynaklı yükler (**aerodinamik yükler**), kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan yükler(**yerçekimi yükü**) ve kanadın dönme hareketinden kaynaklanan yükler (**santrifüj yükü**) etki etmektedir. Rüzgar türbinlerinde kanada gelen yüklerin büyüklüğü ve doğrultusu zamana bağlı olarak değişebilir. Bu durumda kanadın mekanik davranışının belirlenmesi amacıyla dinamik analiz yapılmalıdır. Bu çalışmada kanada statik halde aerodinamik yükler ve yerçekimi yüklerinin etki ettiği kabul edilmiş olup kanadın statik analizi yapılmıştır. Kanadın statik analiz adımları aşağıda verilmiştir.

1- ANSYS Design Modeler yazılımında oluşturulan kanat katı modeli **ANSYS Workbench** yazılımına aktarılır.

Aktarılan kanat katı modeli 5947,57 ton'luk bir kütleye sahiptir. Bu değer kanadın katalog değerleri ile karşılaştırıldığında katı modeli oluşturulan kanadın gerçekten 150 kg kadar düşük olduğu görülmektedir. Ancak kanat tasarımı ile ilgili yeterli bilgi bulunamadığından kanat ağırlığı bu şekilde kabul edilmiştir.

2- Kanat dış yapısının değişken et kalınlığı için bir **thickness operasyonu tanımlanır.** Bu işlem sayesinde kanadın et kalınlığının kanat bağlantı noktasında en büyük, kanat ucunda ise en küçük olması sağlanmaktadır.

Modern rüzgar türbin kanatları kök kısmında en büyük uç kısmında ise en düşük et kalınlığına sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu çalışmada kanadın dış yapısının et kalınlığının belirlenmesinde (Sun ve ark. 2009; Lanting, 2011 ile Chen ve ark. 2013) çalışmalarından yararlanılmış olup 2 MW'lık kanadın et kalınlığının kanat uzunluğu boyunca değişimi Şekil 5.25'de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan kanat dış yapısının et kalınlığı bağlantı noktasında en yüksek (0,098m) kanat ucunda en düşüktür (0,01m).

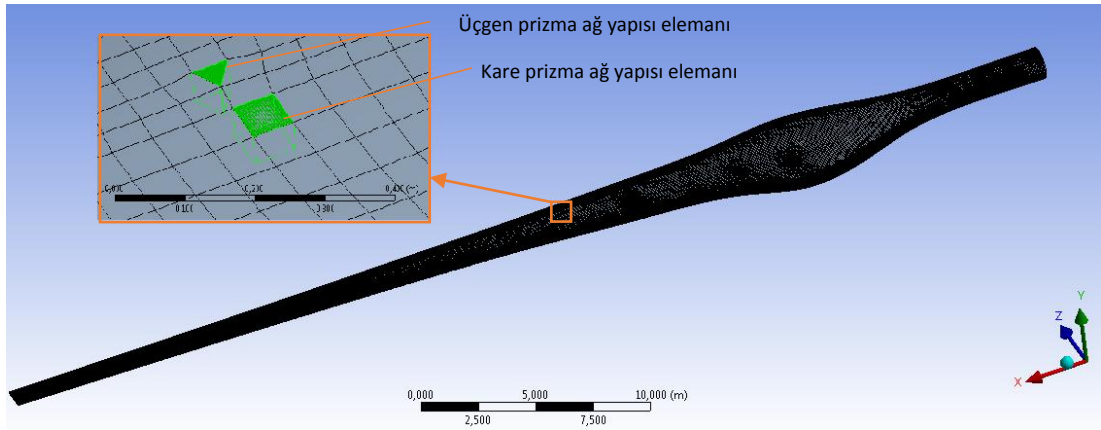


Şekil 5.25. Dış yapının et kalınlığının değişimi (Chen ve ark. 2013)

3- Kanadın malzeme özellikleri ($\sigma_{em}, \tau_{em}, E, \theta, G, \rho$) tanımlanır. Bu çalışmada kanat malzemesi olarak E-Cam/Epoksi kompozit malzeme kullanılmış olup bu malzemenin özellikleri ve imalatı bölüm 4.3’de özetlenmiştir.

4- Kanadın ağ yapısı oluşturulur.

- Burada oluşturulan ağ yapısı kanadın aerodinamik performansının belirlenmesi kısmında oluşturulan ağ yapısından farklıdır. Aerodinamik performansının belirlenmesi amacıyla oluşturulan ağ yapısı, akış ortamında oluşturulan ağ yapısı iken bu kısımda ise kanadın ağ yapısı oluşturulmaktadır.
- Kanatta ağ yapısı, dış yapı ve iç destek elemanlarında oluşturulmakta olup kanat içindeki boşluklarda ağ yapısı oluşturulmamaktadır.
- Kanat geometrisi düzgün olmadığından bu kısımda da ağ yapısının oluşturulmasında üçgen dörtyüzlü (üçgen prizma) eleman ve altıyüzlü (dörtgen prizma) birlikte kullanılarak ağ oluşturulmuştur (Şekil 5.26).
- Kanadın ağ yapısında hangi sonlu elemanda üçgen hangi sonlu elemanda kare prizma eleman kullanılacağı program tarafından otomatik olarak seçilmektedir.



Şekil 5.26. Kanadın mekanik davranışının belirlenmesi için oluşturulan ağ yapısı

5- Kanada etki eden yükler tanımlanır.

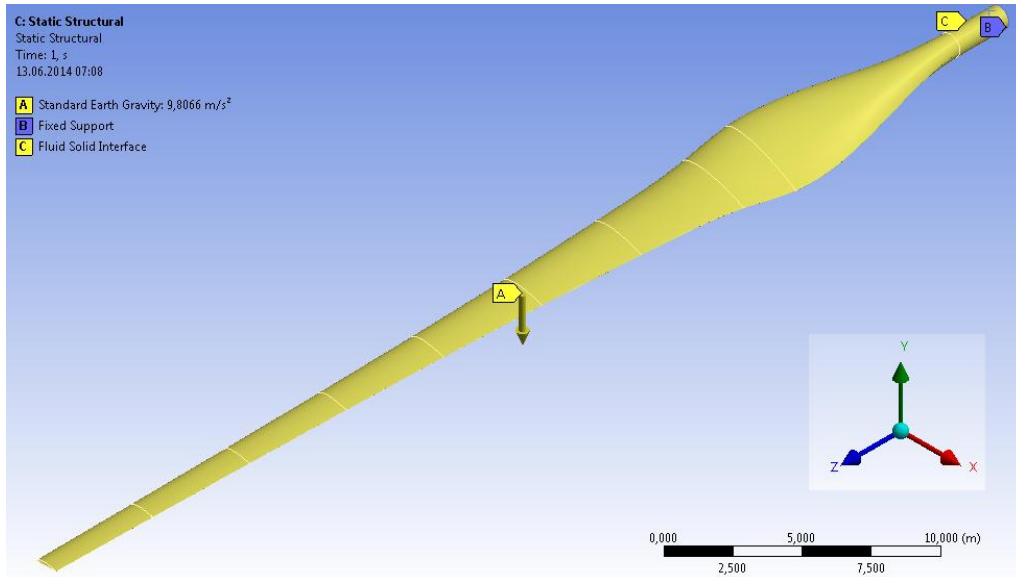
Bu çalışmada kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan **yerçekimi yükü** ve rüzgârdan kaynaklanan **aerodinamik yükler** dikkate alınmaktadır.

- Kanada etki eden yerçekimi yükünü değerlendirmek için kanada $-y$ yönünde yerçekimi ivmesi (Standart earth gravity) tanımlanır (Şekil 5.27).
- ANSYS Workbench yazılımına kanat geometrisi ve kanadın malzeme özellikleri (ρ vb.) tanımlandıktan sonra program tarafından kanadın kütlesi, hacmi ve ağırlık merkezi gibi büyüklükler hesaplanmaktadır.

- Kanada yer çekimi ivmesi tanımlandıktan sonra ise program (Denklem 4.25-27)'den yararlanarak kanada etki eden yerçekimi yükünü belirleyerek kanada etki ettirilmesini sağlamaktadır.
- Kanada etki eden aerodinamik yükleri değerlendirmek için ise kanada akışkan-yapı etkileşimi (fluid structure interface) yükü tanımlanır (Şekil 5.27).

Akışkan-yapı etkileşim yükü kanada etki eden rüzgar kaynaklı aerodinamik yükler olup bu yüklerin belirlenmesi amacıyla sistem birleştirme (System Coupling) işleminden yararlanılmaktadır. Bu şekilde kanada etki eden aerodinamik yüklerin doğru bir şekilde belirlenerek statik analize aktarımı sağlanmaktadır. Kanadın mekanik davranışının belirlenmesi için tanımlanan sistem birleştirme işlemi ilerleyen kısımlarda izah edilecektir.

- 6- Problemin sınır koşulları tanımlanmalıdır. Bu çalışmada sınır koşulları olarak ise, kanadın rotor bağlantı noktasından mesnetlendiği (fixed support) (Şekil 5.27) kabul edilmiştir.



Şekil 5.27. Sisteme etki eden yükler ve belirlenen sınır koşulları

Şekilde A ile kanada etki eden yer çekim ivmesi verilmiş olup kanadın statik analizine yerçekimi ivmesi eklenerek kanada etki eden **yerçekimi yükü** tanımlanmıştır. Şekilde B ile kanadın sabitlendiği nokta gösterilmiş olup kanadın bağlantı noktasından mesnetlendiği kabul edilmiştir. Şekilde C ile ise kanadın bütün dış yüzeyine etki eden akış-yapı etkileşim yükü gösterilmektedir.

- 7- Solution kısmına **total deformation** (x, y ve z yönlerindeki şekil değişiminin birleşimi), **normal stress** (σ_{xx}), **Shear stress** (τ_{xy}), **Equivalent Stress** (Von-mises gerilmesi) (normal gerilme ve kayma gerilmesinin bileşimi σ_{es}) eklenir (Şekil 5.28).

ANSYS yazılımında, kanadın X, Y ve Z eksenlerindeki şekil değişimleri (deformasyonlar) ile bu şekil değişimlerinin bileşkesi (toplam şekil değişimi), normal gerilmeler (σ_{xx} , σ_{yy} ve σ_{zz}), kayma gerilmeleri (τ_{xy} , τ_{yz} ve τ_{xz}) ve Maksimum Normal Gerilme Hipotezi, Maksimum Şekil Değiştirme Hipotezi, Maksimum Kayma Gerilmesi Hipotezi ve Maksimum Şekil Değiştirme Enerjisi Hipotezi'ne (Von-Mises gerilmesi) göre eşdeğer gerilmeler belirlenebilmektedir. Bu çalışmada bu büyüklüklerden toplam şekil değişimi, σ_{xx} normal gerilmesi, τ_{xy} kayma gerilmesi ve Von-Mises gerilmelerinin belirlenecektir. Bu nedenle solution kısmına bu büyüklükler eklenmiştir (Şekil 5.28).

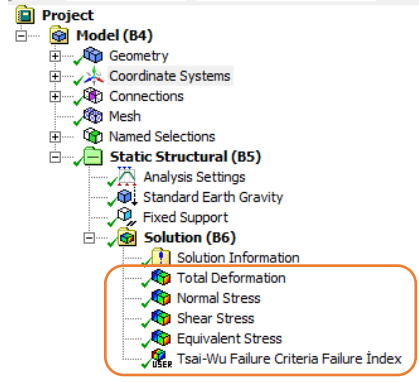
Kanat, gelen rüzgar etkisiyle kanadın şeklinden dolayı burulmaya da zorlanmaktadır. Bu nedenle kanatta normal gerilmelerin yanında **kayma gerilmeleri (τ)** de oluşmaktadır. Kanada etki eden burulma yükü rüzgar kaynaklı olup kanadı x ekseninde y eksenine doğrultusunda burulmaya zorlamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada kayma gerilmelerinin de belirlenmesi istenmektedir.

8- Kırılma İndeksi dağılımının belirlenmesi amacıyla Solution kısmına **User-defined result** eklenmiş ve kanadın kırılma indeksi dağılımı belirlenmiştir.(Şekil 5.28).

ANSYS **Workbench** yazılımında **Tsai-Wu** kriterine (Maksimum Şekil Değiştirme Enerjisi kriteri) göre yapının hasar kontrolü doğrudan yapılamamakta olup bu kritere göre hasar kontrolü için **Kırılma İndeksi (Kİ)** bağıntısının (Denklem 5.4) **User defined result** kısmına tanımlanması gerekmektedir.

Kırılma İndeksi (Kİ) bağıntısı, malzemenin emniyet değerlerine göre belirlenen sabit katsayılar ($F_1, F_2, F_3, F_{12}, F_{13}, F_{23}, F_{11}, F_{22}, F_{33}, F_{44}, F_{55}, F_{66}$) ve program tarafından belirlenen yükleme durumuna göre değişik değerler alabilen büyüklüklerden ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}$ ve τ_{xz}) oluşmaktadır.

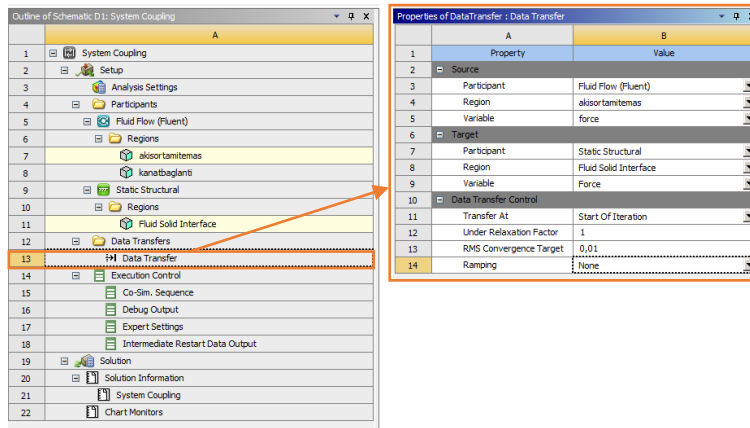
Bu çalışmada **Kırılma İndeksi (Kİ)** bağıntısındaki sabit katsayılar (Denklem 5.5-5.16) matematiksel programlama yazılımı olan **MATLAB**'da hesaplanmış olup belirlenen katsayılar **User-defined result** kısmına tanımlanan **Kırılma İndeksi (Kİ)** bağıntısında yerine yazılarak kanadın **Kırılma İndeksi (Kİ)** dağılımı belirlenmiştir.



Şekil 5.28. Kanadın mekanik davranışının belirlenmesi için seçilen parametreler

9- Akış analizi sonucu belirlenen, basınç dağılımlarının kanadın statik analizine aktarılması için **sistem birleştirme (System Coupling)** işlemi tanımlanır (Şekil 5.29).

- Akış ortamının iç yüzeyi kanadın dış yüzeyi olduğundan akış analizi sonucu elde edilen basınçlar akış ortamının iç yüzeyinde (akış ortamından kanat geometrisinin çıkarıldığı yüzeyler) oluşan basınçlar olup kanada etki eden aerodinamik yükleri temsil etmektedir.
- Sistem birleştirme işlemi akış ortamının iç yüzeyindeki basınçların kanadın dış yüzeyine (fluid-structure interference) aktarımı sağlanmaktadır.
- Kanadın geometrik özellikleri daha önce programa tanımlandığından kanada etki eden bu basınçlar kanat yüzeyine etki eden kuvvetlere dönüştürülerek kanat yüzeyine uygulanmaktadır. Bu kuvvetler kanada etki eden aerodinamik kuvvetlerdir.



Şekil 5.29. Sistem birleştirme işlemi

Sistem birleştirme işleminden sonra **ANSYS Workbench** yazılımında çözüm yaptırılarak kanadın istenilen rüzgar hızındaki mekanik davranışı (şekil değişimi ve gerilmeler) belirlenmektedir. Aynı işlemler kanadın akış ortamına girişindeki rüzgar hızları değiştirilerek farklı rüzgar hızlarında kanadın mekanik davranışı tespit edilebilmektedir.

Ayrıca bu çalışmada rüzgarsız ortamda (0 m/s'lik rüzgar hızı) kanadın mekanik davranışı da değerlendirilmiştir. Bu analizle kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan yerçekimi kuvvetleri etkisi altındaki mekanik davranışının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla kanada etki eden aerodinamik kuvvetlerin belirlenmesine ihtiyaç olmadığından bu kısımda sadece yerçekimi yükü etkisi altındaki kanadın statik analizi yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında farklı rüzgar hızlarında (0, 5, 15, 25 ve 50 m/s) yapılan analizler sonucu belirlenen şekil değişimleri, gerilmeler ve elde edilen diğer sonuçlar bulgular bölümünde tartışılacaktır.

5.5 Kanadın Tasarım Optimizasyonu

Tasarım, bir ürünün tümü ya da bir parçası veya üzerindeki çizgi, şekil, biçim, renk, doku, malzeme veya esneklik gibi insan duyuları ile algılanan çeşitli özelliklerinin oluşturduğu bütünü ifade etmektedir. Optimizasyon ise latince bir kelime olup nihai, ideal manasına gelmekte olup bir problemin en iyi çözümünü veya tasarımını bulma işlemi olarak tanımlanmaktadır.

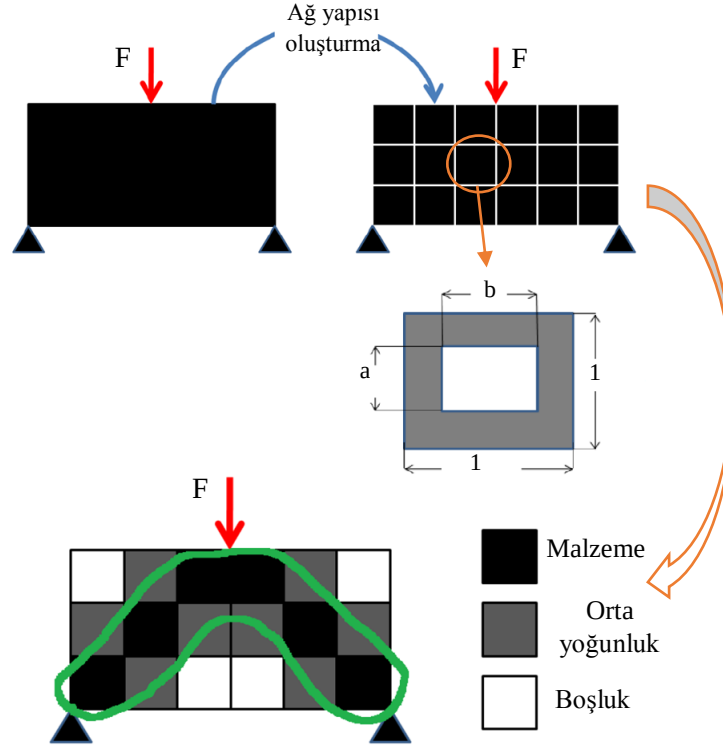
Tasarım optimizasyonu günümüzde ürün tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tasarım optimizasyonu, geleneksel deneme-yanılma metoduyla tasarımın aksine tasarımın bilimsel olarak yapılmasını sağlamaktadır. Tasarım optimizasyonu metodlarından topoloji optimizasyonu ise tasarımın ilk aşamasında kullanılan bir yapıdaki en uygun malzeme dağılımının belirlenmesini sağlayan metottur.

Rüzgar türbinlerinden daha fazla güç elde edilmesi amacıyla kanat boyutları sürekli olarak büyümektedir. Bu büyümeye paralel olarak ise kanadın ağırlığı dolayısıyla da kanada etki eden yükler artmakta ve kanat daha fazla zorlanmaktadır. Bu nedenle günümüzde kanat tasarımında optimizasyon işleminin önemi artmıştır. Bu amaçla, bu çalışmada **ANSYS** yazılımında daha önceden de belirtildiği gibi dış yapı ve iç destek yapı olmak üzere iki ana bileşenden oluşan kanadın iç destek yapısı için tasarım optimizasyonu metodlarından topoloji optimizasyonu uygulaması yapılacaktır.

5.5.1 ANSYS yazılımında topoloji optimizasyonu

Günümüzde yaygın olarak kullanılan bilgisayar destekli mühendislik yazılımlarından birisi olan ANSYS yazılımında bir yapının ağırlığını azaltmak ya da yapının doğal frekansının değiştirilmesi amacıyla topoloji optimizasyonu yapılabilmektedir. ANSYS yazılımında topoloji optimizasyonunda yoğunluk metodundan yararlanılmaktadır. Bu metotta ilk olarak topoloji optimizasyonu yapılacak parçada ağ yapısı oluşturulmakta, daha sonra her bir elemana

yoğunluğuyla ilişkili bir rijitlik tensörü atanmaktadır. ANSYS yazılımı her bir elemanın yoğunluk değerini belirlemek için programlanmıştır. Programda her bir elemanın rijitlik değeri parçanın yükleme koşulları dikkate alınarak 0 (boşluk) ya da 1(malzeme) olacak şekilde ayarlanarak yapının optimum şekli belirlenmektedir. Şekil 5.30'da ANSYS yazılımında bir kirişin topoloji optimizasyonu adımları gösterilmiştir.

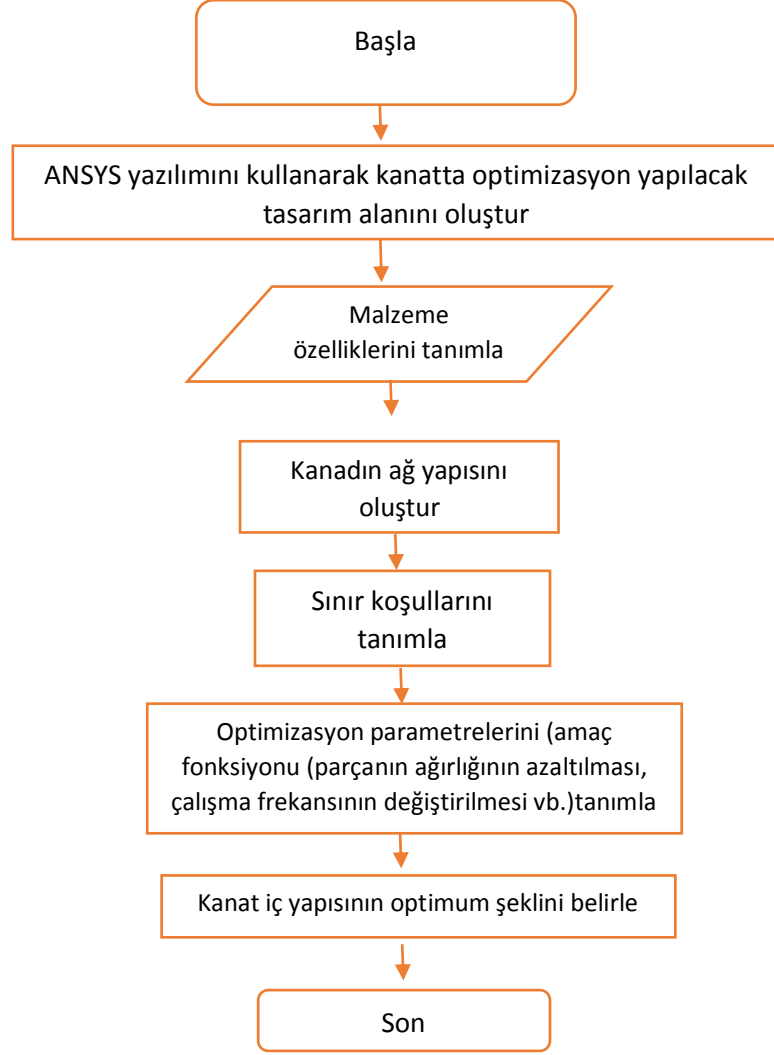


Şekil 5.30. Bir kirişin topoloji optimizasyonu (URL-15)

Şekildeki kirişin topoloji optimizasyonunda kirişte ilk olarak bir ağ yapısı oluşturularak her bir elemana yoğunluğuyla ilişkili bir rijitlik tensörü atanmıştır. ANSYS yazılımı verilen sınır koşullarını dikkate alarak yaptığı iteratif işlemler sonucu yapının optimum şeklini belirlemektedir. Şekilde en altta bulunan yapının optimum halinde, siyah kısımlar yapıda malzeme bulunması gereken bölgeleri, beyaz kısımlar ise yapıdan malzeme çıkarılabilecek bölgeleri yeşil olarak gösterilen bölge ise yapının optimum hali belirtmektedir. Topoloji optimizasyonu sonrası yapının optimum malzeme dağılımı şekilde yeşil renkli olarak gösterilen kısımdır.

5.5.2 ANSYS yazılımında kanadın topoloji optimizasyonu

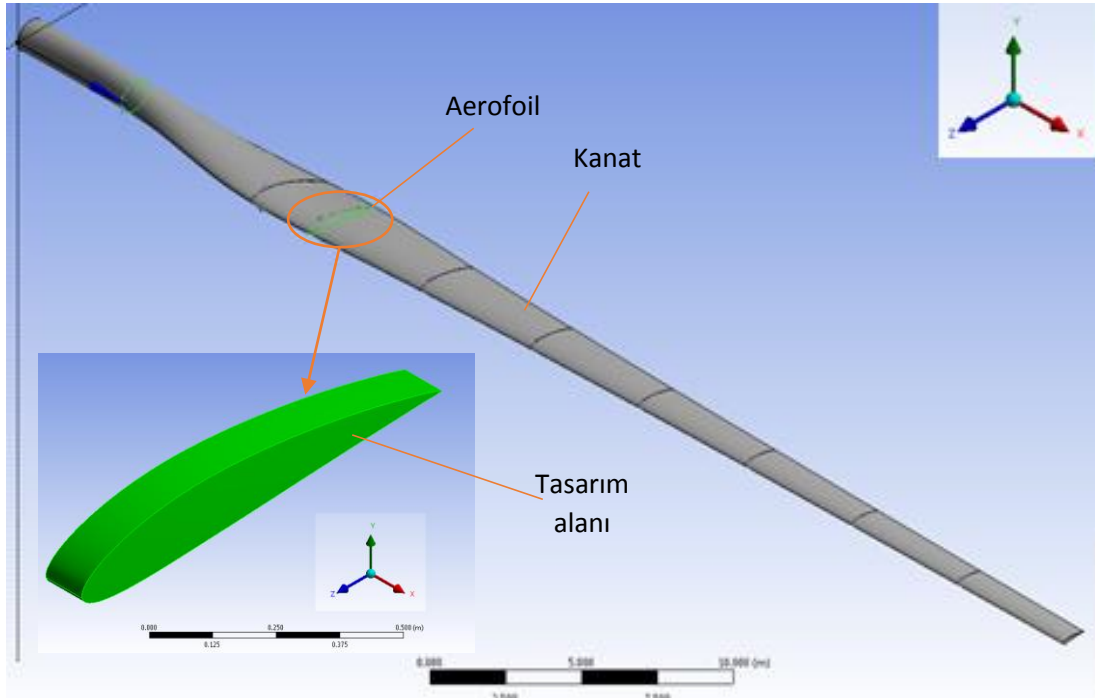
ANSYS yazılımında topoloji optimizasyonu uygulamasında yoğunluk metodu kullanılmakta olup, bu yazılımla topoloji optimizasyonu için Şekil 5.31'de gösterilen akış şeması izlenmelidir.



Şekil 5.31. ANSYS yazılımında kanadın topoloji optimizasyonu akış şeması

Rüzgar türbin kanatları önceki bölümlerde de ifade edildiği gibi dış yapı ve iç destek yapı olmak üzere iki bileşenden meydana gelmektedir. Kanat tasarımlarında dış yapı belirlenirken aerodinamik özellikler dikkate alınmaktayken iç yapının tasarımında yapısal özellikler (kanadın mukavemeti, dayanımı) dikkate alınmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada kanadın dış yapısında (aerofoil form) herhangi bir değişiklik yapılmadan, iç yapısının optimum şekli belirlenmeye çalışılmaktadır.

Kanadın iç yapısının topoloji optimizasyonu için ilk olarak tasarım alanının belirlenmesi gerekmektedir. Rüzgâr türbin kanatları, önceki kısımlarda da belirtildiği gibi bağlantı noktasında dairesel kesite, uç kısımda ise aerofoil kesite sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu çalışmada modellenen kanat, 0-0,1 r/R arasında dairesel kesit, 0,1-0,25 r/R arasında dairesel kesitten aerofoil kesite geçiş ve 0,25-1 r/R arasında aerofoil kesite sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Rüzgar türbin kanatlarının büyük bir kısmı aerofoil kesite sahip olacak şekilde tasarlanmakta olup, kanat uzunluğu boyunca bu kesiti oluşturan aerofoilin profil uzunluğu ve bağlama açısı değişmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada tasarım alanı olarak aerofoil geometrisi belirlenmiş olup, tasarım alanının optimizasyonu için kullanılan parametreler olarak bilinen tasarım değişkenleri bu tasarım alanının içerisinde bulunan malzemelerdir. Bu kısımda bu malzemelerin yapı içerisindeki optimum dağılımı belirlenmeye çalışılmaktadır. Şekil 5.32’de bu çalışmada katı modeli oluşturulan rüzgar türbin kanadı ve bu kanadı oluşturmada kullanılan bir aerofoil ile kanadın iç yapısının optimizasyonu için tasarım alanı olarak belirlenen tasarım alanı gösterilmiştir.

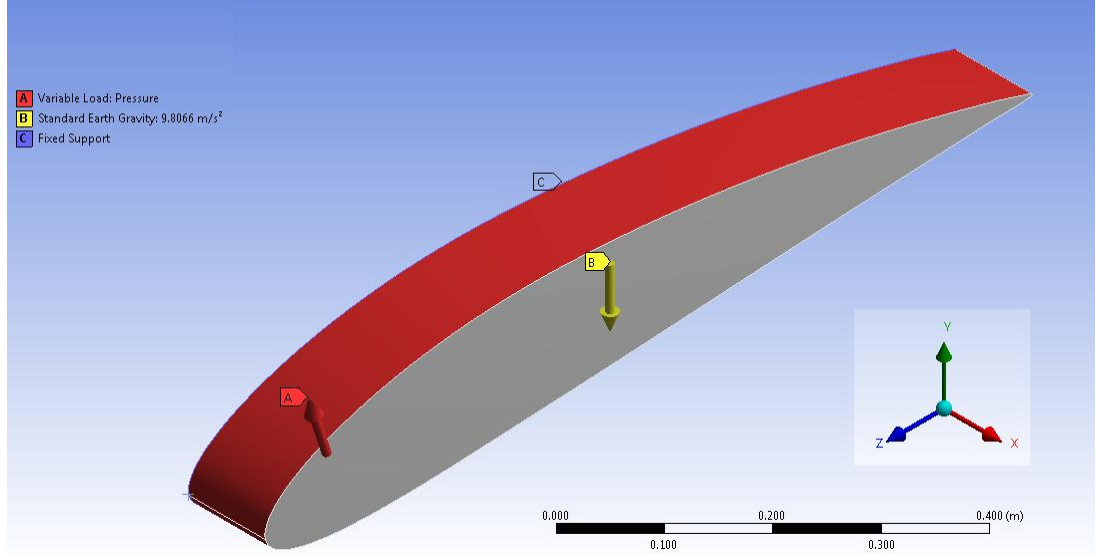


Şekil 5.32. Katı modeli oluşturulan kanat ve topoloji optimizasyonu için belirlenen tasarım alanı

Şekilde gösterilen tasarım alanı, kanatta optimizasyon yapılacak bölgeyi tanımlamaktadır. Bu çalışmada belirlenen tasarım alanının içindeki optimum malzeme dağılımı belirlenmeye çalışılmaktadır.

Kanadın iç yapısının topoloji optimizasyonunda ikinci olarak malzeme özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kanat malzemesi olarak E-Cam/epoksi kullanılmakta olup bu malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 5.4’de verilmiştir.

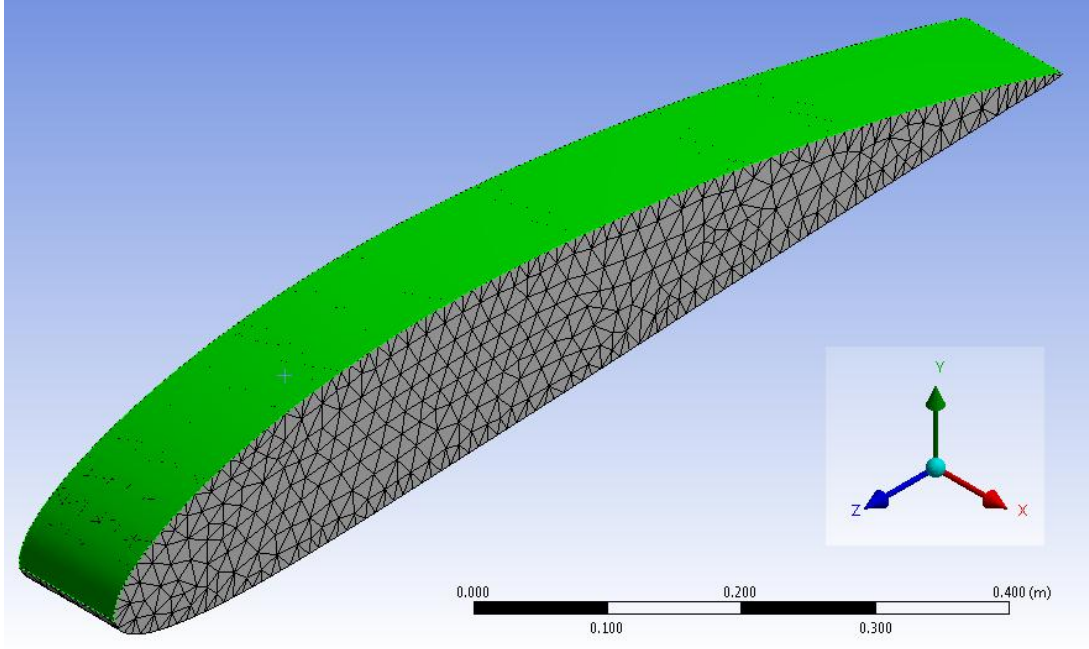
Kanadın iç yapısının topoloji optimizasyonunda üçüncü olarak sınır koşullarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada sınır koşulları olarak aerofoilin $-z$ yönündeki kenarının sabit (fixed support) olduğu, kanadın rüzgâr kaynaklı bir aerodinamik basınç kuvvetine kaldığı ve aerofoilin yerçekimi yüklerine maruz kaldığı kabul edilmekte olup belirlenen sınır koşulları Şekil 5.33’de gösterilmiştir.



Şekil 5.33. Topoloji optimizasyonu için belirlenen sınır koşulları

Şekildeki sınır koşullarından A aerofoile etki eden basınç yüklerini göstermekte olup bu yük aerofoilin kırmızı renkli olarak gösterilen kısmına etki etmektedir. Şekilde B ile aerofoilin ağırlık merkezinden aerofoile etki eden yerçekimi ivmesi gösterilmekte olup bu şekilde aerofoile etki eden yerçekimi yükleri tanımlanmaktadır. Şekilde C ile aerofoilin sabitlendiği nokta gösterilmekte olup bu çalışmada aerofoilin bu noktadan sabitlendiği kabul edilmektedir.

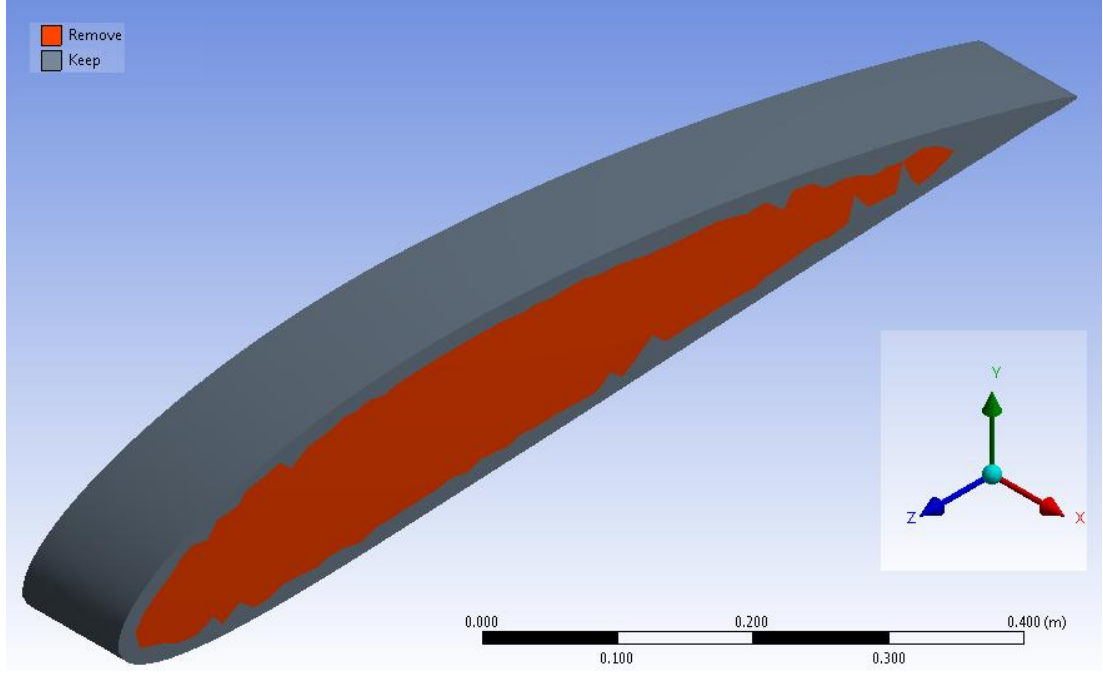
Kanadın topoloji optimizasyonu için son olarak belirlenen geometriye uygun ağ yapısının oluşturulması ve amaç fonksiyonunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada amaç fonksiyonu olarak kanadın ağırlığının azaltılması belirlenerek kanadın iç yapısının optimum şekli belirlenmeye çalışılmaktadır. Kanadın topoloji optimizasyonu için belirlenen ağ yapısı Şekil 5.34’de verilmiştir.



Şekil 5.34. Topoloji optimizasyonu için oluşturulan ağ yapısı

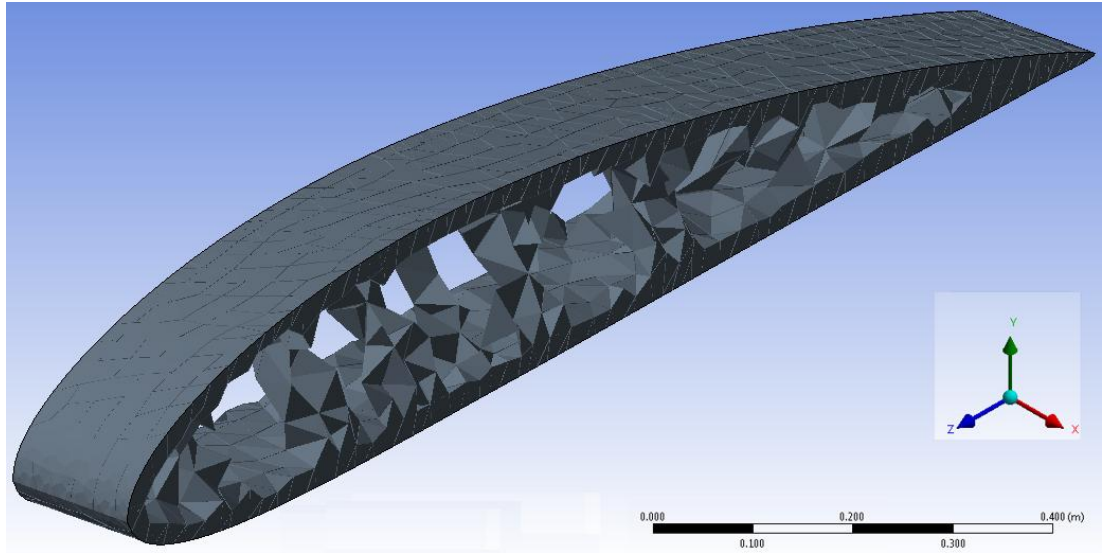
Şekildeki ağ yapısında kanat üzerindeki desenler kanatta oluşturulan ağ yapısını göstermektedir. Topoloji optimizasyonunda bu ağ yapısını oluşturan elemanlar kullanılarak yapının optimum malzeme dağılımı (hangi elemanların malzeme, hangi elemanların boşluk olacağı) belirlenmeye çalışılmaktadır. Topoloji optimizasyonunda kullanılan desenlerin sıklığı daha hassas sonuç elde edilmesini sağlamakta olup, bu desenlerin sıklığının artmasıyla optimizasyon işlemi için gereken zaman da artmaktadır. Bu çalışmada kullanılan geometri düzgün olmadığından ağ yapısı olarak üçgen elemanlar tercih edilmiş olup şekildeki ağ yapısı **7237 eleman** ve **13125 düğüm noktası**ndan oluşmaktadır.

Yukarıdaki optimizasyon parametreleri belirlendikten sonra kanadın en optimum iç yapısı **ANSYS** programı tarafından gerçekleştirilen iteratif işlemler neticesinde belirlenmekte olup bu işlemler sonucu yapıda oluşan malzeme ve boşluk dağılımı Şekil 5.35’de, aerofoilin optimum şekli ise Şekil 5.36’da gösterilmiştir.



Şekil 5.35. Topoloji Optimizasyonu sonucu belirlenen aerofoilin malzeme ve boşluk dağılımı

Şekildeki topoloji optimizasyonu sonucu belirlenen geometride turuncu renkli olarak gösterilen kısımlar yapıdan malzeme çıkarılabilecek bölgeleri, gri renkli olarak gösterilen kısımlar ise yapıda malzeme kalması gereken bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 5.36. Topoloji optimizasyonu sonucu belirlenen aerofoil geometrisi

Topoloji optimizasyonu sonucu belirlenen aerofoil geometrisi değerlendirildiğinde aerofoilin dış yapısının belirli bir et kalınlığına sahip olması gerektiği, iç yapısında ise şekildeki gibi destek yapıların bulunması gerektiği tespit edilmiştir.

5.6 Kanat Tasarım Sistematiği

Bu kısımda, bu çalışma kapsamında yürütülen kanat ve akış ortamı katı modelinin oluşturulması, kanadın aerodinamik performansının belirlenmesi, kanadın mekanik davranışının tespiti ve kanadın iç yapısının tasarım optimizasyonu gibi işlem adımlarından oluşan rüzgar türbin kanadı tasarım sistematiği kısaca aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

1- Kanat ve akış ortamı katı modellerinin oluşturulması

a. Kanat katı modelinin oluşturulması

- Kanat tasarım parametreleri belirlenir (L , β , λ , c , φ vb.)
- Kanat tasarımında kullanılacak aerofoil seçilerek, kanat katı modelini oluşturan istasyon noktalarına aerofoili oluşturan koordinatlar programa tanımlanır.
- Aerofoili oluşturan koordinatlar kullanılarak istasyon noktalarında aerofoil geometrisi oluşturulur.
- İstasyon noktalarındaki aerofoil geometrisi gerekli profil uzunluğuna sahip olacak şekilde büyütülerek gerekli bağlama açısına sahip olacak şekilde döndürülür.
- İstasyon noktalarındaki aerofoiller kanat geometrik olarak 1° 'lik ön eğilmeye sahip olacak şekilde konumlandırılır.
- İstasyon noktalarında oluşturulan aerofoillerden yararlanılarak kanat katı modeli oluşturulur.
- İstasyon noktalarının 0,25c ve 0,65c'lik profil uzunluklarında iki adet I profil giriş geometrisi oluşturulur.
- Oluşturulan I profil giriş geometrisi kanat boyunca uzatılarak iç destek elemanının katı modeli oluşturulur.

b. Akış ortamının katı modelinin oluşturulması

- Kanadın etrafında akış ortamının sınırlarını oluşturan kare kesitli bir geometri belirlenir.
- Belirlenen geometri kanat boyunca uzatılarak akış ortamının dış sınırlarını oluşturan dikdörtgen prizma şeklinde bir geometri oluşturulur.
- Oluşturulan geometriden, kanat katı modeli çıkarılarak akış ortamının katı modeli elde edilir.

2- Kanadın aerodinamik performansının belirlenmesi

- Akış ortamının katı modeli **FLUENT** yazılımına aktarılır.
- Aktarılan akış ortamında ağ yapısı oluşturulur.

- Akış analizi için sınır koşulları belirlenir
- Analizde kullanılacak akışkan türü tanımlanır.
- Akış tipi (laminer, türbülanslı vb.) tanımlanır.
- İterasyon sayısı girilerek problem çözdürülür ve kanat etrafındaki havanın hızları ile kanat yüzeyinde oluşan basınçlar belirlenir.

3- Kanadın mekanik davranışının belirlenmesi

- Kanat katı modeli **ANSYS Workbench** yazılımına aktarılır.
- Aktarılan kanat katı modelinin malzeme özellikleri tanımlanır.
- Malzeme özellikleri tanımlanan kanat katı modelinin ağ yapısı oluşturulur.
- Kanada etki eden yükler ve sınır koşulları tanımlanır.
- **Solution** kısmına program tarafından hesaplaması istenilen büyüklükler (şekil değişimi ve gerilmeler) eklenir.
- **Tsai-Wu** kriterine göre kanadın hasar kontrolü için **Kırılma İndeksi (Kİ)** bağıntısındaki (Denklem 5.4) kırılma indeksi katsayıları **MATLAB**'da belirlenerek **ANSYS Workbench** yazılımında solution kısmına **User-defined result** olarak tanımlanır.
- Akış analizi sonucu belirlenen basınç dağılımlarının kanadın statik analizine aktarılması için **sistem birleştirme (System Coupling)** işlemi tanımlanır.
- **ANSYS Workbench** yazılımında çözüm yaptırılarak kanadın istenilen rüzgar hızındaki mekanik davranışı (şekil değişimi (δ) ve gerilmeler ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}$ ve $\tau_{xz}, \sigma_{eş}$) ile hasar analizi için ve Kİ kırılma indeksi) belirlenir.

4- Topoloji optimizasyonu ile kanadın iç yapısının optimum şeklinin belirlenmesi

- **Design Modeler** yazılımında optimizasyon yapılacak geometrinin katı modeli oluşturulur.
- Oluşturulan katı model **ANSYS Workbench** yazılımına aktarılır.
- Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri tanımlanır.
- Optimizasyon yapılacak geometrinin ağ yapısı oluşturulur.
- Optimizasyon işlemi için sınır koşulları tanımlanır.
- Optimizasyon parametreleri (amaç fonksiyonu, sınırlayıcılar vb.) tanımlanır.
- Problem çözdürülerek kanat iç yapısının optimum şekli belirlenir.

6. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada 2MW'lık bir rüzgâr türbin kanadının tasarımı yapılarak bu tasarımın farklı rüzgâr hızlarındaki mekanik davranışı değerlendirilmiştir. Bu amaçla ilk olarak **Blade Dynamics** firmasının **D49** kanadının katalog bilgileri dikkate alınarak **ANSYS Design Modeler** yazılımında 2 MW'lık bir rüzgâr türbin kanadının katı modeli oluşturulmuştur. İkinci olarak **ANSYS FLUENT** yazılımından yararlanılarak seçilen kanadın farklı rüzgar hızlarındaki aerodinamik özellikleri belirlenmiştir. Üçüncü olarak **ANSYS Workbench** yazılımından yararlanılarak seçilen kanadın farklı rüzgâr hızlarındaki mekanik davranışı (kanadın şekil değişimi ve gerilmeler) değerlendirilmiştir. Bu amaçla **ANSYS Workbench** yazılımında akışkan-yapı etkileşim analiz modeli oluşturulmuştur. Bu modelden yararlanılarak kanadın rüzgârsız ortamdaki ve farklı rüzgâr hızlarındaki mekanik davranışı (kanatta oluşan şekil değişimleri ve gerilmeler) belirlenerek ve tasarlanan kanadın **Tsai-Wu** kırılma kriterine göre hasar kontrolü yapılmıştır. Bu çalışmada ayrıca rüzgar türbin kanadının iç destek yapısının optimum şeklinin belirlenebilmesi amacıyla tasarım optimizasyonu uygulanması yapılmıştır.

6.1 Kanadın Aerodinamik Performansı

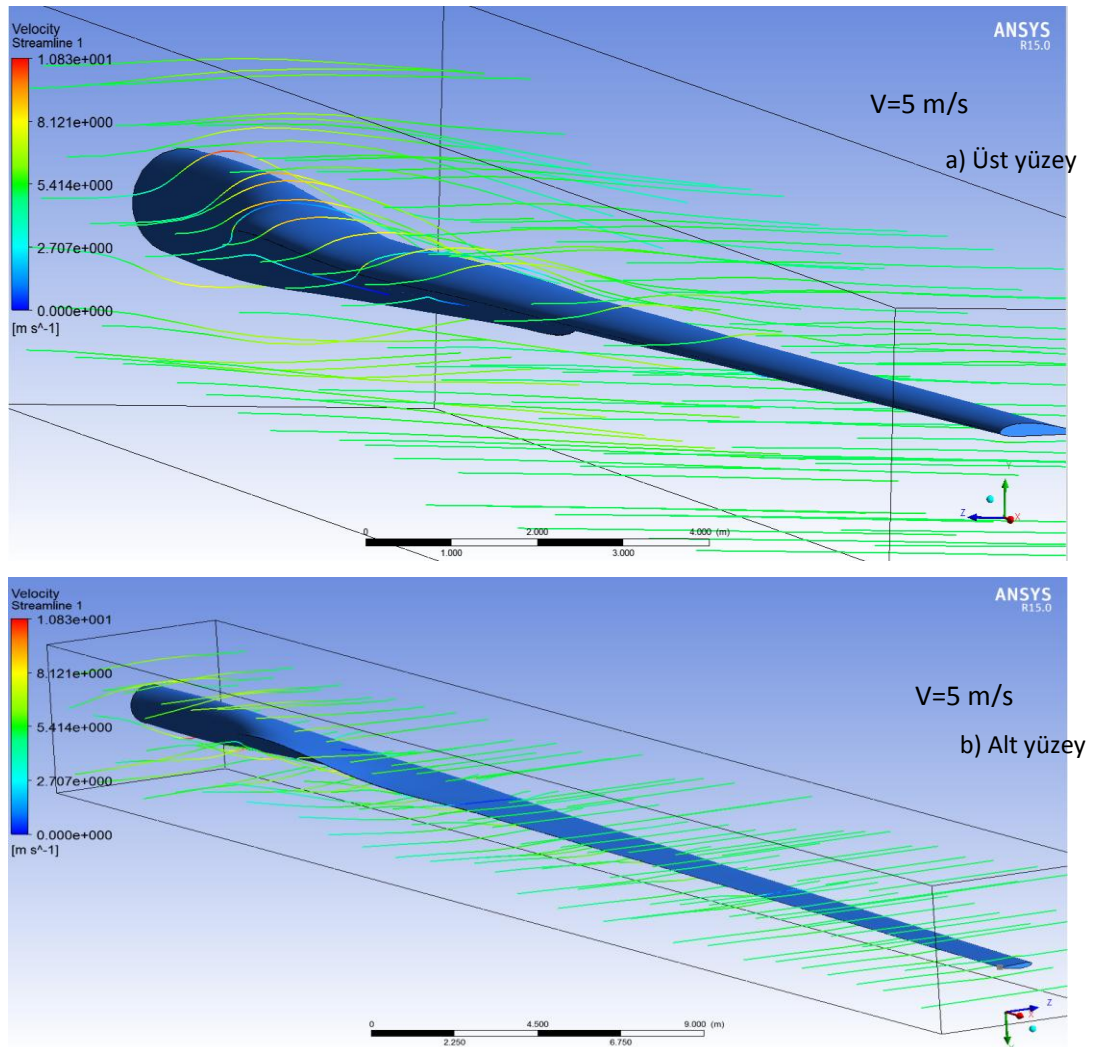
Rüzgar türbin kanatlarının aerodinamik performansı çeşitli metotlardan yararlanılarak belirlenmektedir. Bu çalışmada kanadın aerodinamik performansının belirlenebilmesi amacıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği'nden (**HAD**) yararlanılmaktadır. Bu amaçla rüzgar türbinlerinin devreye girme hızı, nominal hızı ve devreden çıkma hızları için **FLUENT** yazılımında akış analizi yapılarak kanadın bu hızlardaki aerodinamik performansı değerlendirilmiştir. Vestas firmasına ait V80 nolu 2 MW'lık rüzgar türbininin katalog bilgileri değerlendirildiğinde; bu türbinin 4 m/s'lik rüzgar hızında devreye girdiği, 16 m/s'lik rüzgar hızının türbinin nominal hızı olduğu ve türbinin 25 m/s'lik rüzgar hızında devreden çıktığı görülmektedir (URL-8). Bu nedenle, bu çalışmada seçilen türbinin 5 m/s'lik rüzgar hızında devreye girdiği, 15 m/s'lik rüzgar hızının türbinin nominal hızı olduğu, 25 m/s'lik hızın ise türbinin devreden çıkma hızı olduğu kabul edilmiştir. Yapılan akış analizi sonucu belirlenen rüzgar hızlarında kanat yüzeyindeki rüzgar hızları ile basınçlar elde edilmiş olup elde edilen sonuçlar rüzgar hız dağılımı ve basınç dağılımı olarak gruplandırılarak aşağıda verilmiştir.

6.1.1 Rüzgar hız dağılımı

Katı modeli oluşturulan akış ortamında belirlenen rüzgar hızları için (5, 15, 25 m/s) akış analizi yapılmış olup bu analizler sonucunda elde edilen sonuçlardan kanat yüzeyindeki rüzgar hızları aşağıda verilmiştir.

Seçilen 5 m/s'lik rüzgar akışında, kanadın üst ve alt yüzeylerindeki rüzgar hızlarının genel dağılımı Şekil 6.1'de verilmiştir. Şekildeki farklı akım iplicikleri, kanat yüzeyinde rüzgar hızlarının farklı olduğunu göstermektedir.

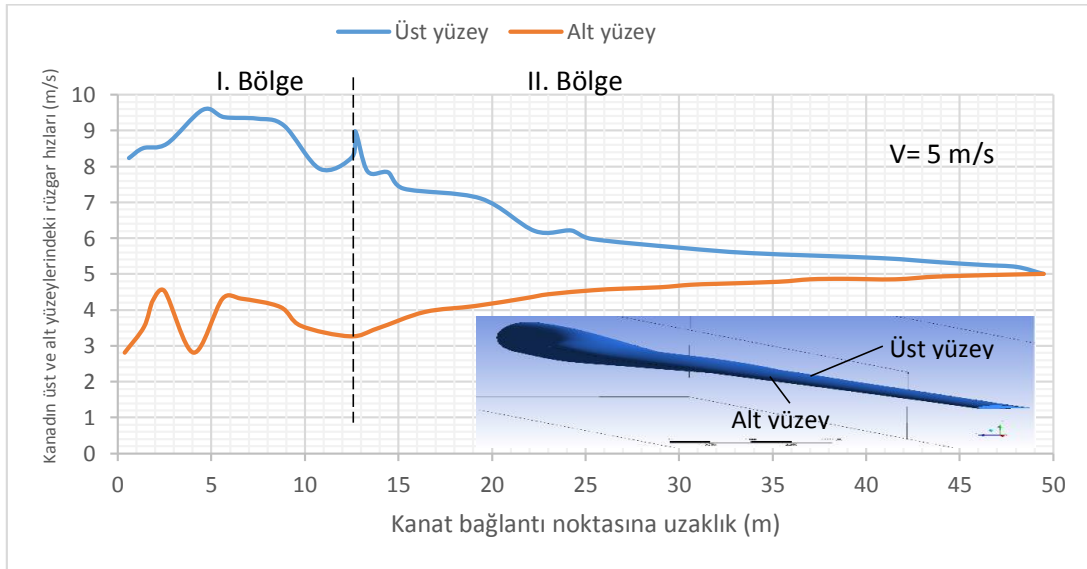
Şekildeki akış ortamında oluşan rüzgar hızları 0 ile 10,83 m/s arasında değişmekte olup kanadın üst ve alt yüzeylerinde genellikle yeşil renkli akım ipliciklerinin, kanadın dairesel kesitli kısmı ve geçiş bölgesinde ise kırmızı ve sarı renkli akım ipliciklerinin bulunduğu görülmektedir. Ayrıca kanadın dairesel kesitli kısmı ve geçiş bölgesinde bu ipliciklerde dalgalanmalar olduğu, diğer bölgelerde ise akım ipliciklerinin yüzeyi yalayıp geçtiği (düzgün bir dağılım olduğu) gözlemlenmiştir.



Şekil 6.1. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki rüzgar hızlarının genel dağılımı

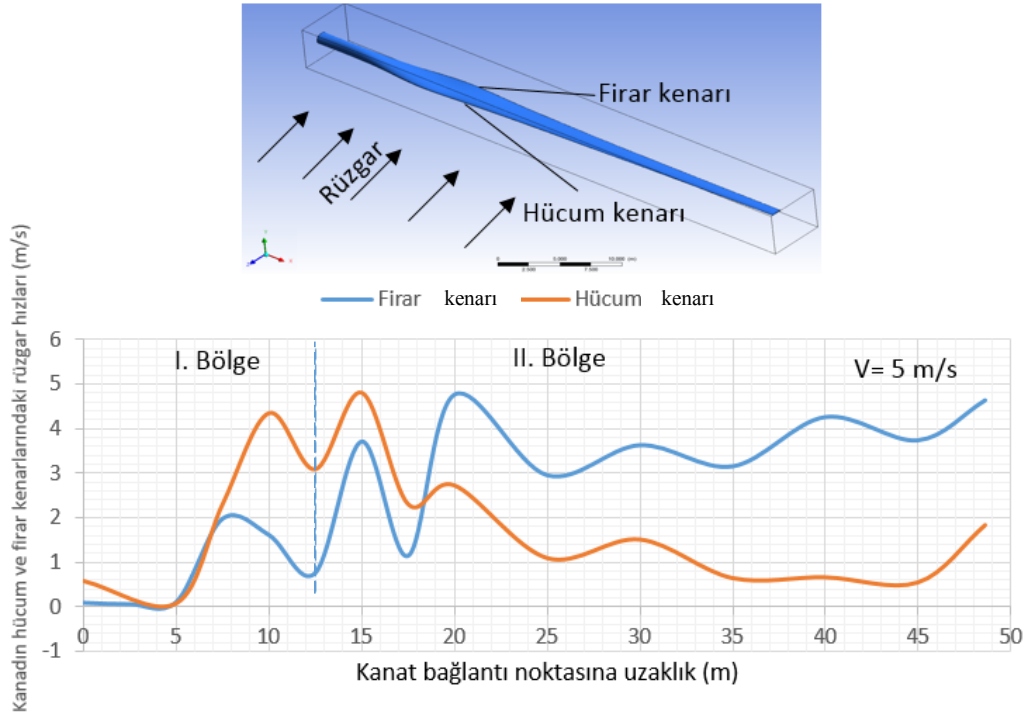
Şekildeki rüzgar hız renk skalasından kanat yüzeyinde oluşan rüzgar hızları hassas bir şekilde belirlenemediğinden akış analizine dönülerek kanadın üst ve alt yüzeylerindeki maksimum hız değerleri ile kanadın hücum ve firar kenarlarındaki rüzgar hızları alınıp eğriler elde edilmiştir. Böylece kanadın üst ve alt yüzeyleri ile hücum ve firar kenarlarındaki rüzgar hızlarının kanat boyunca dağılımının net bir şekilde belirlenebilmesi sağlanmıştır.

Şekil 6.2’de kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek hız değerlerinin kanat boyunca değişimi verilmiştir. Şekilden kanadın üst yüzeyindeki rüzgar hızlarının, beklendiği gibi alt yüzeyindeki rüzgar hızlarından yüksek olduğu görülmektedir (üst yüzeyindeki rüzgar hızları 9,5 m/s ile 5 m/s arasında, alt yüzeyindeki rüzgar hızları ise 2,8 m/s ile 5 m/s arasında değişmektedir). Kanadın üst bölgesi ve alt bölgesinde farklı rüzgar hızlarının oluşması, kanadın üst ve alt yüzeylerinin eğrilik yarıçaplarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, kanadın dairesel kesitli bölgesi ve geçiş bölgesi I. bölge, aerofoil kesitli bölgesi ise II. bölge olarak tanımlandığında; I. bölgede, üst yüzeydeki rüzgar hızı kanadın dairesel kesitli kısmında artmakta geçiş kısmında ise azalmaktadır. II. bölgede ise kanadın üst yüzeyindeki rüzgar hızı düzgün bir şekilde azalarak kanat ucunda incelemeye konu olan rüzgar hızına (5 m/s) erişmektedir. Kanadın alt yüzeyindeki rüzgar hızı incelemeye konu olan rüzgar hızının altında olmakla birlikte, I. bölgede yaklaşık 2,8 ile 4,5 m/s arasında dalgalanarak kanadın en büyük aerofoil kesitli bölgesinde 3,2 m/s değerini almaktadır. II bölgede ise düzenli bir şekilde artarak kanat ucunda 5 m/s’ye eşit olmaktadır. Kanadın uç kısmındaki rüzgar hızının analize konu olan rüzgar hızına eşit olması modelin doğru olduğunu, bu modelden alınan sonuçların gerçeğe yakın olduğunu göstermektedir.



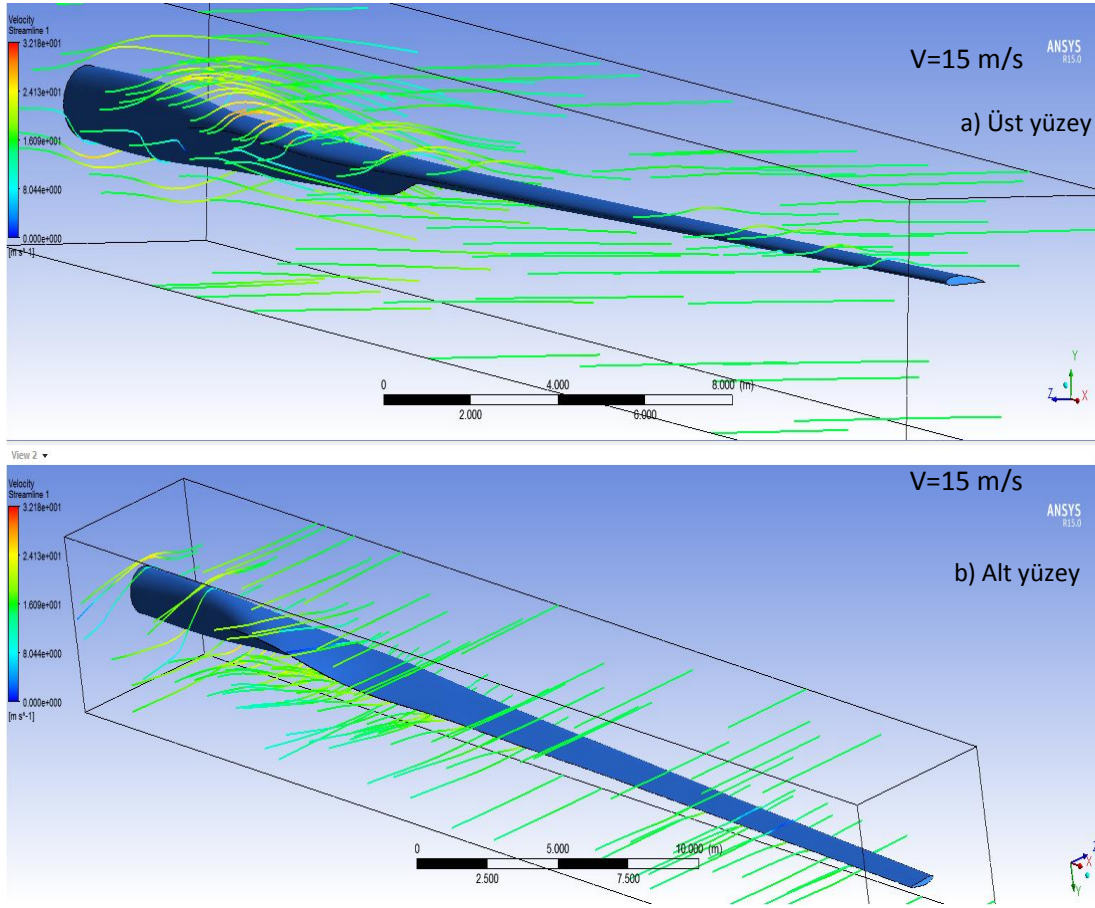
Şekil 6.2. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek rüzgar hızlarının kanat boyunca değişimi

Şekil 6.3’de kanadın hücum ve firar yüzeylerindeki rüzgar hızlarının kanat boyunca değişimi verilmiş olup bu rüzgar hızları 0 ile 5 m/s arasında değişmektedir. Kanadın, hücum kenarında (rüzgarı karşılayan kenar) rüzgar hızı, kanadın dairesel kesitli kısmında azalarak dairesel kesitli bölgenin sonunda sıfıra yaklaşmaktadır. Geçiş bölgesinin başında yaklaşık sıfır olan rüzgar hızı kanadın 10 m’lik kısmına kadar artmakta (10 m’de rüzgar hızı 4,3 m/s) bu bölgeden sonra ise azalarak kanadın aerofoil kesitli bölgesinin başlangıcında 3 m/s değerini almaktadır. Aerofoil kesitli bölgede ise 0,5 m/s ile 4,8 m/s’lik hız aralığında değişmektedir. Firar kenarında, kanadın dairesel kesitli kısmında yaklaşık 0 m/s’lik rüzgar hızı oluşmakta, bu kısımdan sonra dalgalanarak artmakta ve kanadın 20 m’lik uzunluğunda maksimum değere (4,8 m/s) ulaşmaktadır. Kanadın 20-48,63 m’lik kısmında ise 4,8 m/s’lik rüzgar hızından önce 3 m/s’lik rüzgar hızına düşmekte daha sonra ise dalgalanma göstererek kanat ucunda 4,6 m/s’lik rüzgar hızına erişmektedir. İncelenen hücum bölgesinde, rüzgar hızının nominal hızdan (5 m/s) daha düşük değerler alması rüzgarın yüzeye çarpması ve hızının kesilmesinden kaynaklanmaktadır. Oluşturulan modelin bu hassasiyetle sonuçlar vermesi modelin güvenilirliğine işaret etmektedir.



Şekil 6.3. Kanadın hücum ve firar kenarlarındaki rüzgar hızlarının kanat boyunca değişimi

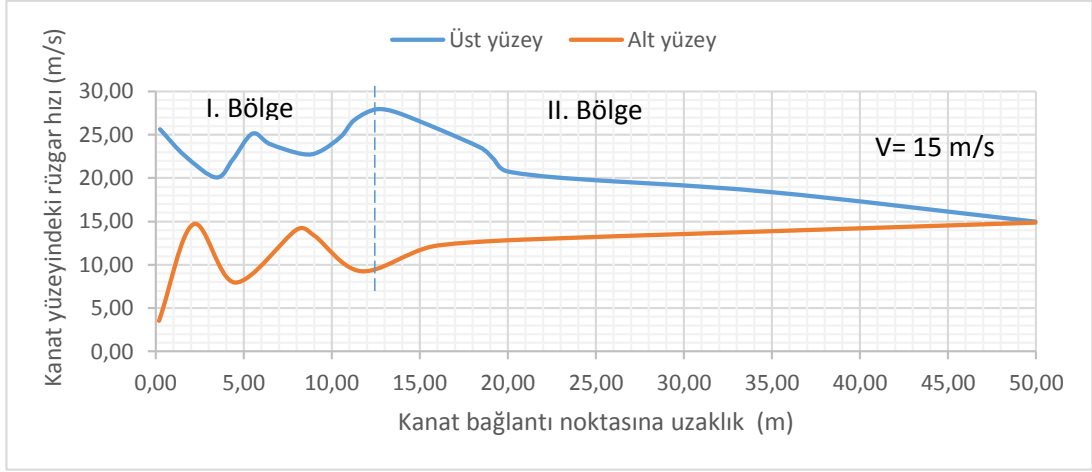
Rüzgar hızı 15 m/s’ye değiştirildiğinde, kanadın üst ve alt yüzeylerindeki rüzgar hızlarının genel dağılımı Şekil 6.4’de verilmiştir. Şekilden akım bölgesinde oluşan rüzgar hızı en yüksek 32,18 m/s gibi olmaktadır. Akım iplikcik renkleri, geçiş bölgesinin üst ve alt yüzeyinde maksimum rüzgar hızlarının oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 6.4. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki rüzgar hızlarının genel dağılımı

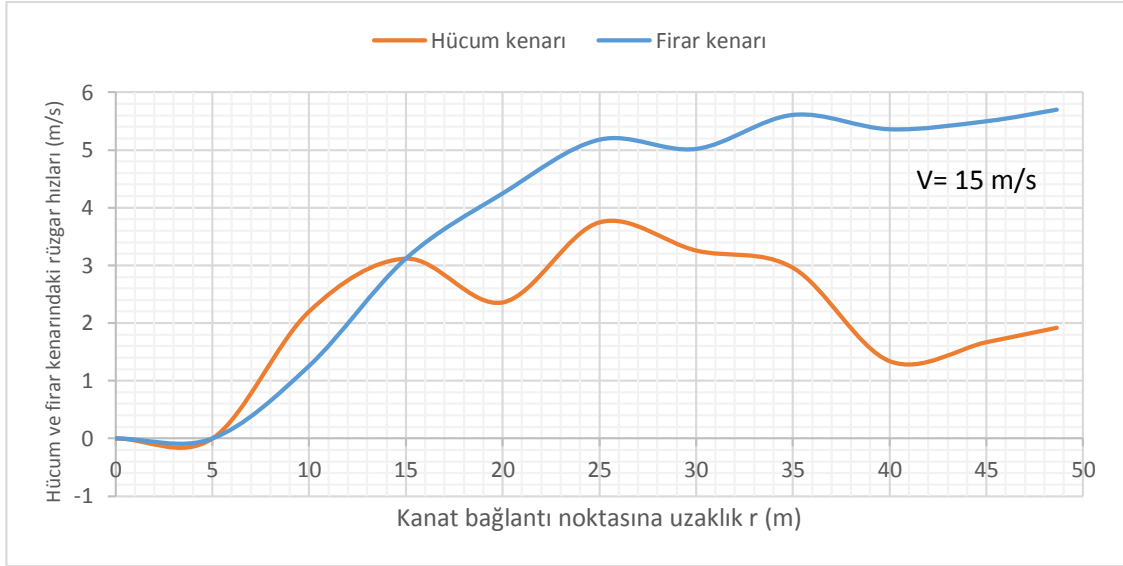
Şekildeki rüzgar hız renk skalasından kanat yüzeyinde oluşan rüzgar hızları hassas bir şekilde belirlenemediğinden 5 m/s'lik rüzgar hızında yapılan işlem burada da tekrarlanmıştır. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek rüzgar hızlarının kanat boyunca dağılımı belirlenmiş olup Şekil 6.5'de verilmiştir.

Şekilden kanadın üst yüzeyindeki rüzgar hızlarının 15-28 m/s aralığında, alt yüzeyindeki rüzgar hızlarının ise 4-15 m/s aralığında olduğu görülmektedir. Şekildeki rüzgar hız dağılım 5 m/s'lik rüzgar hızına benzer bir dağılım göstermekte olup, kanadın uç noktasında, kanadın üst ve alt yüzeylerindeki rüzgar hızları limit değere (15 m/s) ulaşmaktadır.



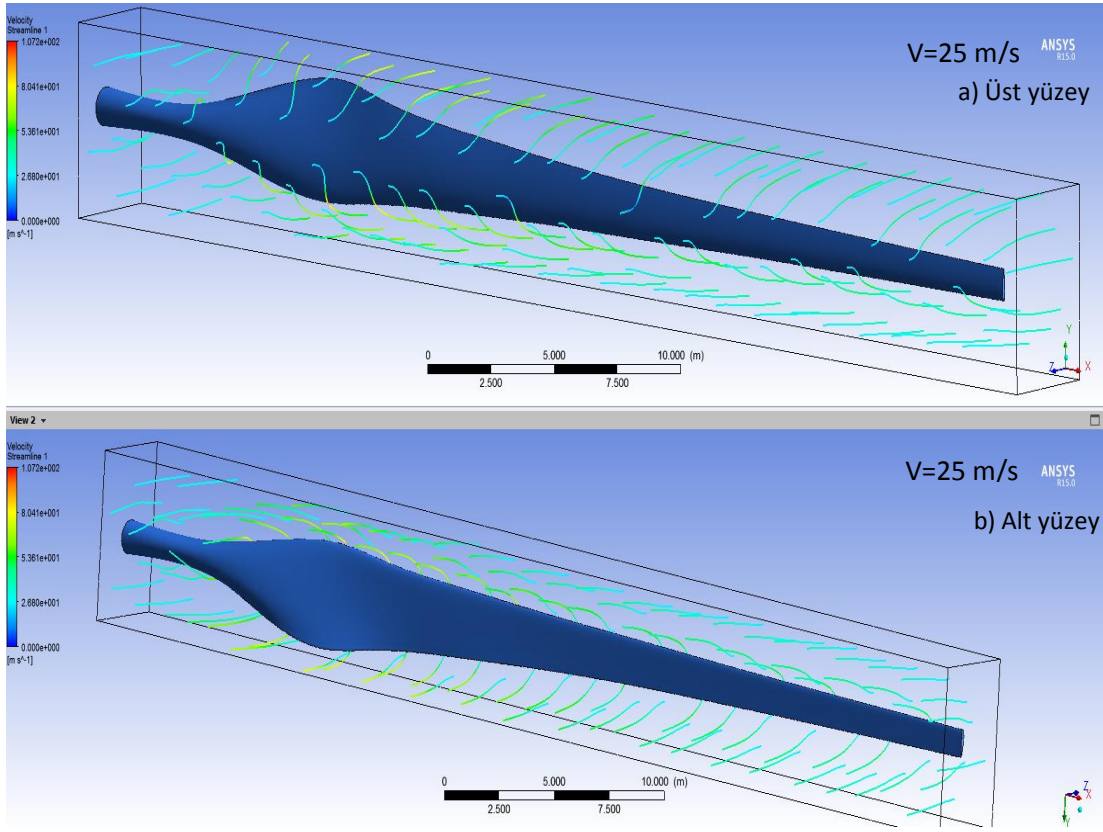
Şekil 6.5. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek rüzgar hızlarının kanat boyunca değişimi

Şekil 6.6'da kanadın hücum ve firar yüzeylerindeki rüzgar hızlarının kanat boyunca değişimi verilmiş olup bu rüzgar hızları 0 ile 6 m/s arasında değişmektedir.



Şekil 6.6. Kanadın hücum ve firar kenarlarındaki rüzgar hızlarının kanat boyunca değişimi

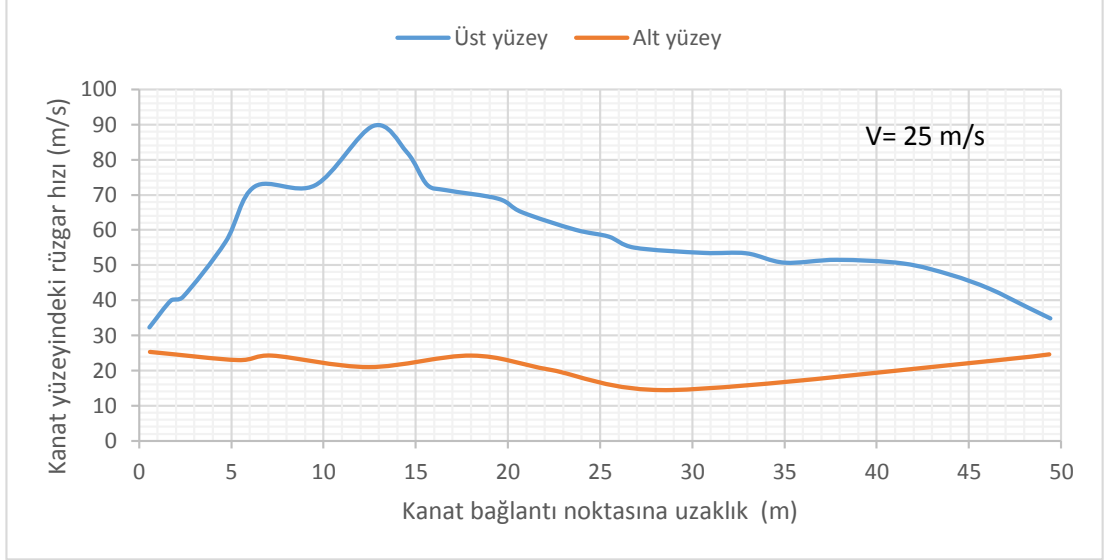
Rüzgar türbinleri 25 m/s'lik rüzgar hızı ve üzerinde sisteme zarar vermemek amacıyla kapatılmakta olup kanadın açılal pozisyonu pitch mekanizmasından yararlanılarak 90° döndürölmekte ve kanatta oluşlan kaldırma kuvveti ortadan kaldırılarak türbin elemanlarının aşırı yüklemekten korunması amaçlanmaktadır. 25 m/s'lik rüzgar akışında, kanadın üst ve alt yüzeylerindeki rüzgar hızlarının genel dağılımı Şekil 6.7'de verilmiştir. Şekilden akış ortamında oluşlan rüzgar hızının en yüksek 107,3 m/s olduğu görölmekte olup akım iplikcik renkleri maksimum rüzgar hızının kanadın en büyük aerofoil kesitli kısmına yakın bir bölgede oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 6.7. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki rüzgar hızlarının genel dağılımı

Akış analizinden alınan değerler kullanılarak kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek rüzgar hızlarının kanat boyunca dağılımı belirlenmiş ve sonuçlar Şekil 6.8’de verilmiştir.

Şekilden kanadın üst yüzeyindeki rüzgar hızlarının 32-90 m/s aralığında, alt yüzeyindeki rüzgar hızlarının ise 15-25 m/s aralığında olduğu görülmektedir. Şekildeki rüzgar hız dağılımı önceki analizlere konu olan rüzgar hızlarının davranışına benzer bir dağılım göstermekte olup, kanadın uç noktasında, kanadın üst ve alt yüzeylerinde rüzgar hızları limite (15 m/s) ulaşmaktadır.



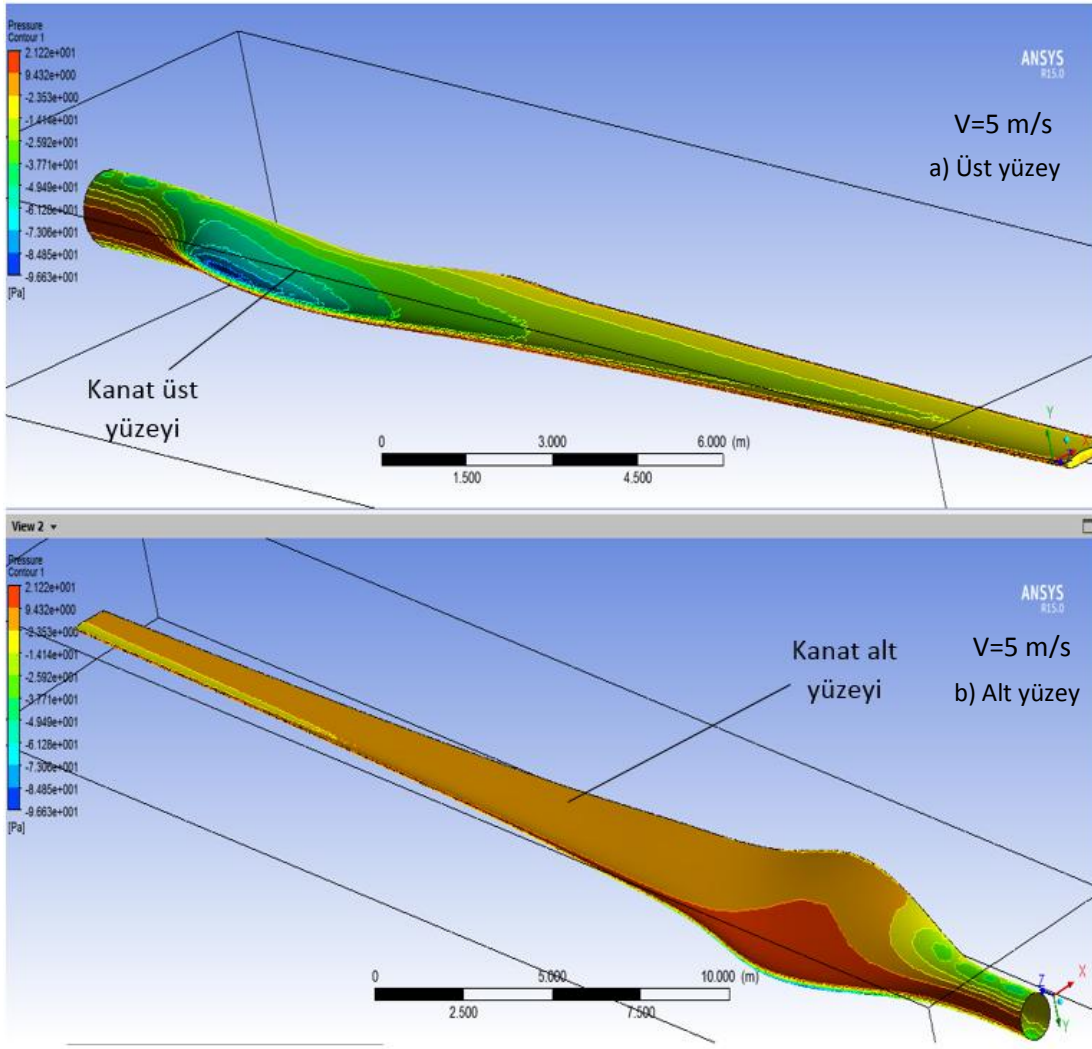
Şekil 6.8. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek rüzgar hızlarının kanat boyunca değişimi

6.1.2 Basınç dağılımı

Katı modeli oluşturulan akış ortamında belirlenen rüzgar hızları için (5, 15, 25 m/s) akış analizi yapılmış olup bu analizler sonucunda kanat yüzeyine etki eden basınç dağılımları aşağıda verilmiştir.

Şeçilen 5 m/s'lik rüzgar akışında, kanadın üst ve alt yüzeylerine etki eden basınçlar Şekil 6.9'da verilmiş olup şekildeki farklı renkli bölgeler kanat yüzeyine farklı büyüklüklerde basınçların etki ettiğini göstermektedir.

Şekilde, kanadın üst yüzeyinde genellikle yeşil ve sarı, alt yüzeyinde ise genellikle turuncu ve kırmızı renkli bölgelerin olduğu yani beklendiği gibi kanadın üst yüzeyinde negatif, alt yüzeyinde ise pozitif basınçların olduğu görülmektedir. Bu durum kanadın aerofoil kesitli olmasından kaynaklanmaktadır. Bölüm 4.1'de de bahsedildiği gibi aerofoil kesitin üst ve alt yüzeylerin eğrilik yarıçaplarının farklı olması üst ve alt yüzeyler arasında basınç farkı ortaya çıkmasını ve kanadın alt yüzeyinden üst yüzeyine doğru bir kaldırma kuvveti oluşmasını sağlamaktadır. Kaldırma kuvveti ise rüzgar türbinlerinden enerji elde edilmesini sağlayan kuvvettir.

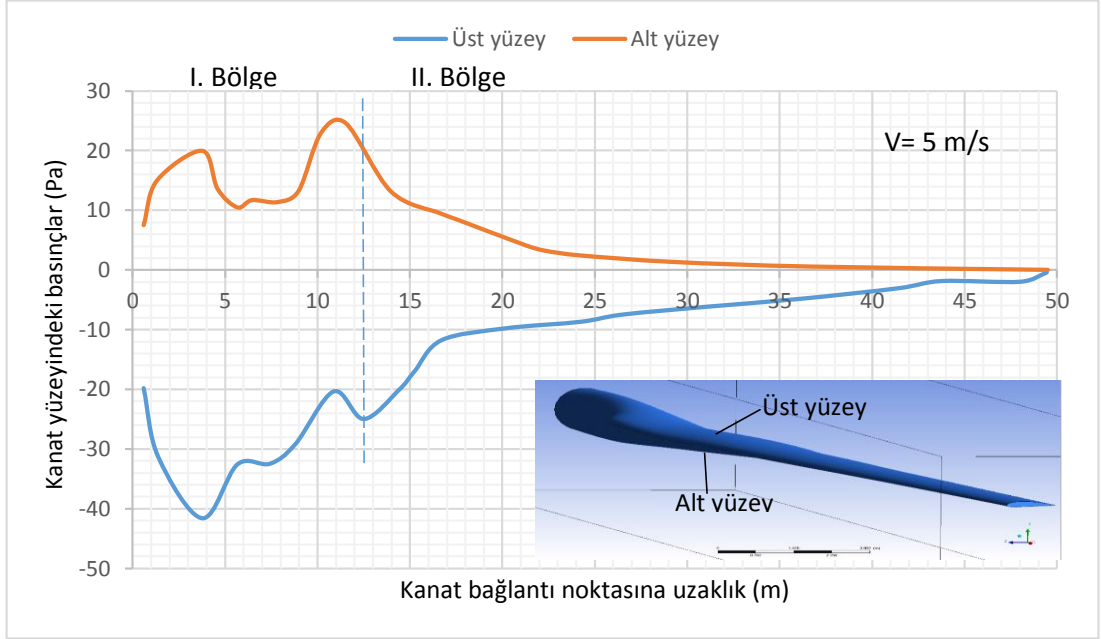


Şekil 6.9. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek basınçların etki eden basınçların genel dağılımı

Şekilde kanadın üst ve alt yüzeylerine etki eden basınçlar görülmesine rağmen kanadın hangi bölgesinde ne kadarlık bir basınç olduğu hassas bir şekilde belirlenememektedir. Bu nedenle akış analizine dönülerek kanadın üst ve alt yüzeylerindeki basınç değerlerinin kanat uzunluğu boyunca dağılımını gösteren eğriler elde edilmiştir. Şekil 6.10’da kanadın üst ve alt yüzeylerinde oluşan maksimum basınç değerlerinin kanat uzunluğu boyunca dağılımı verilmiştir.

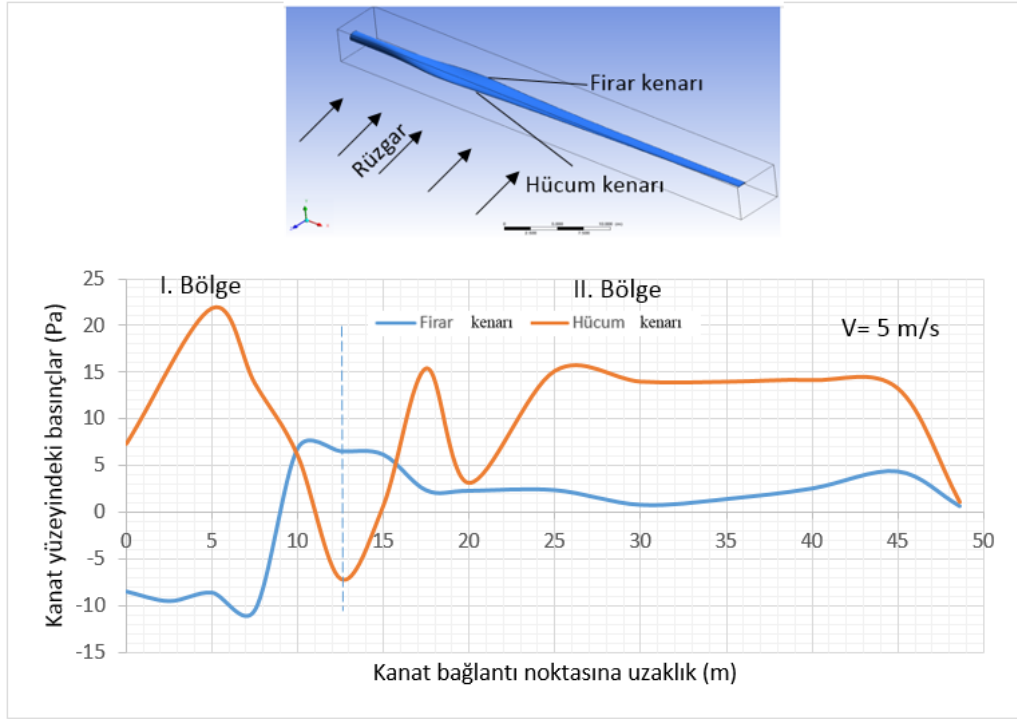
Şekildeki basınç dağılımı incelendiğinde; kanadın alt yüzeyine etki eden basıncın I. bölgede 8 ile 25 Pa arasında değiştiği görülmektedir. II. bölgede basınç, 20 Pa’den başlayıp sürekli azalır kanat ucunda sıfır olmaktadır. Üst yüzeydeki hava basıncı incelendiğinde; I. bölgede – 20 Pa’den başlayıp önce -40 Pa’a sonra tekrar – 20 Pa değerine düştüğü, II. bölgede ise beklenen davranış (-25 Pa’dan azalarak sıfıra düşmesi) gözlemlenmiştir. Modern rüzgar türbin kanat geometrisi II. bölgede düzgün olarak azaldığından, kanat yüzeyindeki basınçların kanat ucuna doğru giderek azalması ve kanat ucunda sıfır olması beklenen bir davranıştır. Bu

durum bu modelin doğru olduğunu, bu modelden yararlanılarak gerçeğe yakın değerler elde edilebileceğini göstermektedir.



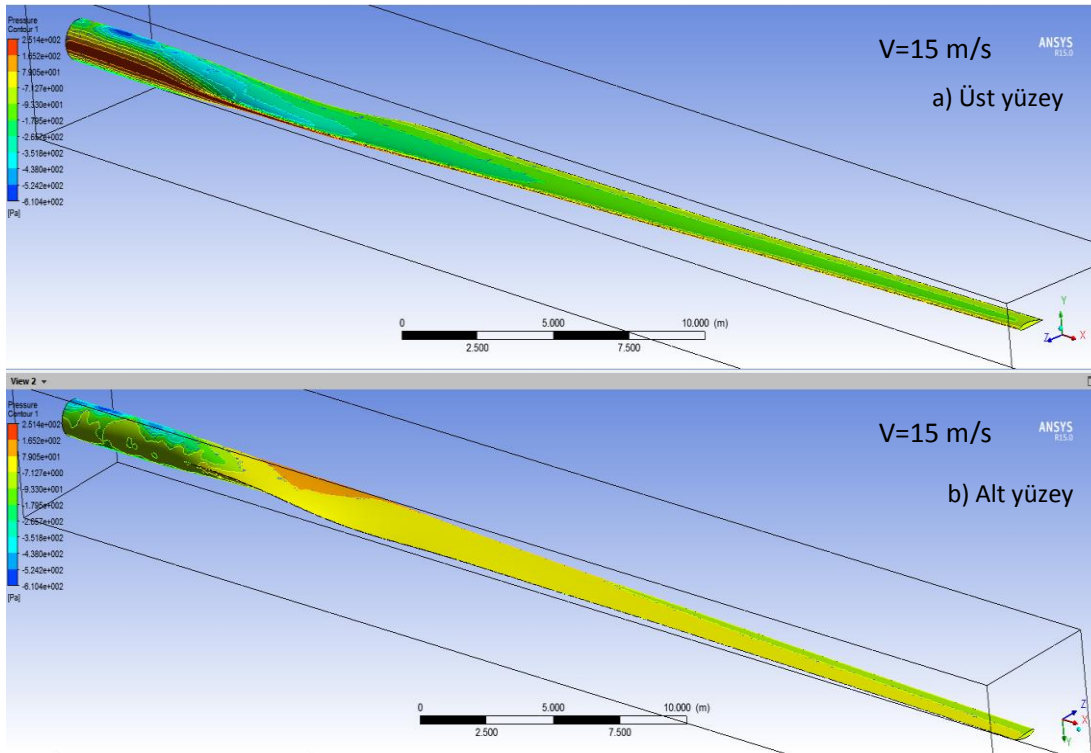
Şekil 6.10. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek basınçların kanat boyunca değişimi

Kanadın hücum ve firar kenarına etki eden basınçlar Şekil 6.11'de verilmiştir. Şekilden kanadın hücum kenarına etki eden basınç incelendiğinde; I. bölgede kanat bağlantı noktasında 7,5 Pa değerini aldığı sonra kanadın 5 m'lik uzunluğunda en yüksek basınç değerine ulaştığı (22 Pa), sonra azalarak kanadın en büyük aerofoil kesitinin olduğu kısımda ise en düşük basınç değerine (-7 Pa) ulaştığı görülmektedir. II. bölgede ise basıncın -7 Pa ile 16 Pa arasında değişerek kanat ucunda 0 Pa değerini aldığı gözlemlenmiştir. Kanadın firar kenarına etki eden basınç incelendiğinde; I. bölgede kanat bağlantı noktasında basıncın -8 Pa olduğu daha sonra azalarak, kanadın 8 m'lik uzunluğunda en düşük değere ulaştığı (-11 Pa), sonra ise artarak 10 m'lik kanat uzunluğunda en büyük değere ulaştığı görülmektedir. II. bölgede ise basıncın 6 Pa ile yaklaşık 0 Pa arasında değiştiği, kanat ucunda ise yaklaşık 0 Pa olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.11. Kanadın hücum ve firar kenarlarındaki basınçlar

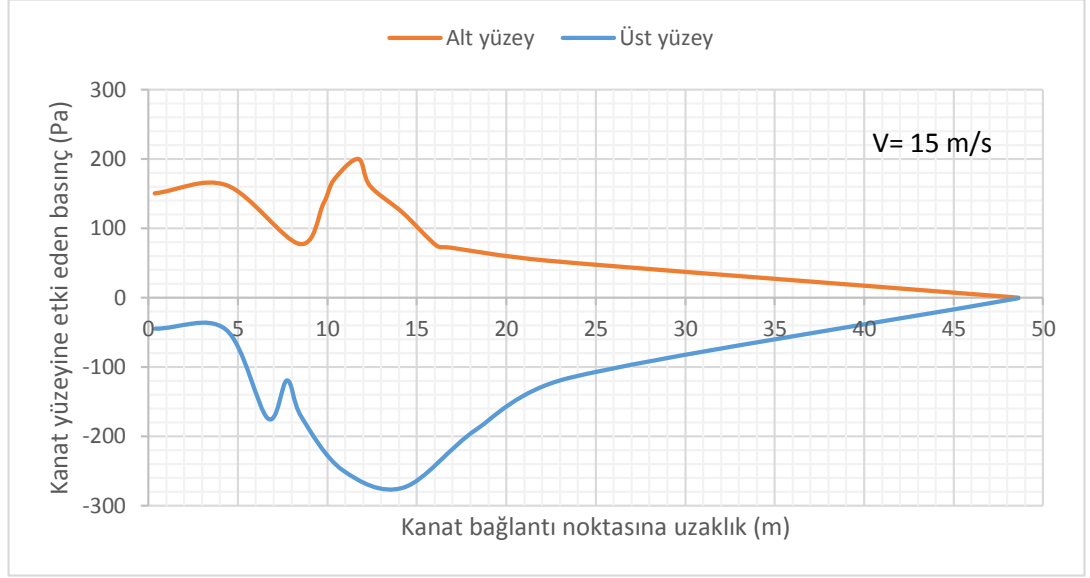
Kanada gelen rüzgar hızı 15 m/s'ye değiştirildiğinde, kanadın üst ve alt yüzeylerine etki eden basınçlar Şekil 6.12'de verilmiş olup şekildeki farklı renkli bölgeler kanat yüzeyine farklı büyüklüklerde basınçların etki ettiğini göstermektedir. Şekilden kanat yüzeyinde en yüksek 251,4 Pa, en düşük -610,4 Pa'lık basınç olduğu görülmektedir.



Şekil 6.12. Kanadın üst ve alt yüzeylerine etki eden basınçların genel dağılımı

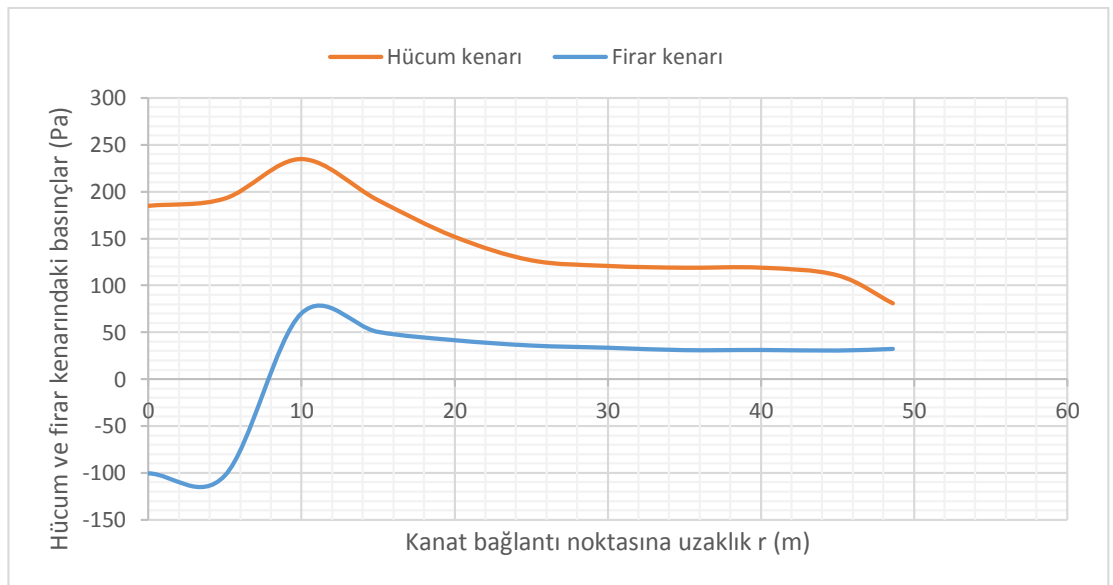
Şekil 6.13’de kanadın üst ve alt yüzeylerinde oluşan maksimum basınç değerlerinin kanat uzunluğu boyunca dağılımı verilmiştir.

Şekilden kanadın üst ve alt yüzeylerine etki eden basınçların -300 Pa ile 200 Pa aralığında değiştiği, üst yüzeyde negatif alt yüzeyinde ise pozitif basınçların olduğu, kanadın ucunda kanadın üst ve alt yüzeylerine etki eden basınç değerlerinin sıfıra eşit olduğu görülmektedir.



Şekil 6.13. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek basınçların kanat boyunca değişimi

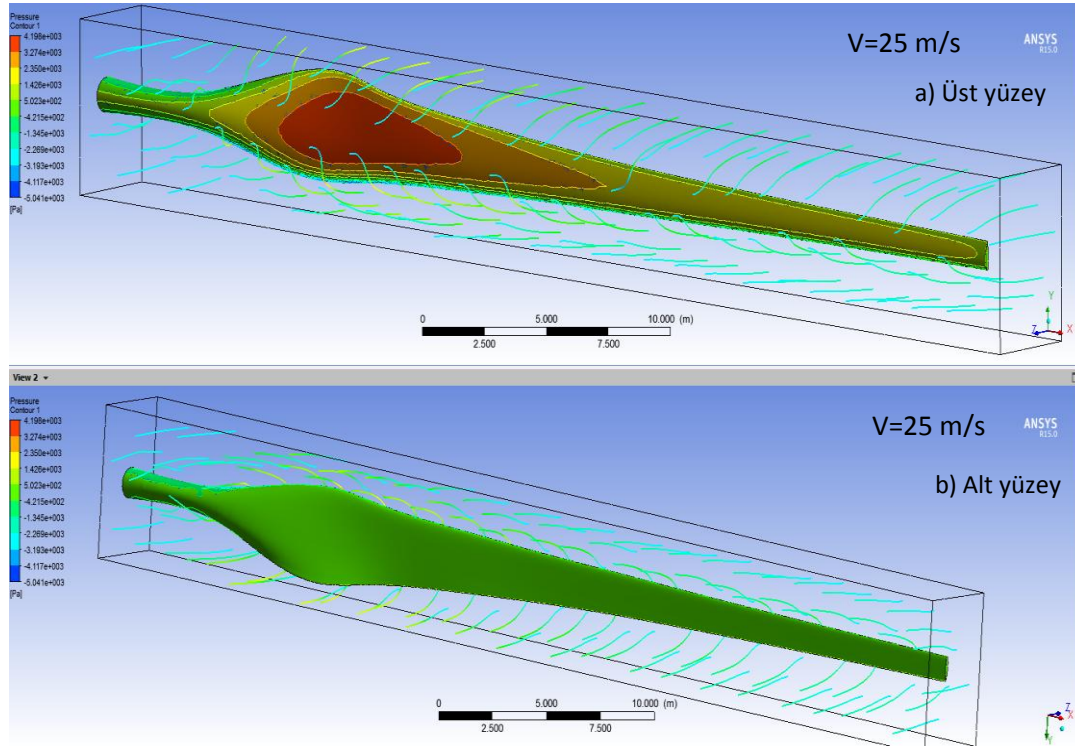
Kanadın hücum ve firar kenarına etki eden basınçlar Şekil 6.14’de verilmiştir. Şekilden kanadın hücum ve firar kenarlarında oluşan basınçların beklendiği gibi 5 m/s’lik rüzgar hızında oluşan basınçlara benzer olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.14. Kanadın hücum ve firar kenarlarındaki basınçlar

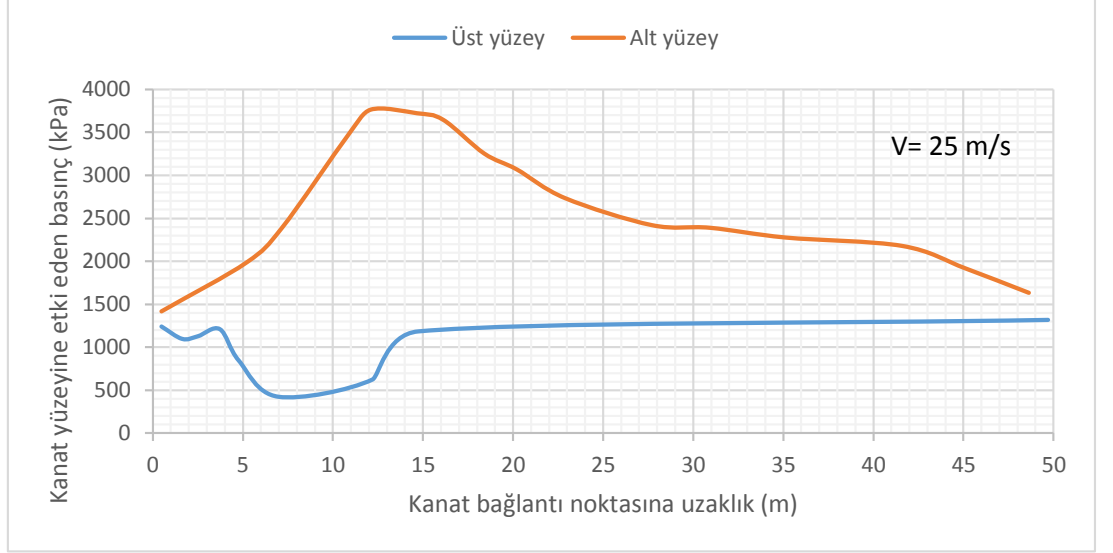
Rüzgar türbinleri 25 m/s'lik rüzgar hızı ve üzerinde sisteme zarar vermemek amacıyla kapatılmakta olup kanadın açısız pozisyonu pitch mekanizmasından yararlanılarak 90° döndürülmekte ve kanatta oluşan kaldırma kuvveti ortadan kaldırılarak türbin elemanlarının aşırı yüklemekten korunması amaçlanmaktadır. Bu durumda, kanadın üst ve alt yüzeylerine etki eden basınçlar Şekil 6.15'de verilmiştir. Şekilden kanat yüzeyinde en yüksek 4.198 kPa, en düşük -5.041 kPa'lık basınç oluştuğu görülmektedir.

Şekilde kanadın üst ve alt yüzeylerine etki eden basınçlar görülmesine rağmen kanadın hangi bölgesinde ne kadarlık bir basınç oluştuğu hassas bir şekilde belirlenemediğinden önceki analizlerde olduğu gibi akış analizine dönülerek kanadın üst ve alt yüzeylerindeki basınç değerleri belirlenmiştir. Şekil 6.16'da kanadın üst ve alt yüzeylerinde oluşan maksimum basınç değerlerinin kanat uzunluğu boyunca dağılımı verilmiştir.



Şekil 6.15. Kanadın üst ve alt yüzeylerine etki eden basınçların genel dağılımı

Şekilden kanadın üst ve alt yüzeylerine etki eden basınçların -0,4 kPa ile 3,75 kPa aralığında değiştiği, üst yüzeyde negatif alt yüzeyinde ise pozitif basınçların oluştuğu, kanadın ucunda kanadın üst ve alt yüzeylerine etki eden basınç değerlerinin sıfıra eşit olduğu görülmektedir.



Şekil 6.16. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek basınçların kanat boyunca değişimi

6.2. Kanadın Mekanik Davranışı

Rüzgâr türbinlerinde, kanada etki eden yükler rüzgâr hızına bağlı olarak değişmektedir. Akışkan-yapı etkileşim analizi yapılan bu çalışmada farklı rüzgar hızlarında (0 m/s, 5 m/s, 15 m/s, 25 m/s) kanadın mekanik davranışı değerlendirilmiş olup bu amaçla kanada aerodinamik yükler ve yerçekimi yüklerinin etki ettiği kabul edilerek kanadın statik analizi yapılmıştır. Kanada etki eden aerodinamik yüklerin belirlenmesinde bir önceki kısımda farklı rüzgar hızları için yapılan akış analizleri sonucu elde edilen kanat yüzeyine etki eden basınç dağılımları kullanılmıştır. Yapılan çalışmada belirlenen her bir rüzgar hızı için kanadın mekanik davranışı (kanatta oluşan şekil değişimleri (deformasyon, sehim) ve gerilmeler (normal, kayma ve eşdeğer)) değerlendirilmiştir. Ayrıca her bir rüzgar hızı için kanadın **Tsai-wu** kırılma kriterine göre hasar kontrolü yapılmıştır. Bu çalışma sonucu elde edilen büyüklükler aşağıda verilmiştir.

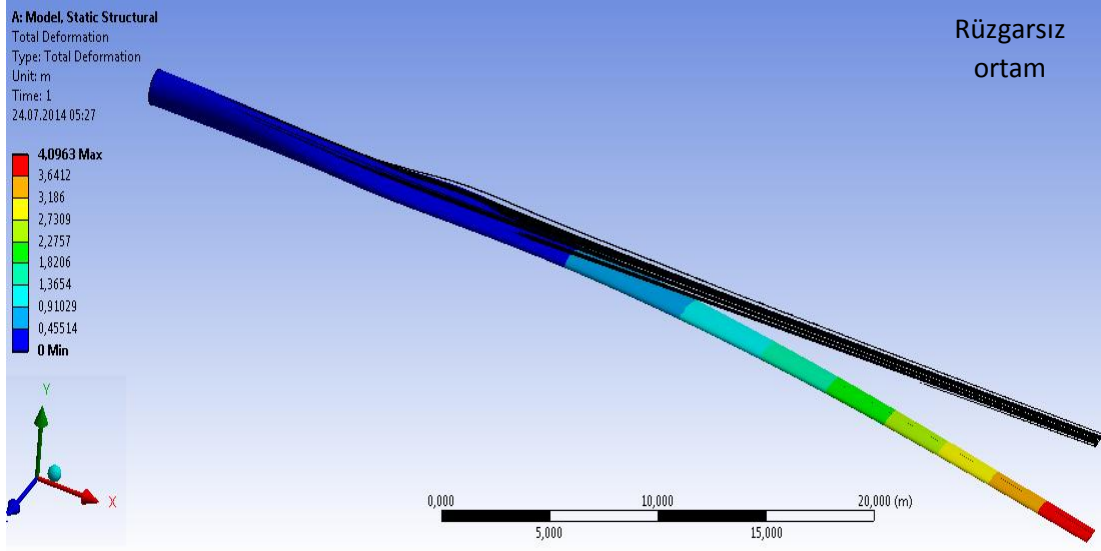
Bu çalışmada, şekil değişimi (deformasyon) olarak kanadın toplam şekil değişimi (X, Y ve Z yönlerinde oluşan şekil değişiminin bileşkesi), normal gerilme olarak kanatta oluşan σ_x normal gerilmesi, kayma gerilmesi olarak kanatta oluşan τ_{xy} kayma gerilmesi ve eşdeğer gerilme ($\sigma_{eş}$) olarak kanatta oluşan Von-mises eşdeğer gerilmeleri belirlenmiştir.

6.2.1 Şekil değişimi (deformasyon)

Kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan yerçekimi yüklerinin kanadın mekanik davranışına etkisini belirlemek amacıyla kanadın statik analizi yapılmış olup kanatta yerçekimi yükleri nedeniyle oluşan **toplam şekil değişimi** (x, y ve z yönlerindeki şekil değişiminin bileşkesi) Şekil 6.17’de verilmiştir. Şekilde kanadın farklı bölgelerinde oluşan

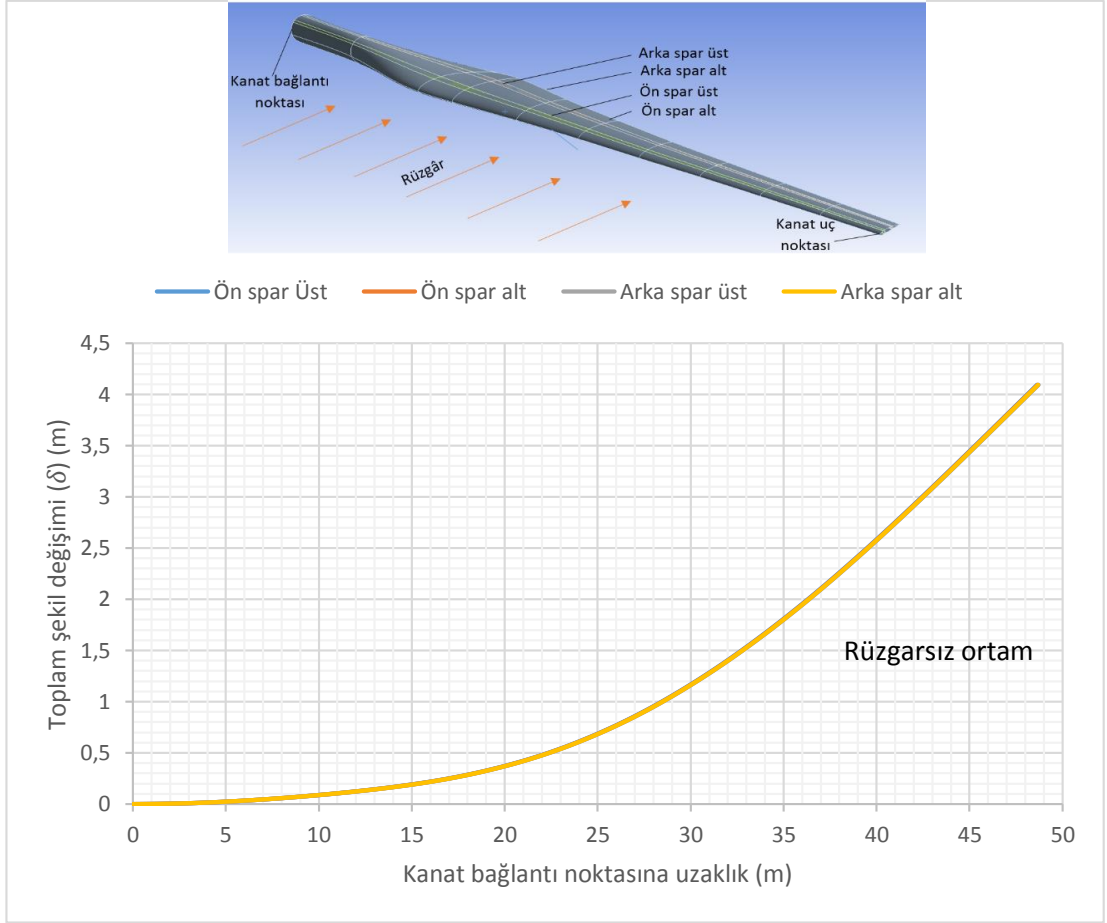
değişik büyüklükteki şekil değişimleri farklı renklerle gösterilmiştir. Şekilden kanadın kendi ağırlığı nedeniyle şekil değişiminin kanat ucunda en büyük değere ulaştığı (4,0963 m) görülmektedir.

Şekildeki şekil değişim skalasından kanatta oluşan şekil değişim miktarları tam olarak belirlenememektedir. Bu nedenle kanadın statik analizine dönülerek kanadın dört farklı bölgesinde (Ön spar üst, ön spar alt, arka spar üst, arka spar alt) kanat uzunluğu boyunca oluşan toplam şekil değişimleri belirlenmiş ve Şekil 6.18’de verilmiştir.



Şekil 6.17. Kanadın toplam şekil değişimi

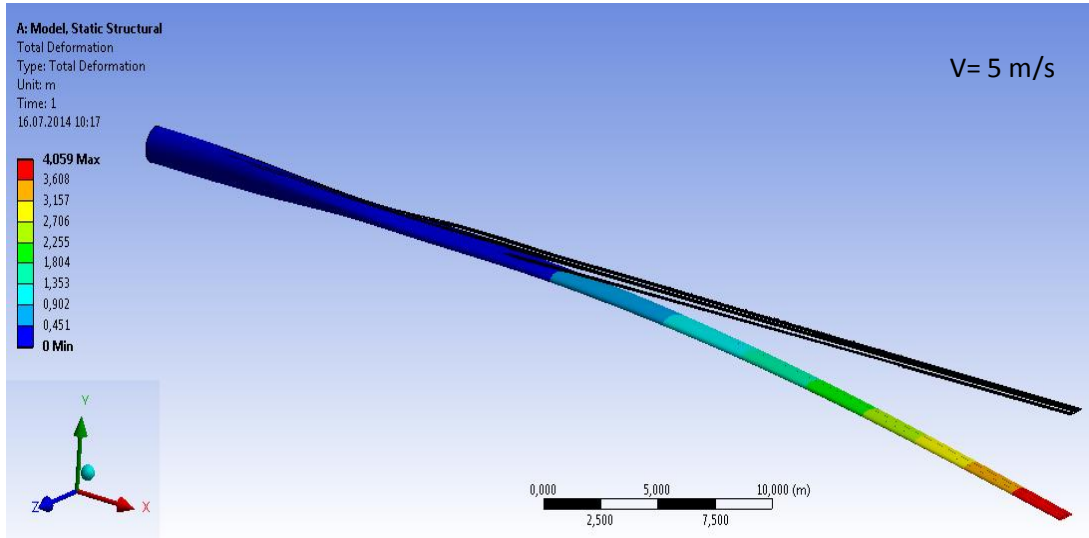
Şekilden kanadın belirlenen bölgelerdeki şekil değişim miktarlarının yaklaşık olarak aynı büyüklükte olduğu bu nedenle şekil değişim eğrilerinin çakıştığı görülmektedir. Kanadın şekil değişimi incelendiğinde; kanadın %20 uzunluğunda 0,1 m’lik şekil değişimi (sehim), %40 uzunluğunda 0,4 m’lik şekil değişimi, %60 uzunluğunda 1,2 m’lik şekil değişimi, %80’lik uzunluğunda 2,6 m’lik şekil değişimi, kanat ucunda ise 4,096 m’lik bir şekil değişimi olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.18. Kanadın dört farklı bölgesinde kanat boyunca oluşan toplam şekil değişimleri

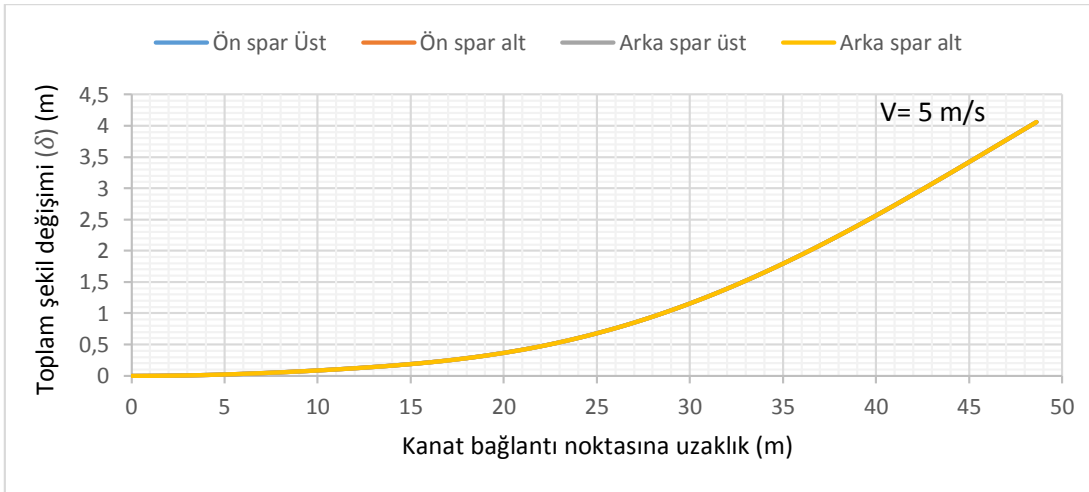
5 m/s'lik rüzgar hızında kanadın mekanik davranışını belirlemek amacıyla yapılan statik analiz sonucu belirlenen kanadın **toplam şekil değişimi** (x, y ve z yönlerindeki şekil değişiminin bileşkesi) Şekil 6.19'da verilmiştir. Şekilde kanadın farklı bölgelerinde oluşan değişik büyüklükteki şekil değişimleri farklı renklerle gösterilmiştir.

Kanadın dört farklı bölgesinde (Ön spar üst, ön spar alt, arka spar üst, arka spar alt) kanat uzunluğu boyunca oluşan toplam şekil değişimleri belirlenmiş Şekil 6.20'de verilmiştir.



Şekil 6.19. Kanadın toplam şekil değişimi

Şekilden kanadın belirlenen bölgelerdeki şekil değişim miktarlarının yaklaşık olarak aynı büyüklükte olduğu bu nedenle şekil değişim eğrilerinin çakıştığı görülmektedir. Kanadın şekil değişimi incelendiğinde; kanadın %20 uzunluğunda 0,1 m’lik şekil değişimi (sehim), %40 uzunluğunda 0,4 m’lik şekil değişimi, %60 uzunluğunda 1,2 m’lik şekil değişimi, %80’lik uzunluğunda 2,6 m’lik şekil değişimi, kanat ucunda ise 4,059 m’lik bir şekil değişimi olduğu belirlenmiştir.

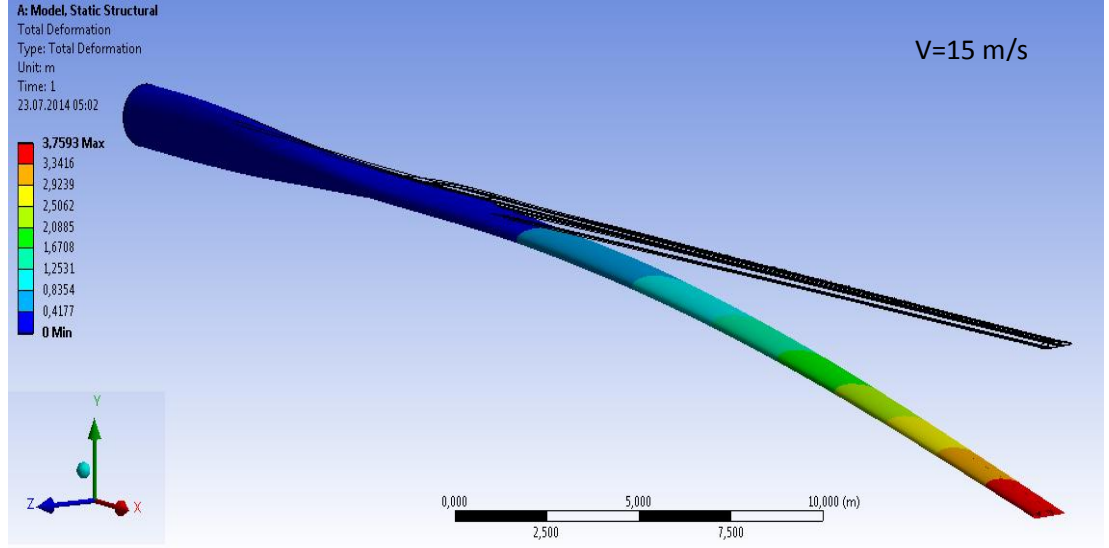


Şekil 6.20. Kanadın dört farklı bölgesinde kanat boyunca oluşan toplam şekil değişimleri

15 m/s’lik rüzgar hızında kanadın mekanik davranışını belirlemek amacıyla yapılan statik analiz sonucu belirlenen kanadın **toplam şekil değişimi** (x, y ve z yönlerindeki şekil değişiminin bileşkesi) Şekil 6.21’de verilmiştir.

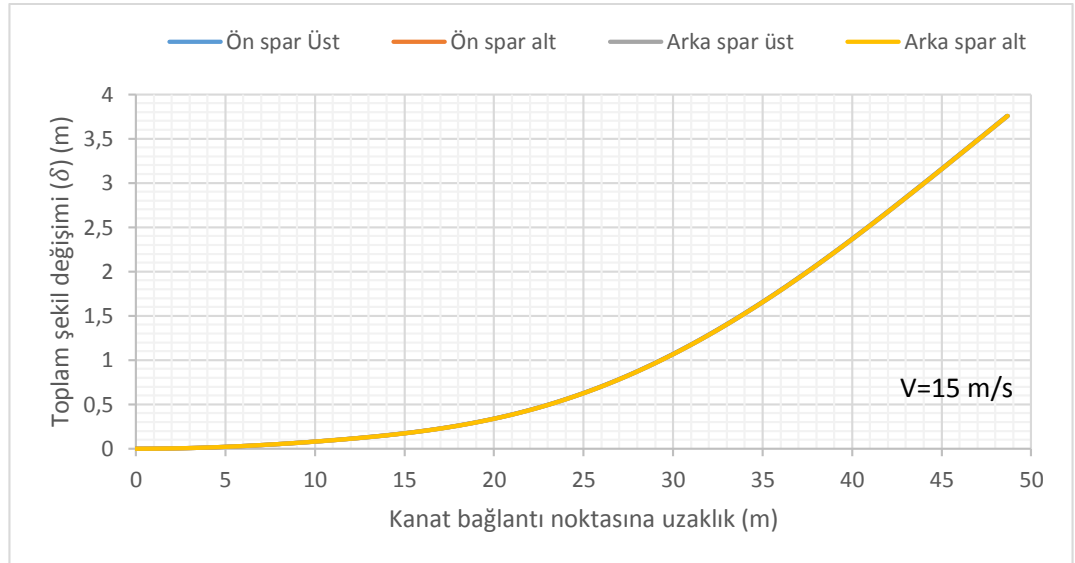
Şekilden kanadın şekil değişiminin, kanadın kök bölgesinden uç bölgesine doğru giderek arttığı, uçtaki şekil değişimin 3,7593 m olduğu görülmektedir. Kanadın dört farklı

bölgesinde (Ön spar üst, ön spar alt, arka spar üst, arka spar alt) kanat uzunluğu boyunca oluşan toplam şekil değişimleri belirlenmiş ve Şekil 6.22’de verilmiştir.



Şekil 6.21. Kanadın toplam şekil değişimi

Şekilden kanadın belirlenen bölgelerdeki şekil değişim miktarlarının yaklaşık olarak aynı büyüklükte olduğu bu nedenle şekil değişim eğrilerinin çakıştığı görülmektedir. Kanadın şekil değişimi incelendiğinde; kanadın %20 uzunluğunda 0,1 m’lik şekil değişimi (sehim), %40 uzunluğunda 0,35 m’lik şekil değişimi, %60 uzunluğunda 1,1 m’lik şekil değişimi, %80’lik uzunluğunda 2,35 m’lik şekil değişimi, kanat ucunda ise 3,7593 m’lik bir şekil değişimi olduğu belirlenmiştir.

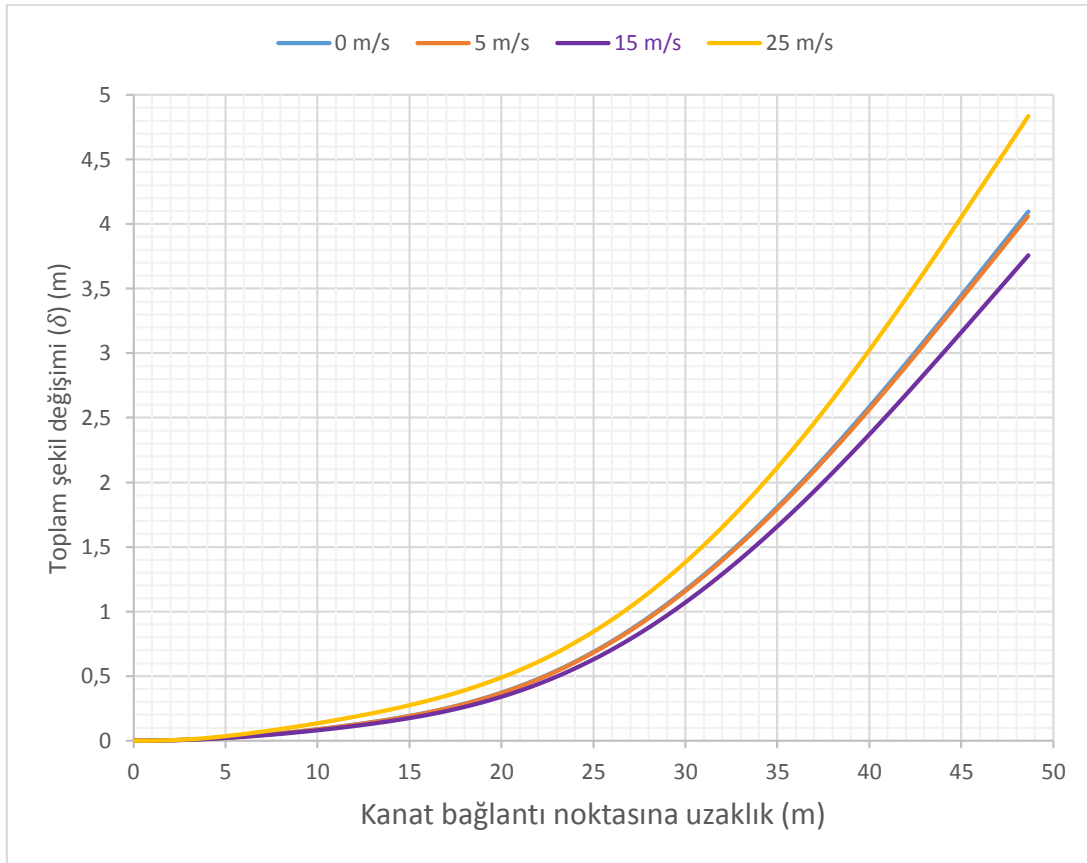


Şekil 6.22. Kanadın dört farklı bölgesinde kanat boyunca oluşan toplam şekil değişimleri

Rüzgar türbinleri 25 m/s’lik rüzgar hızı ve üzerinde sisteme zarar vermemek amacıyla kapatılmaktadır. bu amaçla kanadın açılal pozisyonu pitch mekanizmasından yararlanılarak 90° döndürölmekte (kanat yatay konumdan düşey konuma getirölmekte) ve kanatta oluşun

kaldırma kuvveti ortadan kaldırılarak türbin elemanlarının aşırı yüklemekten korunması sağlanmaktadır. Bu durumda kanadın mekanik davranışını belirlemek için 25 m/s'lik rüzgar hızında statik analiz yapılmış olup bu analiz sonucu belirlenen şekil değişimi diğerlerine benzer bir davranış elde edilmiştir.

Seçilen rüzgar hızlarında kanatta oluşan şekil değişimleri birleştirilerek Şekil 6.23'de verilmiştir. Şekilden kanat yatay pozisyondayken kanada gelen rüzgar hızı arttıkça kanatta oluşan şekil değişiminin azaldığı görülmektedir (0 m/s'de en büyük şekil değişimi 4,0963 m, 5 m/s'de 4,059 m 15 m/s'de 3,7593 m). Bu durum rüzgar hızı arttıkça kanatta oluşan kaldırma kuvvetinin artarak kanadı yukarı doğru kaldırmaya çalışmasından kaynaklanmaktadır. 25 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan şekil değişimi en büyük değere (4,647 m) ulaşmaktadır. Yapılan çalışmalarda (Grujicic ve ark., 2010; Cai, ve ark., 2013) uçta oluşan şekil değişimin kanat uzunluğunun %10'unu geçmemesi önerilmektedir. Bu nedenle burada kanatta oluşan şekil değişimi kritik seviyeye (4,863 m) ulaşmıştır.



Şekil 6.23. Farklı rüzgar hızlarında kanatta oluşan en büyük şekil değişimleri

6.2.2 Gerilmeler

Rüzgar türbin kanatlarında normal ve kayma gerilmelerinin oluştuğu önceki kısımlarda belirtilmiştir. Bu kısımda, yapılan analizler sonucunda belirlenen farklı rüzgar hızlarında (0, 5, 15, 25 m/s) kanatta oluşan normal ve kayma gerilmeleri ile bu gerilmelerin ayrı ayrı yapacağı etkiyi teorik olarak tek başına yapacağı düşünülen eşdeğer gerilmeler verilmiştir.

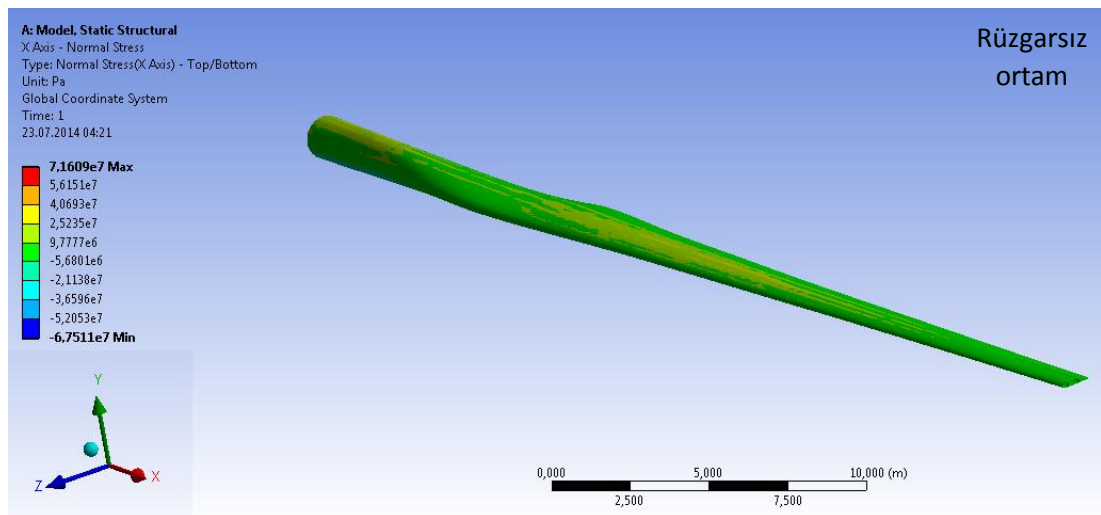
5 m/s'lik rüzgar hızı için kanatta oluşan bütün normal (σ_x , σ_y ve σ_z) ve kayma gerilmeleri (τ_{xy} , τ_{yz} ve τ_{xz}) değerlendirilmiş olup burada normal ve kayma gerilmeleri arasında baskın olanı göstermek amaçlanmaktadır.

6.2.2.1 Normal gerilme dağılımları

Kanadın mekanik davranışını belirlemek amacıyla yapılan analizler sonucunda belirlenen kanatta oluşan normal gerilme dağılımları aşağıda verilmiştir.

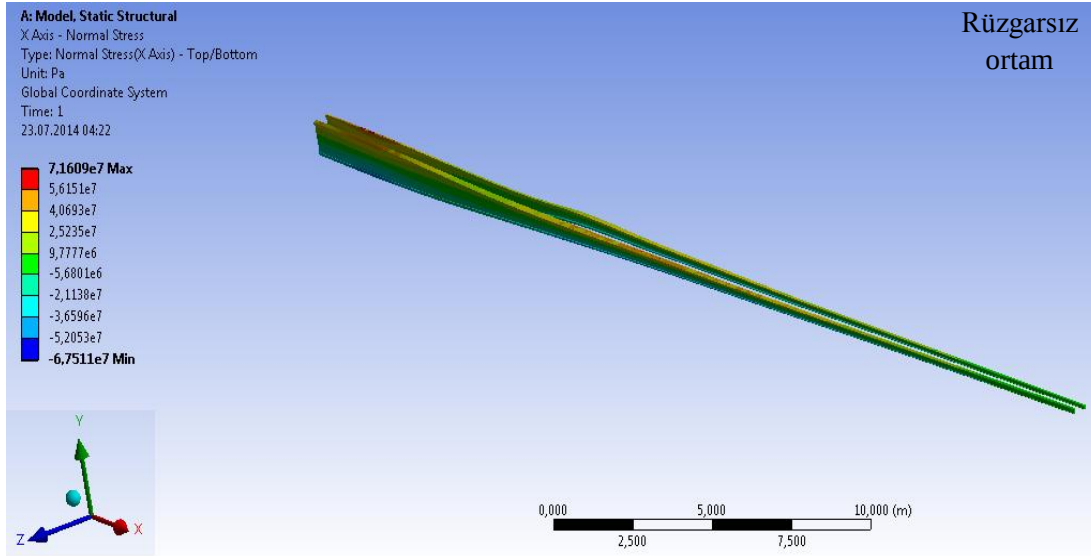
Kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan yerçekimi yüklerinin kanadın mekanik davranışına etkisini belirlemek amacıyla yapılan statik analiz sonucu belirlenen kanatta oluşan normal gerilme dağılımı (σ_x) Şekil 6.24'de verilmiştir.

Şekilde kanadın farklı bölgelerinde oluşan değişik büyüklükteki gerilmeler farklı renklerle gösterilmiştir. Şekilden kanadın kendi ağırlığı nedeniyle kanatta oluşan σ_x normal gerilmesinin en büyük değerinin 71,609 MPa olduğu görülmektedir. Rüzgar türbin kanatlarında en çok kanadın iç destek elemanında (spar) zorlanma olmaktadır. Bu nedenle kanadın iç destek elemanında oluşan normal gerilmeler belirlenerek Şekil 6.25'de verilmiştir.



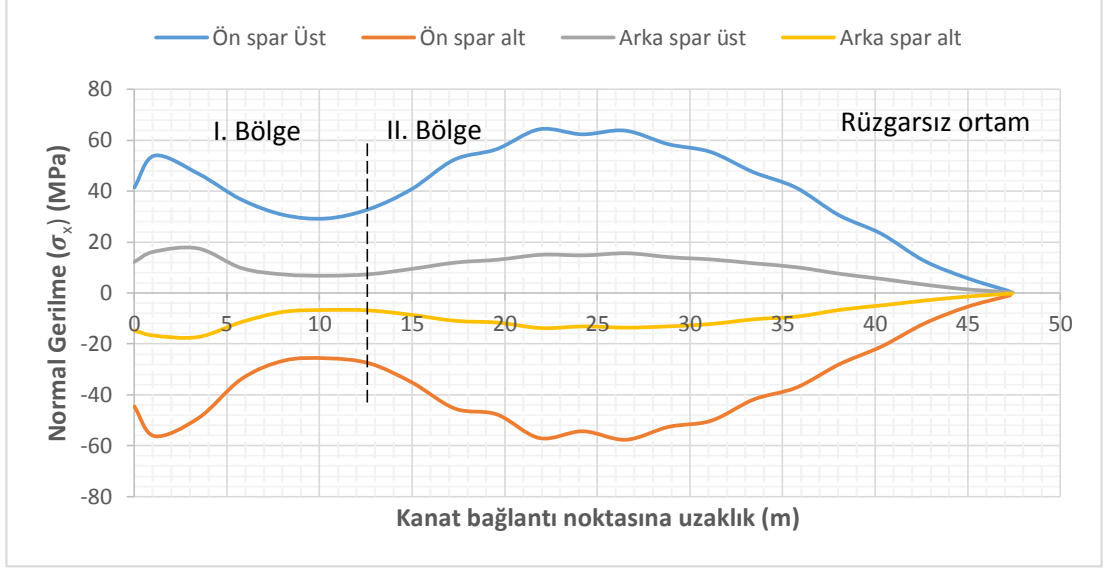
Şekil 6.24. Kanatta oluşan σ_x normal gerilmeleri

Şekilden kanadın kendi ağırlığı nedeniyle iç destek elemanında oluşan σ_x normal gerilmesinin en büyük değerinin kırmızı renkli olarak gösterilen bölgelerde ortaya çıktığı görülmektedir. Şekildeki gerilme skalasından iç destek elemanında oluşan normal gerilmeler tam olarak belirlenmemektedir. Bu nedenle kanadın statik analizine dönülerek kanadın dört farklı bölgesinde (ön spar üst, ön spar alt, arka spar üst, arka spar alt) kanat boyunca oluşan σ_x normal gerilmeleri belirlenmiş ve Şekil 6.26’da verilmiştir.



Şekil 6.25. Kanadın iç destek elemanlarında oluşan σ_x normal gerilmeleri

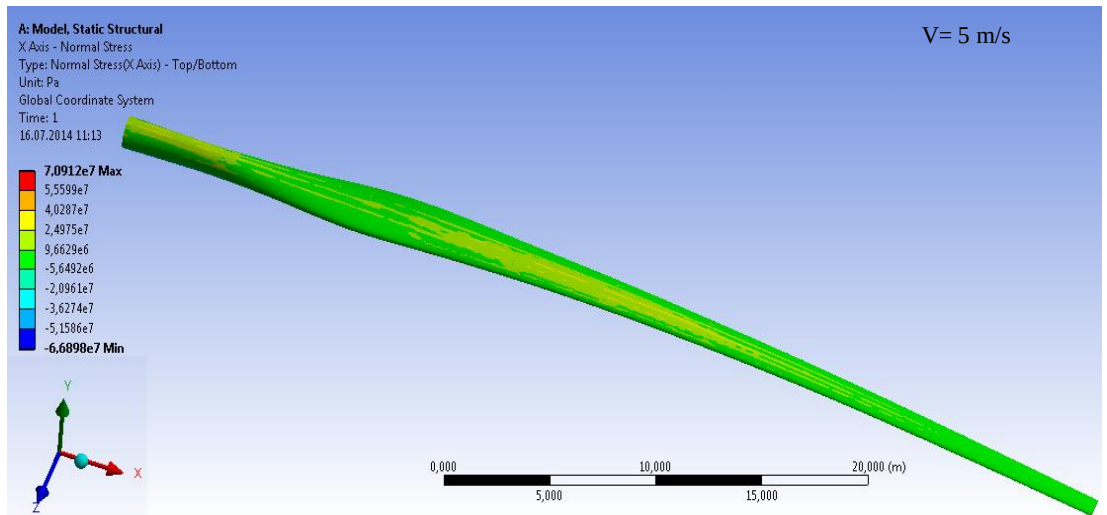
Şekilden kanadın ön spar bölgesinde pozitif, arka spar bölgesinde ise negatif gerilmeler olduğu belirlenmiştir. Kanatta oluşan pozitif normal gerilmeler çekme gerilmesi, negatif normal gerilmeler ise basma gerilmeleridir. İç destek elemanlarının üst yüzeyinde oluşan gerilmelerin alt yüzeyinde oluşan gerilmelerden yüksek olduğu yani üst yüzeylerin alt yüzeylerden daha fazla zorlanmaya maruz kaldıkları görülmektedir. Şekildeki gerilme dağılımı incelendiğinde; I. bölgede, ön sparın üst kısmında normal gerilmenin 42 MPa’dan başlayıp önce 52 MPa’ya yükseldiği sonra 30 MPa’ya düştüğü, arka sparın üst kısmında normal gerilmenin 12 MPa’dan başlayıp önce 30 MPa’ya yükseldiği sonra 10 MPa’ya düştüğü, arka sparın alt kısmında normal gerilmenin -12 MPa’dan başlayıp önce -20 MPa’ya yükseldiği sonra -10 MPa’ya düştüğü, ön sparın alt yüzeyinde ise -42 MPa’dan başlayıp önce -52 MPa’ya yükseldiği sonra 26 MPa’ya düştüğü görülmektedir. II. bölgede, ön sparın üst kısmında 35 MPa’dan başlayıp 68 MPa’ya yükselerek üst yüzeyde en büyük değerini aldığı sonra düzgün bir şekilde azalarak kanat ucunda sıfır olduğu, ön sparın alt kısmının 10 MPa’dan başlayıp 16 MPa’ya yükseldiği daha sonra azalarak kanat ucunda sıfır olduğu, arka sparın alt kısmının -10 MPa’dan başlayıp -15 MPa’ya yükseldiği daha sonra azalarak kanat ucunda sıfır olduğu, arka sparın üst kısmının -30 MPa’dan başlayıp -60 MPa’ya yükselerek en büyük değerini aldığı daha sonra ise azalarak kanat ucunda sıfır olduğu görülmektedir.



Şekil 6.26. Kanadın iç destek elemanının (spar) dört farklı bölgesinde oluşan σ_x normal gerilmeleri

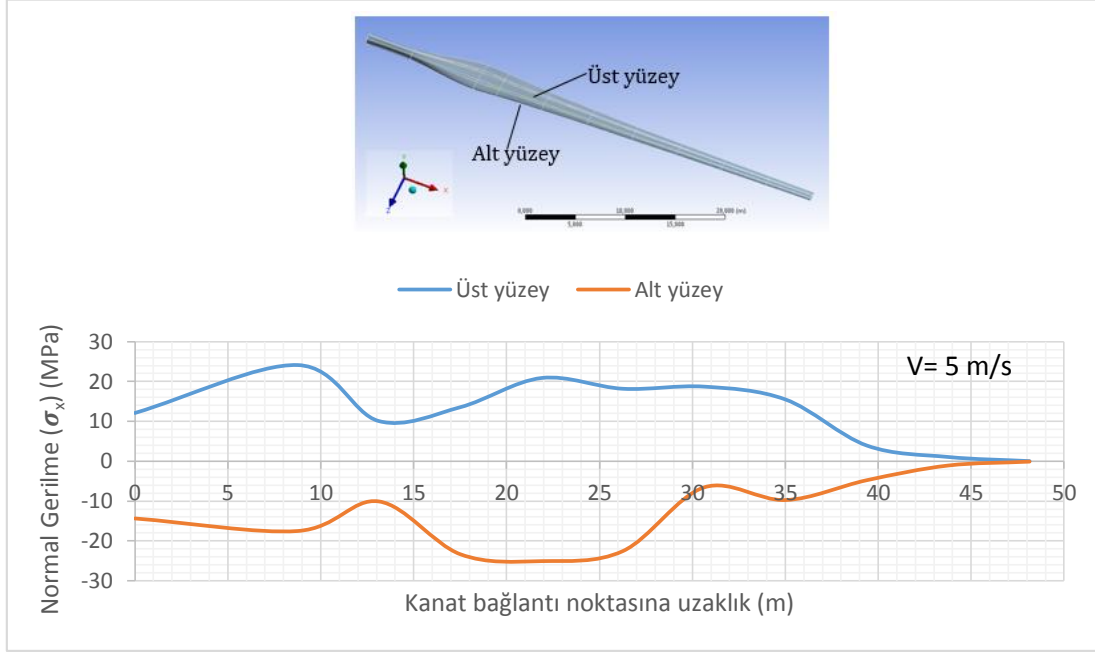
Kanadın 5 m/s'lik rüzgar hızında mekanik davranışını belirlemek amacıyla yapılan statik analiz sonucu kanatta oluşan normal gerilme dağılımları (σ_x , σ_y , σ_z) değerlendirilmiş olup σ_x normal gerilmesinin genel dağılımı Şekil 6.27'de verilmiştir.

Şekilden 5 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan en yüksek normal gerilmenin 70,912 MPa olduğu, kanadın üst yüzeyinde genellikle gerilme skalasına göre yeşil ve sarı renkli dağılıma sahip σ_x normal gerilmelerinin olduğu görülmektedir. Şekildeki gerilme skalasından kanatta oluşan normal gerilmeler tam olarak belirlenememektedir. Bu nedenle kanadın statik analizine dönülerek kanadın üst ve alt yüzeyinde kanat boyunca oluşan σ_x normal gerilmeleri belirlenmiş ve Şekil 6.26'da verilmiştir.



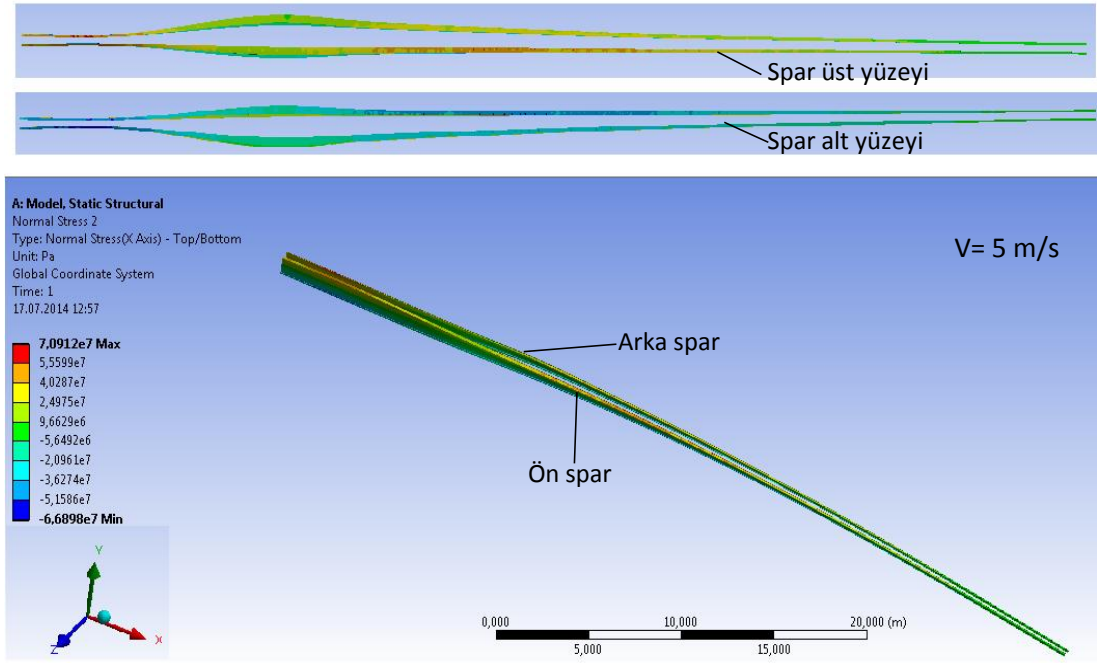
Şekil 6.27. Kanatta oluşan σ_x normal gerilmeleri

Şekilden kanadın üst yüzeyinde pozitif (çekme gerilmesi), alt yüzeyinde negatif (basma gerilmesi) σ_x gerilmesinin oluştuğu, kanadın üst yüzeyinde oluşan σ_x normal gerilmesinin en yüksek gerilmenin 28 MPa, en düşük 0 (kanat ucunda) olduğu görülmektedir. Kanadın alt yüzeyinde oluşan σ_x gerilmesinin en büyük değerinin -25 MPa, en düşük değerinin ise 0 (kanat ucunda) olduğu gözlemlenmiştir.



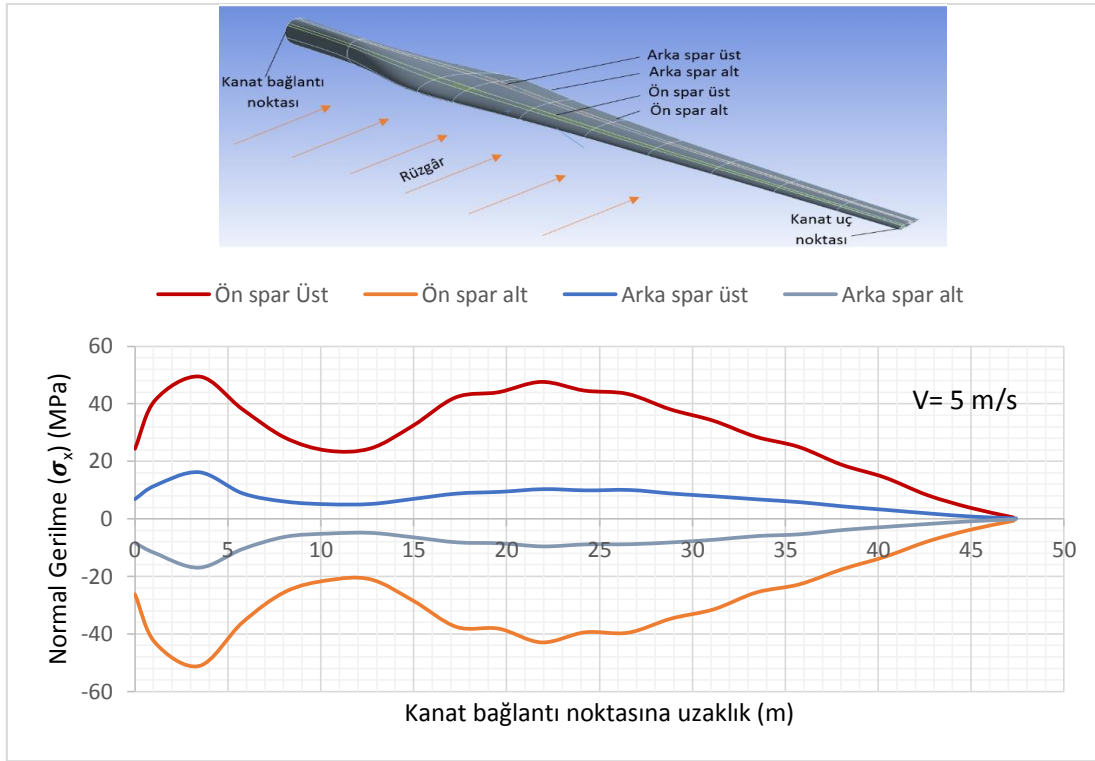
Şekil 6.28. Kanadın üst ve alt yüzeyinde oluşan σ_x gerilmeleri

Kanadın iç destek elemanlarında oluşan normal gerilmelerin genel dağılımı Şekil 6.29’da verilmiştir. Şekilden kanadın iç destek elemanında oluşan σ_x normal gerilmesinin en büyük değerinin kırmızı renkli olarak gösterilen bölgelerde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Kanadın dört farklı bölgesinde (ön spar üst, ön spar alt, arka spar üst, arka spar alt) kanat boyunca oluşan σ_x normal gerilmeleri belirlenmiş ve Şekil 6.30’da verilmiştir.



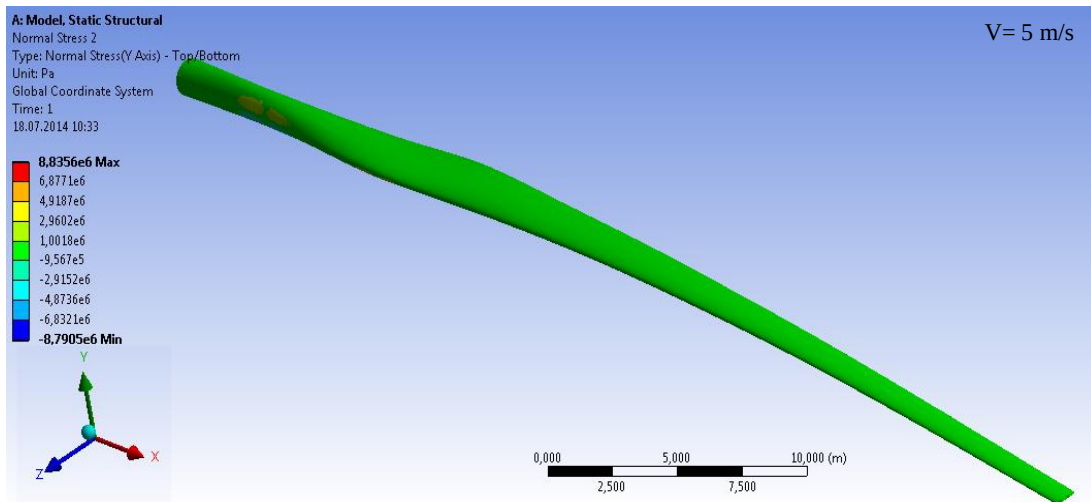
Şekil 6.29. Kanadın iç destek elemanlarında oluşan σ_x normal gerilmeleri

Şekilden kanadın iç destek elemanlarının seçilen kısımlarındaki normal gerilmelerin kanadın rüzgarsız ortamdaki davranışına benzer olduğu görülmektedir. Kanadın iç destek elemanlarındaki normal gerilmeler incelendiğinde; en yüksek gerilme değerinin, ön sparın üst kısmında 52 MPa, arka sparın üst kısmında 16 MPa, arka sparın alt kısmında -18 MPa ve ön sparın üst kısmında -56 MPa olduğu, ayrıca seçilen bölgedeki gerilmelerin kanadın uç kısmında sıfır olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.30. Kanadın iç destek elemanının (spar) dört farklı bölgesinde oluşan σ_x normal gerilmeleri

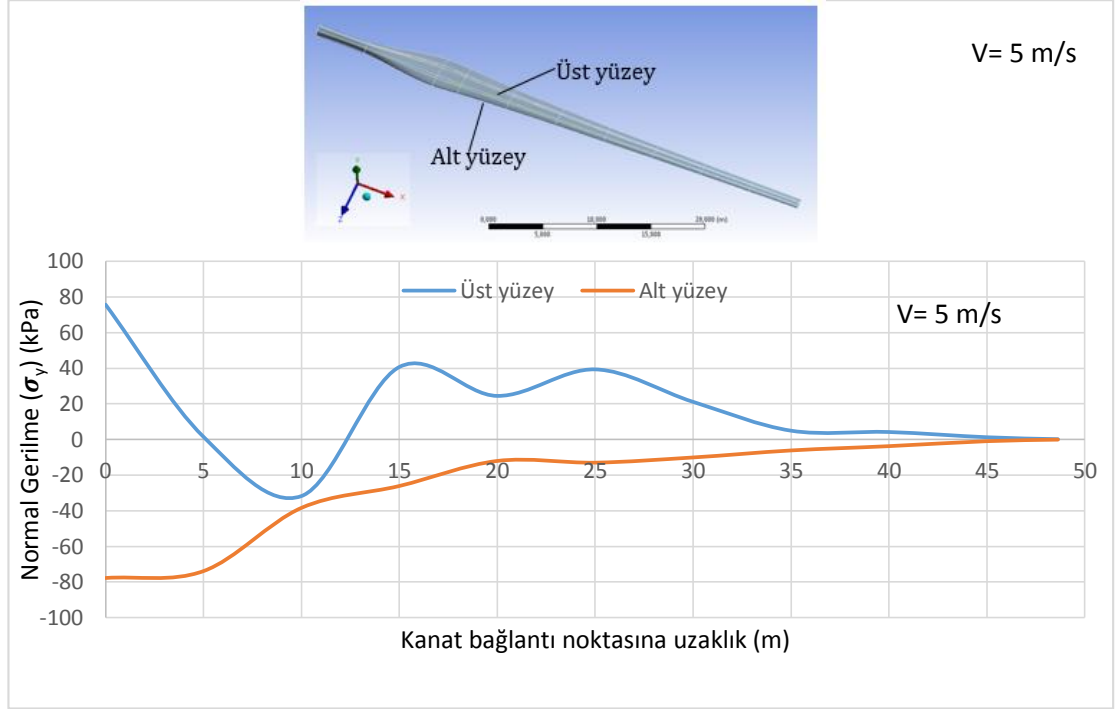
5 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan σ_y normal gerilmelerinin genel dağılımı Şekil 6.29'da verilmiştir. Şekilden kanatta oluşan σ_y gerilmesinin en büyük değerinin 8,835 MPa olduğu, kanat yüzeyinde genellikle gerilme skalasına göre yeşil olarak gösterilen gerilmeler (1 MPa ile -0,9 MPa aralığında) olduğu görülmektedir. Kanadın üst ve alt yüzeyinde kanat boyunca oluşan σ_y normal gerilmeleri belirlenmiş ve Şekil 6.31'de verilmiştir.



Şekil 6.31. Kanatta oluşan σ_y normal gerilmeleri

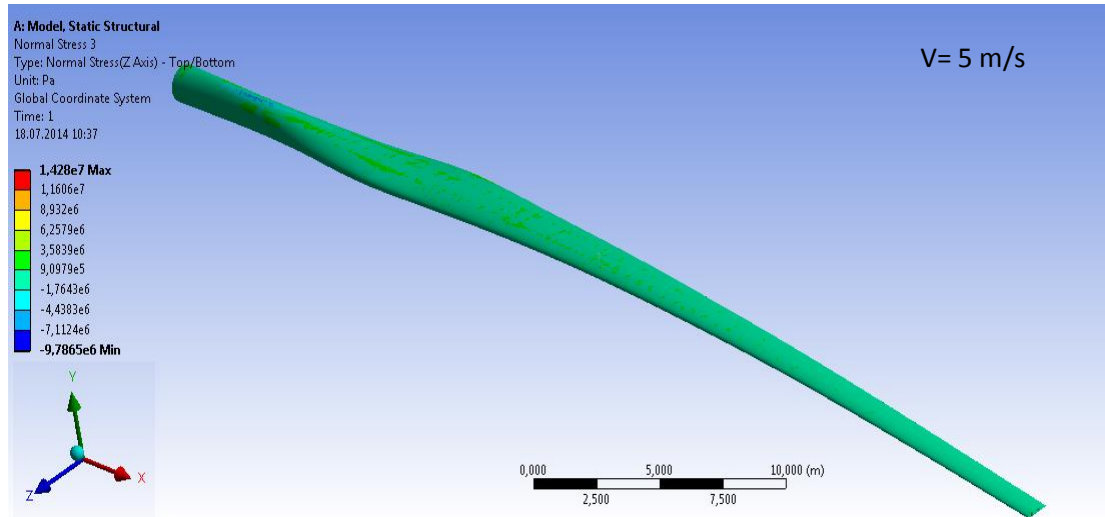
Şekilden kanadın üst yüzeyinde pozitif (çekme gerilmesi), alt yüzeyinde negatif (basma gerilmesi) σ_y gerilmelerinin olduğu görülmektedir. Ayrıca, kanadın üst yüzeyinde

oluşan en büyük gerilmenin 77 kPa, en düşük gerilmenin ise 0 (kanat ucunda), kanadın alt yüzeyinde oluşan en büyük gerilmenin -79 kPa en düşük gerilmenin ise 0 (kanat ucunda) olduğu gözlemlenmiştir.



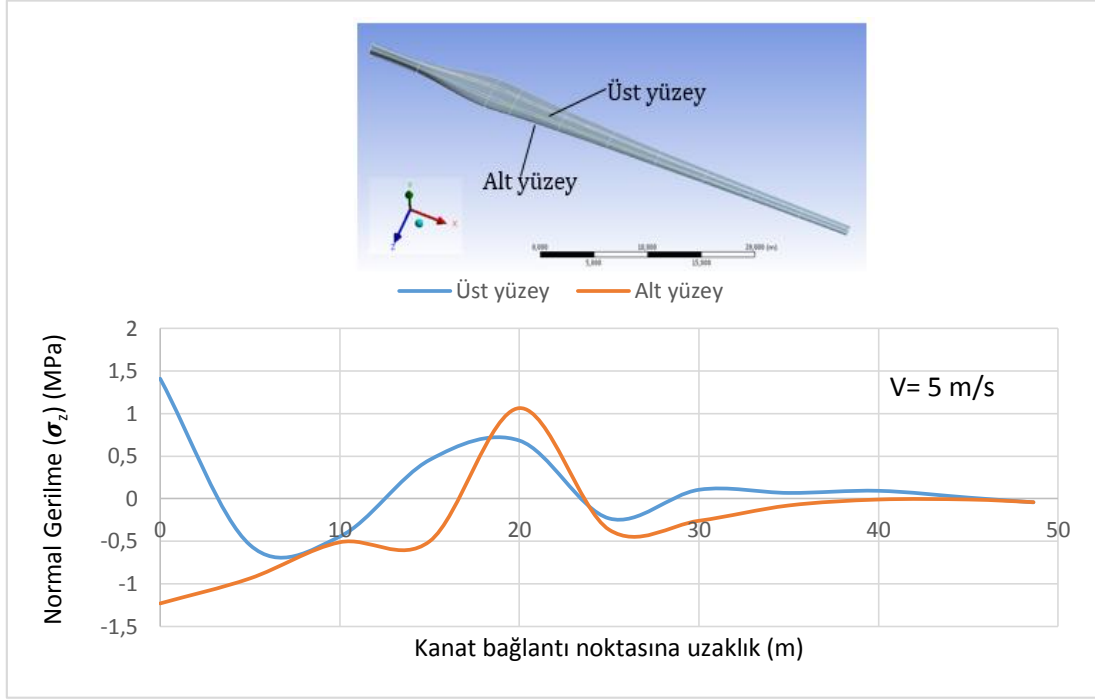
Şekil 6.32. Kanadın üst ve alt yüzeyinde oluşan σ_y gerilmeleri

5 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan σ_z normal gerilmelerinin genel dağılımı Şekil 6.33'de verilmiştir. Şekilden kanatta oluşan σ_z gerilmesinin en büyük değerinin 14,8 MPa olduğu, kanat yüzeyinde genellikle gerilme skalasına göre açık mavi olarak gösterilen gerilmeler (0,9 MPa ile -1,76 MPa aralığında) olduğu görülmektedir. Kanadın üst ve alt yüzeyinde kanat boyunca oluşan σ_z normal gerilmeleri belirlenmiş ve Şekil 6.34'de verilmiştir.



Şekil 6.33. Kanadın iç destek elemanlarında oluşan σ_z normal gerilmeleri

Şekilden kanadın üst yüzeyinde genellikle pozitif (çekme gerilmesi), alt yüzeyinde ise genellikle negatif (basma gerilmesi) σ_z gerilerinin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, kanadın üst yüzeyinde oluşan en büyük gerilmenin 1,3 MPa, kanadın alt yüzeyinde oluşan en büyük gerilmenin ise -1,2 MPa olduğu, kanadın uç kısmında bu gerilmelerin 0 olduğu gözlemlenmiştir.

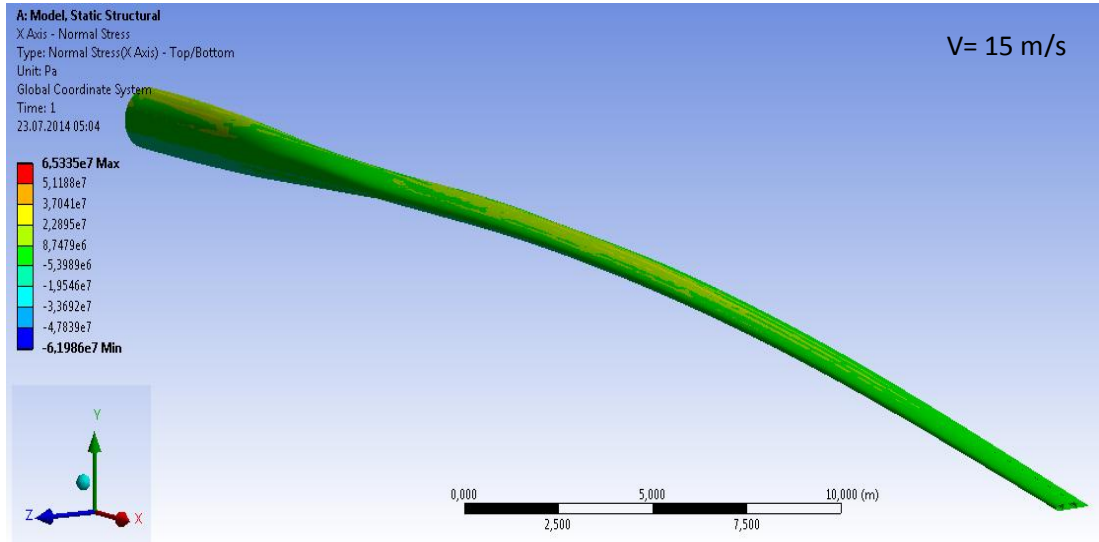


Şekil 6.34. Kanadın üst ve alt yüzeyinde oluşan σ_z gerilmeleri

Kanatta oluşan σ_x , σ_y ve σ_z normal gerilmeleri karşılaştırıldığında, σ_x gerilmesinin diğerlerinden daha yüksek değerde olduğu (X yönündeki normal gerilmelerin baskın olduğu) belirlenmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada diğer normal hızlarında kanatta oluşan normal gerilmeler değerlendirilirken normal gerilme olarak σ_x normal gerilmesi dikkate alınacaktır.

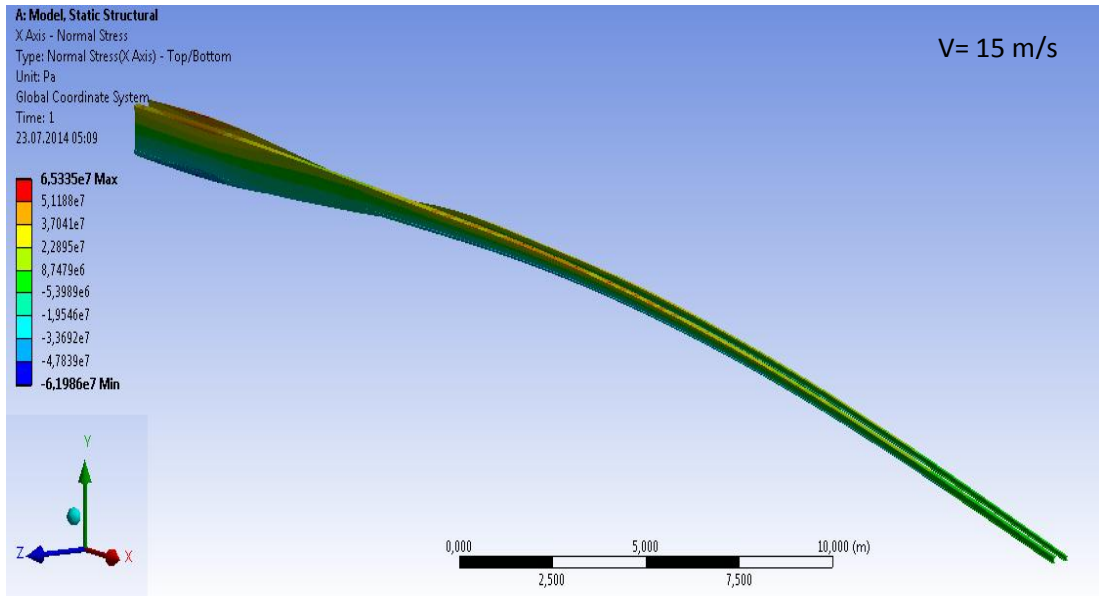
15 m/s'lik rüzgar hızında kanadın mekanik davranışını belirlemek amacıyla yapılan statik analiz sonucu belirlenen kanatta oluşan normal gerilme dağılımı (σ_x) Şekil 6.35'de verilmiştir.

Şekilde kanadın farklı bölgelerinde oluşan değişik büyüklükteki gerilmeler farklı renklerle gösterilmiştir. Şekilden kanatta oluşan σ_x normal gerilmesinin en büyük değerinin 65,335 MPa olduğu görülmektedir. Rüzgar türbin kanatlarında en çok kanadın iç destek elemanında (spar) zorlanma olmaktadır. Bu nedenle kanadın iç destek elemanında oluşan normal gerilmeler belirlenerek Şekil 6.36'da verilmiştir.



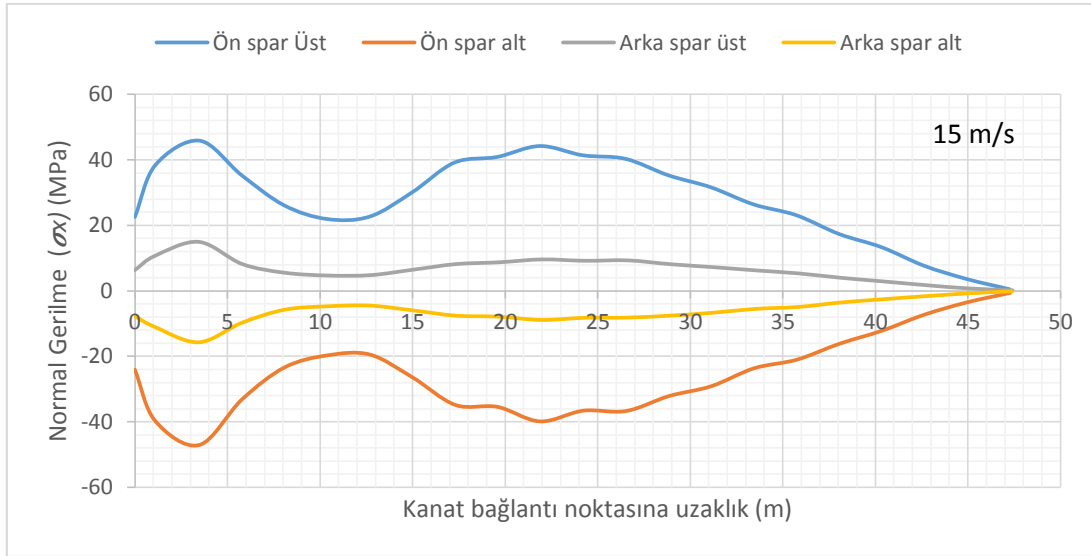
Şekil 6.35. Kanatta oluşan σ_x normal gerilmeleri

Şekilden 15 m/s'lik rüzgar hızında kanadın iç destek elemanında oluşan σ_x normal gerilmesinin en büyük değerinin kırmızı renkli olarak gösterilen bölgelerde ortaya çıktığı görülmektedir. Kanadın dört farklı bölgesinde (ön spar üst, ön spar alt, arka spar üst, arka spar alt) kanat boyunca oluşan σ_x normal gerilmeleri belirlenmiş ve Şekil 6.37'de verilmiştir.



Şekil 6.36. Kanadın iç destek elemanlarında oluşan σ_x normal gerilmeleri

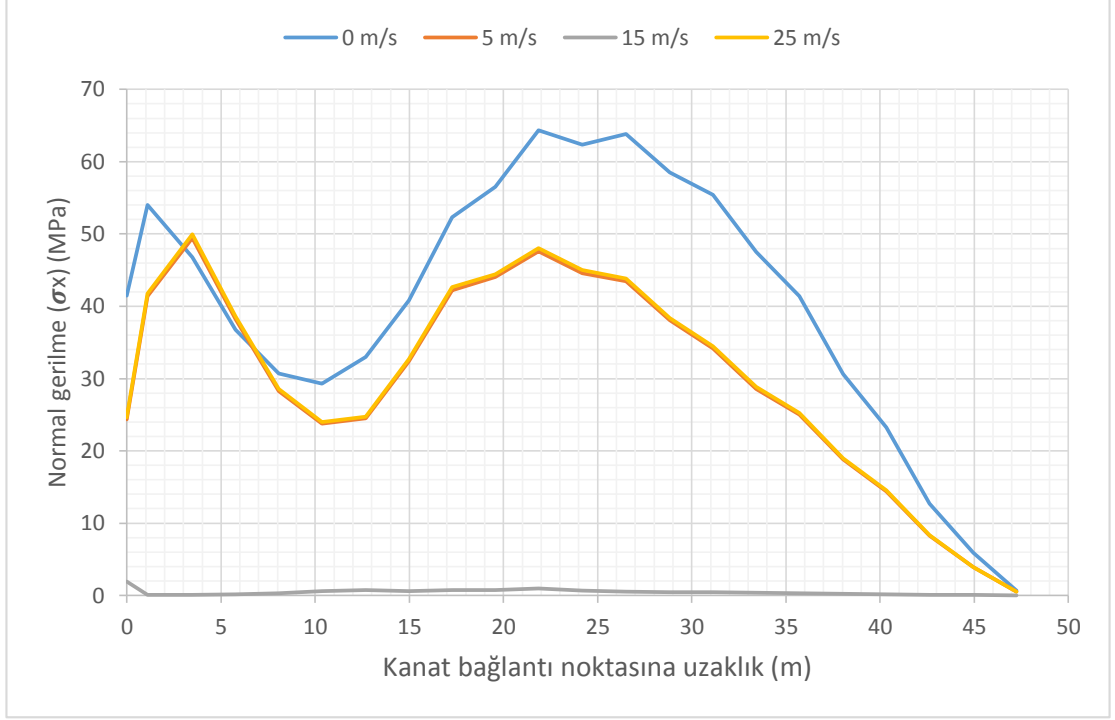
Şekilden kanadın iç destek elemanlarının seçilen kısımlarındaki normal gerilmelerin kanadın rüzgarsız ortamdaki ve 5 m/s'lik rüzgar hızındaki davranışına benzer olduğu görülmektedir. Kanadın iç destek elemanlarındaki normal gerilmeler incelendiğinde; en yüksek gerilme değerinin, ön sparın üst kısmında 46 MPa, arka sparın üst kısmında 16 MPa, arka sparın alt kısmında -16 MPa ve ön sparın üst kısmında -48 MPa olduğu, ayrıca seçilen bölgedeki gerilmelerin kanadın uç kısmında sıfır olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.37. Kanadın iç destek elemanının (spar) dört farklı bölgesinde oluşan σ_x normal gerilmeleri

25 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan normal gerilmeler de belirlenmiş olup bu gerilmeler diğer rüzgar hızlarındaki benzer bir davranış gösterdiğinden burada paylaşılmamıştır. Seçilen rüzgar hızlarında kanatta oluşan σ_x normal gerilmeleri birleştirilerek Şekil 6.38'de verilmiştir. Şekilden kanat yatay pozisyondayken kanada gelen rüzgar hızı arttıkça kanatta oluşan en büyük normal gerilmelerin azaldığı görülmektedir (0 m/s'de en büyük normal gerilme 64,33 MPa, 5 m/s'de 49,48 MPa, 15 m/s'de 1,93 MPa). Bu durum rüzgar hızı arttıkça kanatta oluşan kaldırma kuvvetinin artarak kanadı yukarı doğru kaldırmaya çalışmasından kaynaklanmaktadır. Çizelge 5.4'de bulunan rüzgar türbin kanatlarında kullanılan E-Cam/Epoksi malzemenin mekanik özellikleri incelendiğinde, E Cam/Epoksi malzemesinin akma gerilmesinin 200 MPa olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu tasarımda belirlenen rüzgar hızlarındaki mekanik davranış analizine göre emniyetlidir (emniyet katsayısı $s=3,11$).

Şekilden kanatta oluşan normal gerilmelerin en yüksek değerini kanadın orta kısmında aldığı görülmektedir. Normal gerilmeler kanatta oluşan eğilme gerilmesinin bir göstergesidir. Bu nedenle kanatta en yüksek eğilme gerilmesi kanadın orta kısmında, en düşük eğilme gerilmesi ise kanadın uç kısmında oluşmaktadır. Bu durum kanat geometrisinin düzensizliğinden kaynaklanmaktadır.

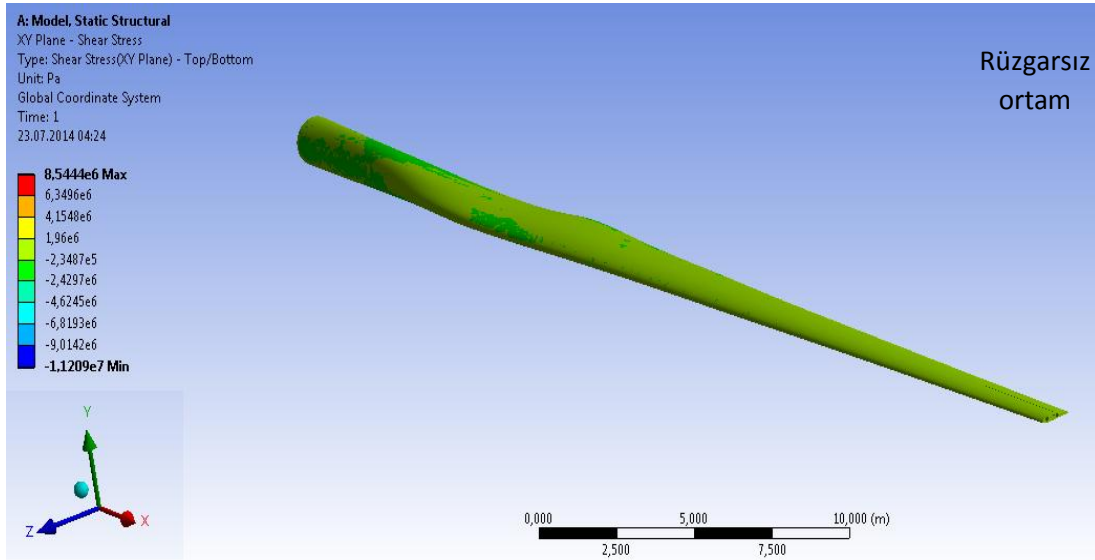


Şekil 6.38. Farklı rüzgar hızlarında kanatta oluşan en büyük σ_x normal gerilmelerinin kanat boyunca değişimi

6.2.2.2 Kayma gerilmesi

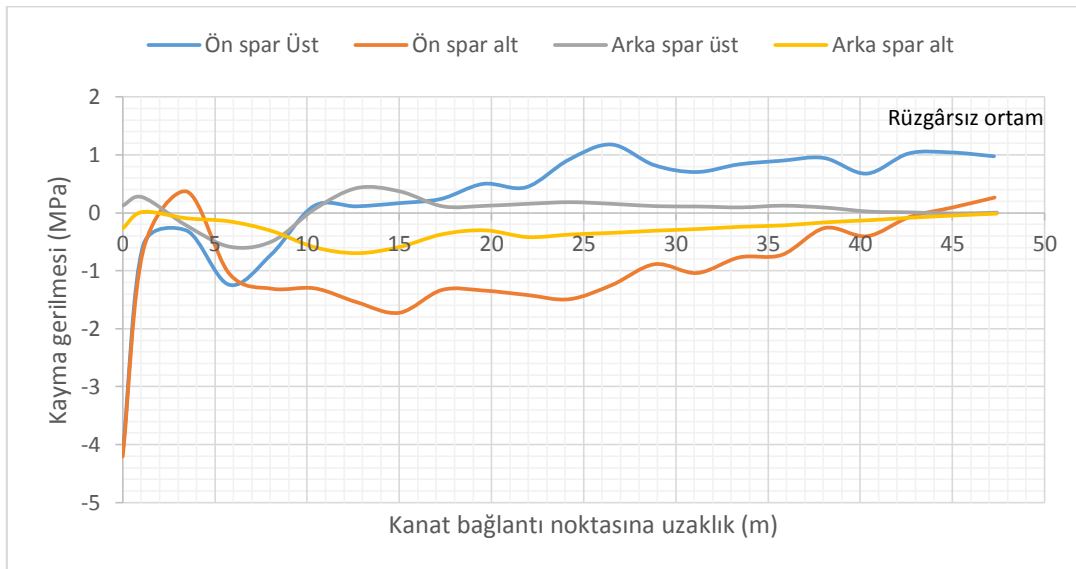
Kanadın mekanik davranışını belirlemek amacıyla yapılan analizler sonucunda belirlenen kanatta oluşan normal gerilme dağılımları aşağıda verilmiştir.

Kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan yerçekimi yüklerinin kanadın mekanik davranışına etkisini belirlemek amacıyla yapılan statik analiz sonucu belirlenen kanatta oluşan kayma gerilmesi dağılımı (τ_{xy}) Şekil 6.39’da verilmiştir. Şekilden kanadın kendi ağırlığı nedeniyle kanatta oluşan τ_{xy} kayma gerilmesinin en büyük değerinin 8,54 MPa olduğu görülmektedir. Şekilden kanatta oluşan kayma gerilmeleri hassas bir şekilde belirlenememektedir. Bu nedenle kanadın en çok zorlanan bileşeni olan iç destek elemanın dört farklı bölgesinde (ön spar üst, ön spar alt, arka spar üst, arka spar alt) oluşan kayma gerilmelerinin kanat boyunca değişimi belirlenerek Şekil 6.40’da verilmiştir.



Şekil 6.39. Kanatta oluşan τ_{xy} kayma gerilmesi

Şekilden kanatta oluşan kayma gerilmelerinden ön sparda oluşan gerilmelerin arka sparda oluşan gerilmelerden, ön sparda oluşan gerilmeler arasında ise üst yüzeyde oluşan gerilmelerin alt yüzeyde oluşan gerilmelerden yüksek olduğu görülmektedir.

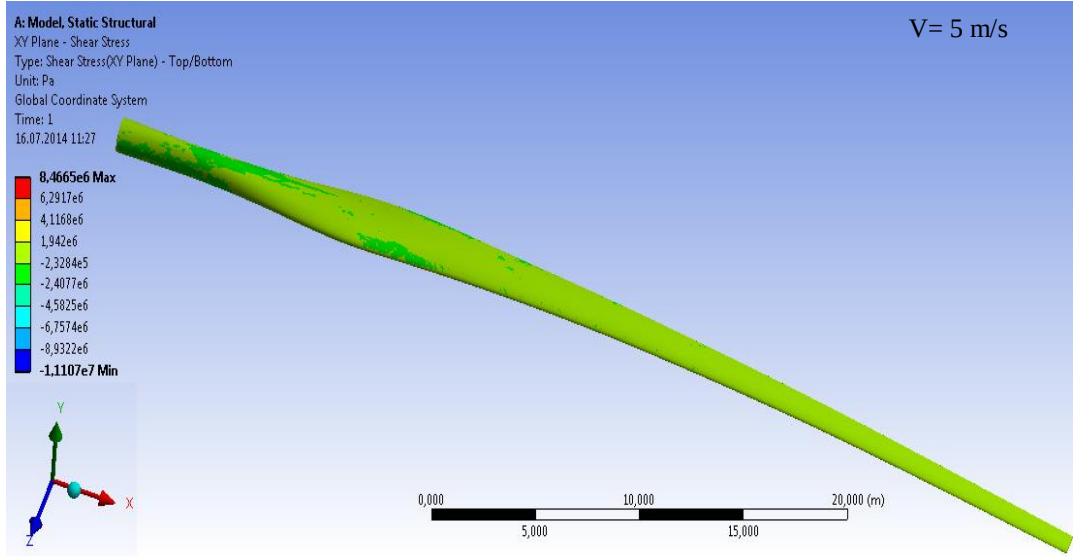


Şekil 6.40. Kanatta oluşan τ_{xy} kayma gerilmesinin kanat boyunca değişimi

Kanadın 5 m/s'lik rüzgar hızında mekanik davranışını belirlemek amacıyla yapılan statik analizinde kanatta oluşan kayma gerilmeleri (τ_{xy} , τ_{yz} ve τ_{xz}) değerlendirilmiş olup bu rüzgar hızında kanatta oluşan τ_{xy} kayma gerilmesinin genel dağılımı Şekil 6.41'de verilmiştir.

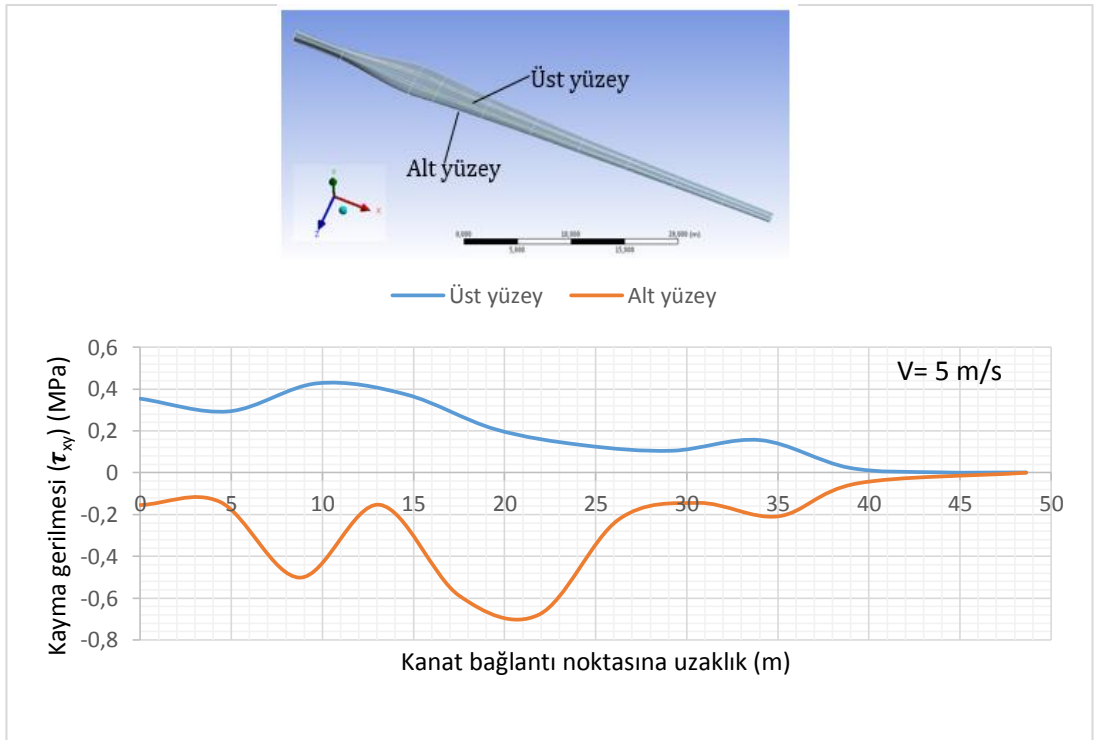
Şekilden 5 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan en yüksek τ_{xy} kayma gerilmesinin 8,466 MPa olduğu, kanadın üst yüzeyinde genellikle gerilme skalasına göre yeşil renkli dağılıma sahip gerilmelerin olduğu görülmektedir. Şekildeki gerilme skalasından kanatta oluşan gerilmeler tam olarak belirlenememektedir. Bu nedenle kanadın statik analizine

dönülerek kanadın üst ve alt yüzeyinde kanat boyunca oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri belirlenmiş ve Şekil 6.42’de verilmiştir.



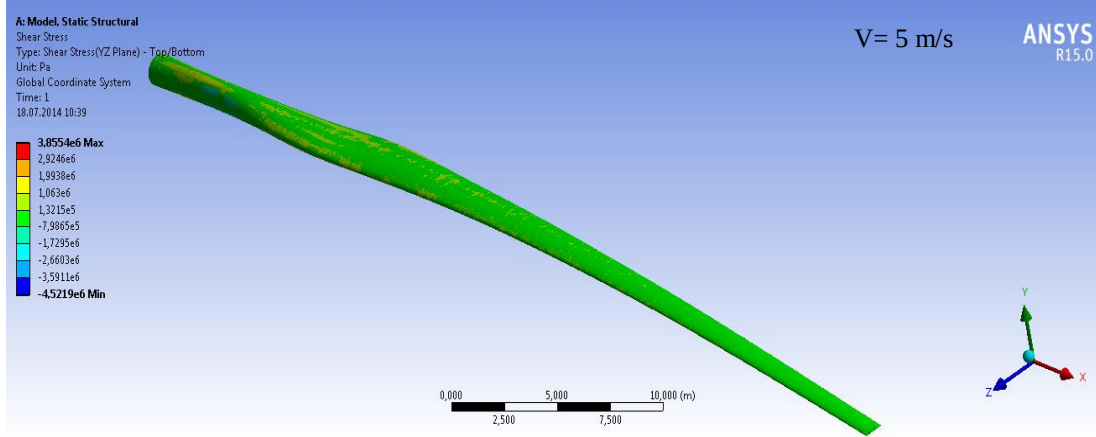
Şekil 6.41. Kanatta oluşan τ_{xy} kayma gerilmesi

Şekilden kanadın üst ve alt yüzeyinde oluşan τ_{xy} kayma gerilmesinin 0,4 ile -0,5 MPa aralığında olduğu, bu gerilemelerin kanat boyunca dalgalı bir değişim gösterdiği ve kanat ucunda sıfır olduğu görülmektedir.



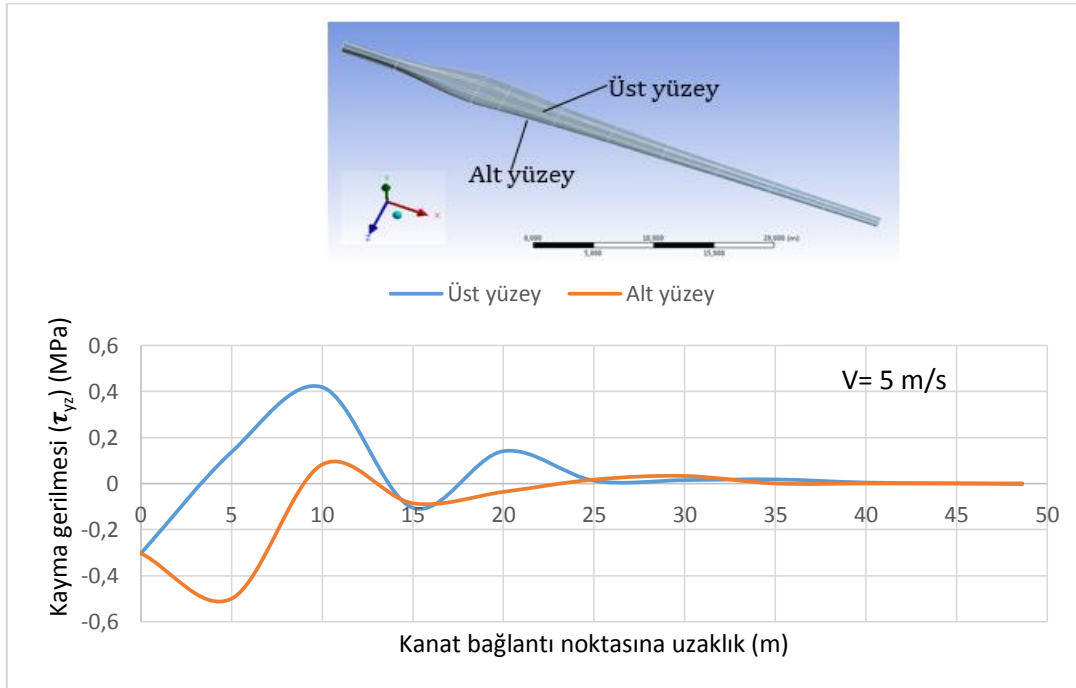
Şekil 6.42. Kanadın üst ve alt yüzeyinde oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri

Şekil 6.43’de kanatta oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri görülmektedir. Şekilden 5 m/s’lik rüzgar hızında kanatta oluşan en yüksek τ_{yz} kayma gerilmesinin 3,855 MPa olduğu, kanadın üst yüzeyinde genellikle gerilme skalasına göre yeşil renkli dağılıma sahip gerilmelerin oluştuğu görülmektedir. Kanadın üst ve alt yüzeyinde kanat boyunca oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri Şekil 6.44’de verilmiştir.



Şekil 6.43. Kanatta oluşan τ_{yz} kayma gerilmesi

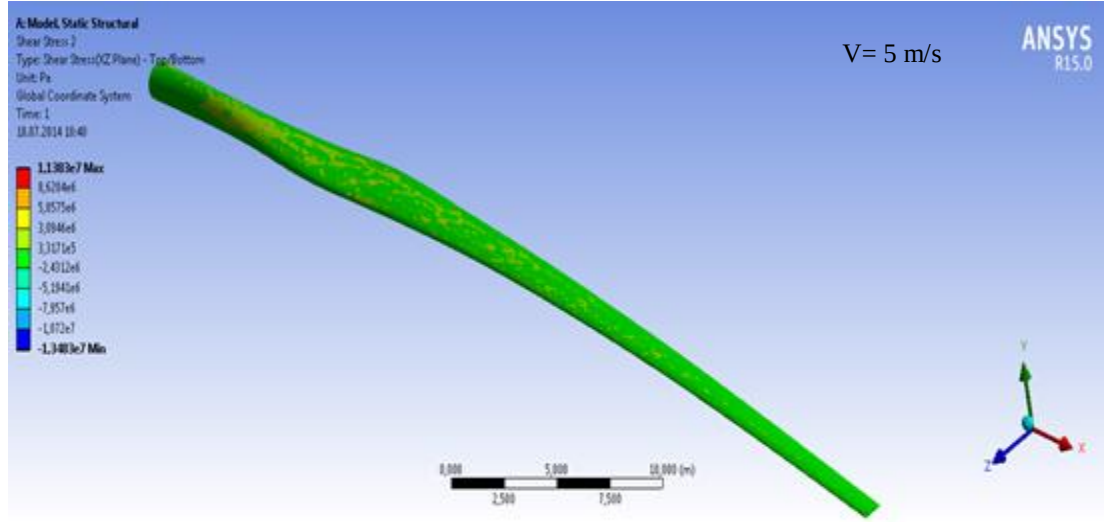
Şekilden kanadın üst ve alt yüzeyinde oluşan τ_{yz} kayma gerilmesinin 0,41 ile -0,45 MPa aralığında olduğu, bu gerilemelerin kanat boyunca dalgalı bir değişim gösterdiği ve kanat ucunda sıfır olduğu görülmektedir.



Şekil 6.44. Kanadın üst ve alt yüzeyinde oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri

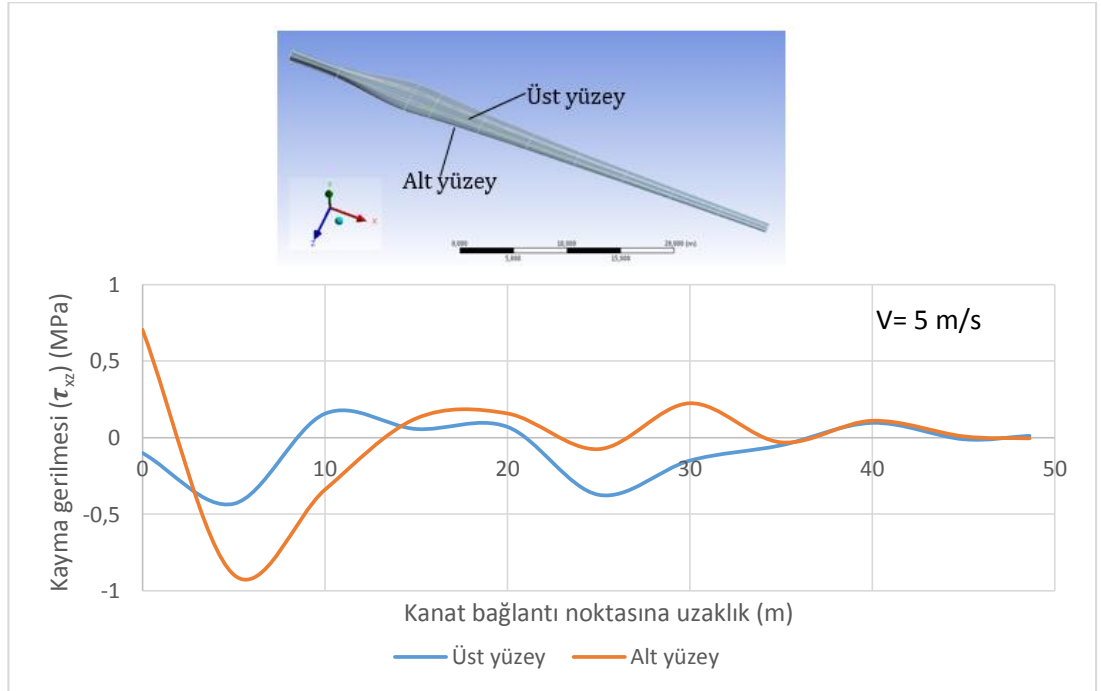
Şekil 6.45’de 5 m/s’lik rüzgar hızında kanatta oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri görülmektedir. Şekilden kanatta oluşan en yüksek τ_{yz} kayma gerilmesinin 1,38 MPa olduğu,

kanadın üst yüzeyinde genellikle gerilme skalasına göre yeşil renkli dağılıma sahip gerilmelerin oluştuğu görülmektedir. Kanadın üst ve alt yüzeyinde kanat boyunca oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri Şekil 6.46'da verilmiştir.



Şekil 6.45. Kanatta oluşan τ_{xz} kayma gerilmesi

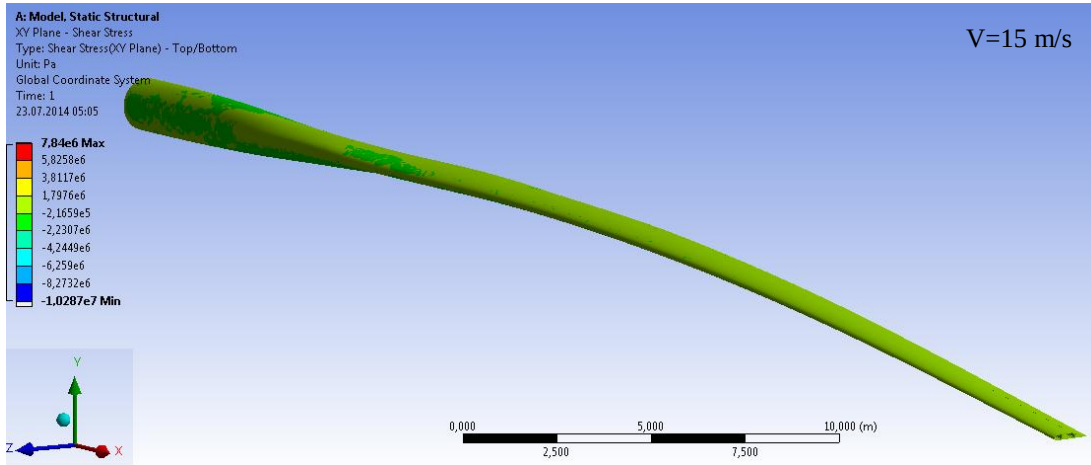
Şekilden kanadın üst ve alt yüzeyinde oluşan τ_{xz} kayma gerilmesinin 0,6 ile -0,9 MPa aralığında olduğu, bu gerilemelerin kanat boyunca dalgalı bir değişim gösterdiği ve kanat ucunda sıfır olduğu görülmektedir.



Şekil 6.46. Kanadın üst ve alt yüzeyinde oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri

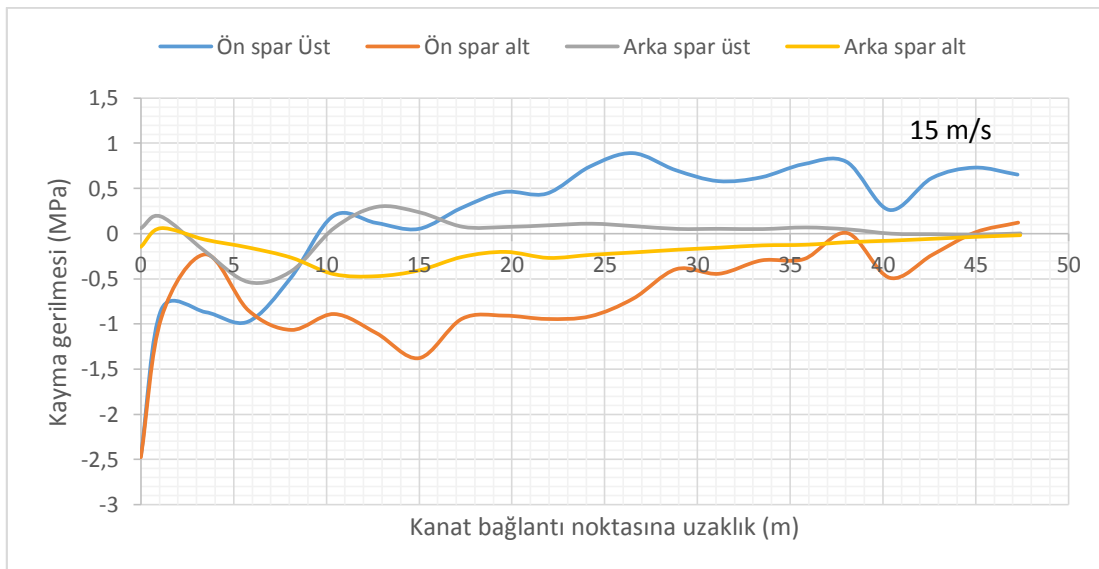
Kanatta oluşan τ_{xy} , τ_{yz} ve τ_{xz} gerilmeleri karşılaştırıldığında, τ_{xy} gerilmelerinin diğerlerinden daha yüksek değerde olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada kanatta oluşan kayma gerilmeleri değerlendirilirken τ_{xy} kayma gerilmesi dikkate alınacaktır.

15 m/s'lik rüzgar hızında kanadın mekanik davranışını belirlemek amacıyla yapılan statik analiz sonucu belirlenen kanatta oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri Şekil 6.47'de verilmiştir. Şekilden kanatta oluşan kayma gerilmelerinin 7,8 MPa ile -18,287 MPa aralığında olduğu görülmektedir. Kanadın dört farklı bölgesinde (ön spar üst, ön spar alt, arka spar üst, arka spar alt) kanat boyunca oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri Şekil 6.48'de verilmiştir.



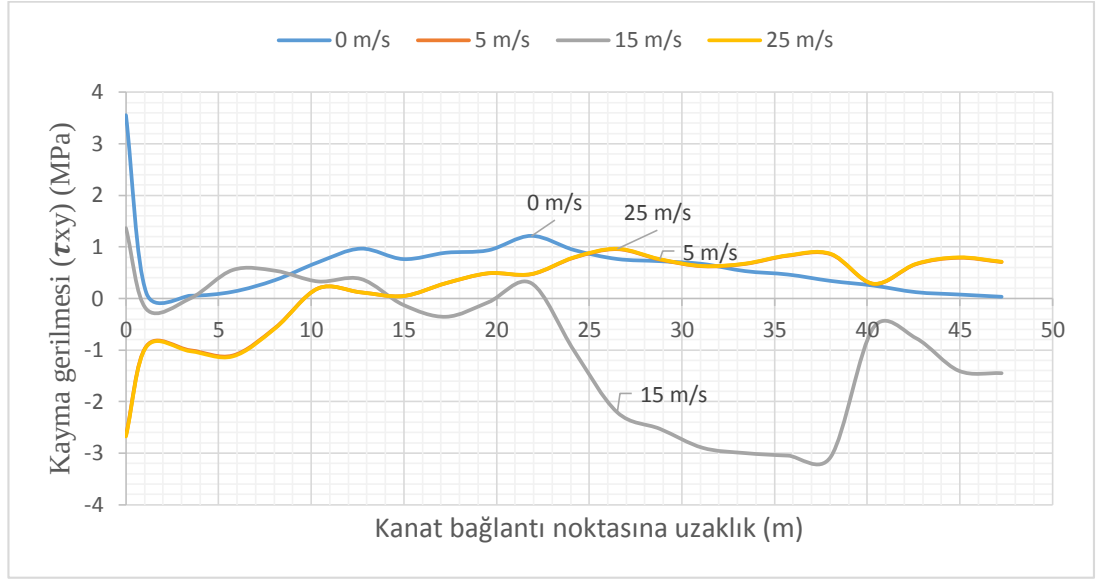
Şekil 6.47. Kanatta oluşan τ_{xy} kayma gerilmesi

Şekilden kanatta oluşan kayma gerilmelerinden ön sparda oluşan gerilmelerin arka sparda oluşan gerilmelerden, ön sparda oluşan gerilmeler arasında ise üst yüzeyde oluşan gerilmelerin alt yüzeyde oluşan gerilmelerden yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 6.48. Kanatta oluşan τ_{xy} kayma gerilmesinin kanat boyunca değişimi

Seçilen rüzgar hızlarında yapılan analizler sonucu belirlenen kanatta oluşan kayma gerilmeleri birleştirilerek Şekil 6.49’da verilmiştir. Şekilden 0 ve 5 m/s’lik rüzgar hızında kanatta oluşan kayma gerilmelerinin birbirine çok yakın değerde olduğu bu nedenle grafikte mavi (0 m/s) ve 5 m/s’lik rüzgar hızlarında kanatta oluşan kayma gerilmesi eğrilerinin üst üste geldiği görülmektedir. Şekilden rüzgar hızı arttıkça kanatta oluşan gerilmelerin azaldığı gözlemlenmiştir (15 m/s’lik rüzgar hızında kanatta oluşan kayma gerilmeleri 0 ve 5 m/s rüzgar hızında oluşan gerilmelerden daha düşük değerde). Ayrıca türbin devreden çıktığında (kanat yatay konumdan düşey konuma getirildiğinde kanatta oluşan gerilmelerin kanadın ilk 10 ‘lık kısmında yön değıştirdiği gözlemlenmiştir.

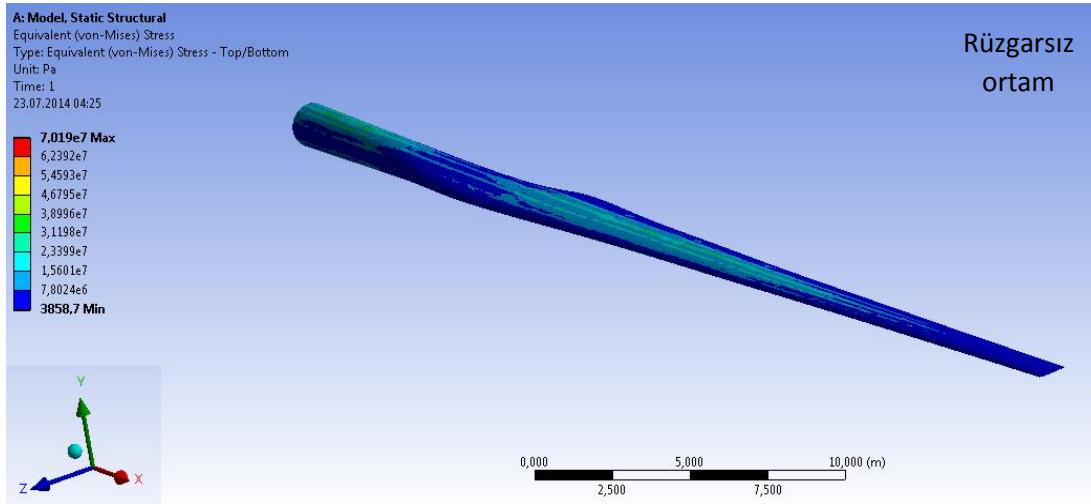


Şekil 6.49. Farklı rüzgar hızlarında kanatta oluşan τ_{xy} kayma gerilmesinin kanat boyunca değışimi

6.2.2.3 Eşdeğer Gerilme

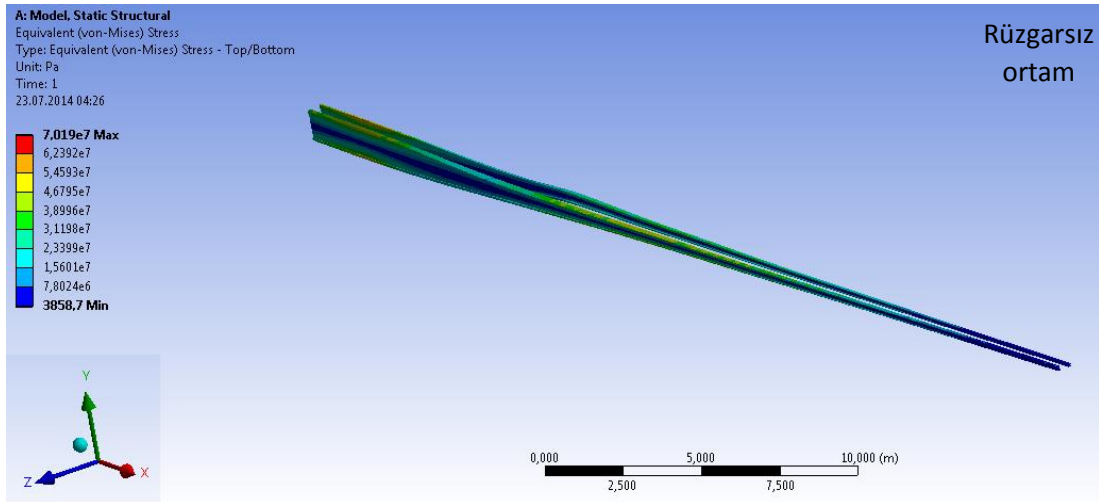
Rüzgar türbin kanatlarında normal ve kayma gerilmeleri oluştuğundan bu gerilmelerin ayrı ayrı yapacağı etkiyi teorik olarak tek başına yapacağı düşünölen eşdeğer gerilmelerin de incelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla belirlenen rüzgar hızlarında kanatta oluşan eşdeğer gerilmeler belirlenerek aşağıda verilmiştir.

Kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan yerçekimi yükleri (rüzgarsız ortam (0 m/s’lik rüzgar hızı) nedeniyle kanatta oluşan genel eşdeğer gerilme dağılımı belirlenerek Şekil 6.50’de verilmiştir. Şekilden kanatta 70,19 MPa ile 3858,7 Pa aralığında bir eşdeğer gerilme oluştuğu görölmektedir.



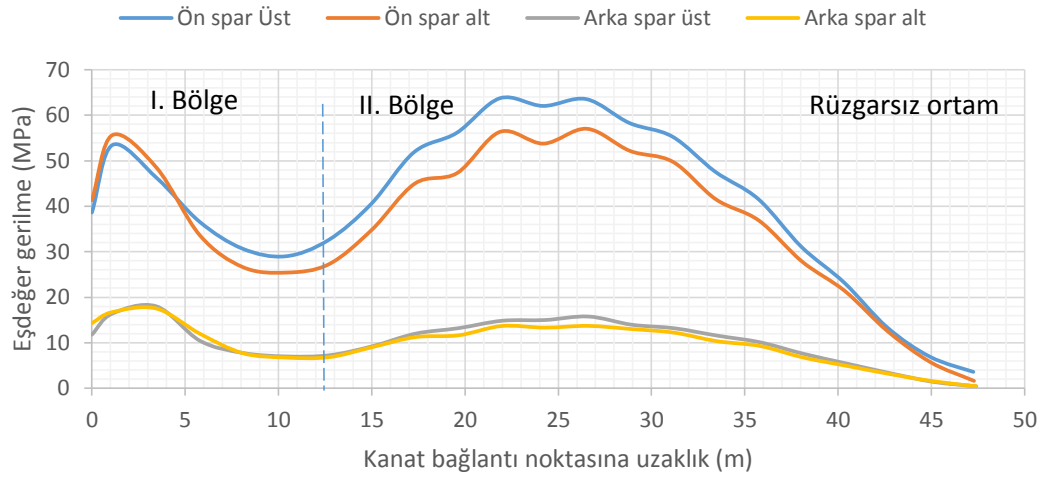
Şekil 6.50. Kanatta oluşan Von-Mises Eşdeğer gerilmesinin genel dağılımı

Kanadın iç yapı elemanında kanadın oluşan eşdeğer gerilme dağılımı belirlenerek Şekil 6.51’de verilmiştir. Şekilden kanatta oluşan kayma gerilmeleri hassas bir şekilde belirlenememektedir. Bu nedenle kanadın statik analizine dönülerek, kanadın dört farklı bölgesinde (ön spar üst, ön spar alt, arka spar üst, arka spar alt) kanat boyunca oluşan Von-Mises eşdeğer gerilmeleri belirlenerek Şekil 6.52’de verilmiştir.



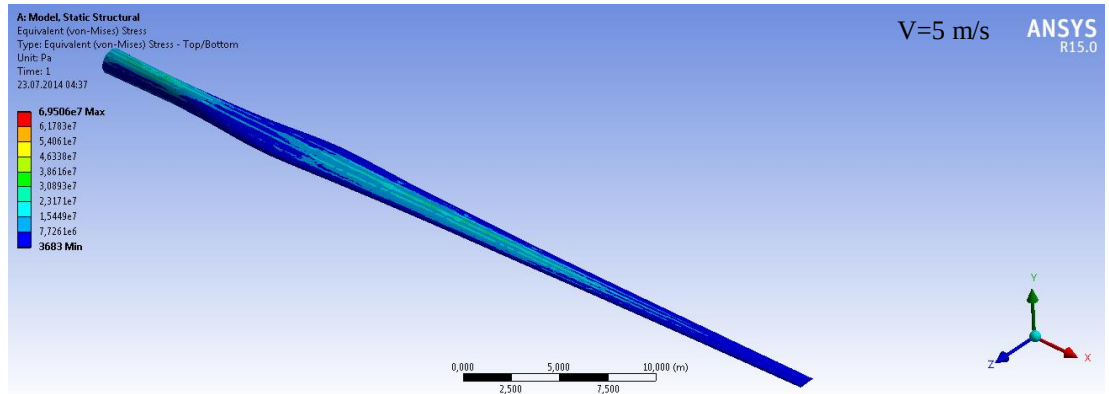
Şekil 6.51. İç destek elemanında oluşan Von-Mises Eşdeğer gerilmesinin genel dağılımı

Şekilden kanadın iç destek elemanlarından ön sparda arka spardan yüksek eşdeğer gerilmeler oluştuğu görülmektedir. Kanadın belirlenen bölgelerinde oluşan eşdeğer gerilmeler değerlendirildiğinde; I. Bölgede ön spardaki gerilmelerin 40 MPa ile başlayıp önce 55 MPa seviyelerine yükseldiği daha sonra azalarak 25-30 MPa seviyelerine düştüğü, Kanadın arka spar elemanındaki gerilmelerin 12-15 MPa ile başlayıp önce 18 MPa seviyelerine yükseldiği, daha sonra azalarak 8 MPa seviyelerine düştüğü görülmektedir. II. bölgede ise Ön spar elemanında eşdeğer gerilmeler önce 55-65 MPa seviyelerine yükselmekte sonra düzgün bir şekilde azalarak kanat ucunda sıfır olmaktadır. Kanadın arka spar elemanında ise gerilmeler önce 12-15 MPa seviyelerine yükselmekte daha sonra düzgün bir şekilde azalarak kanat ucunda sıfır olmaktadır.



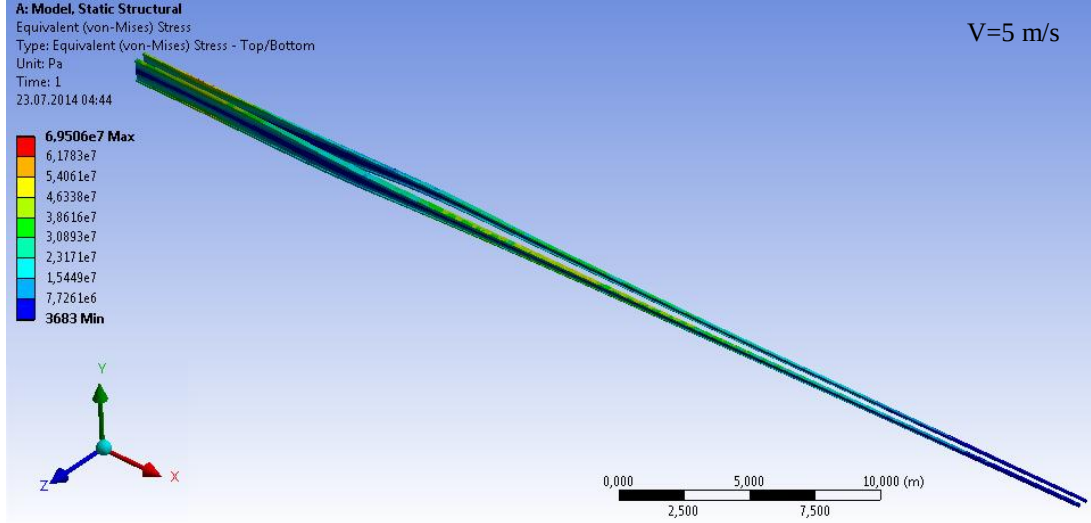
Şekil 6.52. İç destek elemanının dört farklı bölgesinde oluşan Von-Mises eşdeğer gerilmesinin kanat boyunca değişimi

Kanada gelen rüzgar hızı 5 m/s'ye değiştirildiğinde kanatta oluşan eşdeğer gerilmelerin genel dağılımı Şekil 6.53'de verilmiştir. Şekilden kanatta oluşan eşdeğer gerilmelerin 69,506 MPa ile 3663 Pa aralığında olduğu görülmektedir.



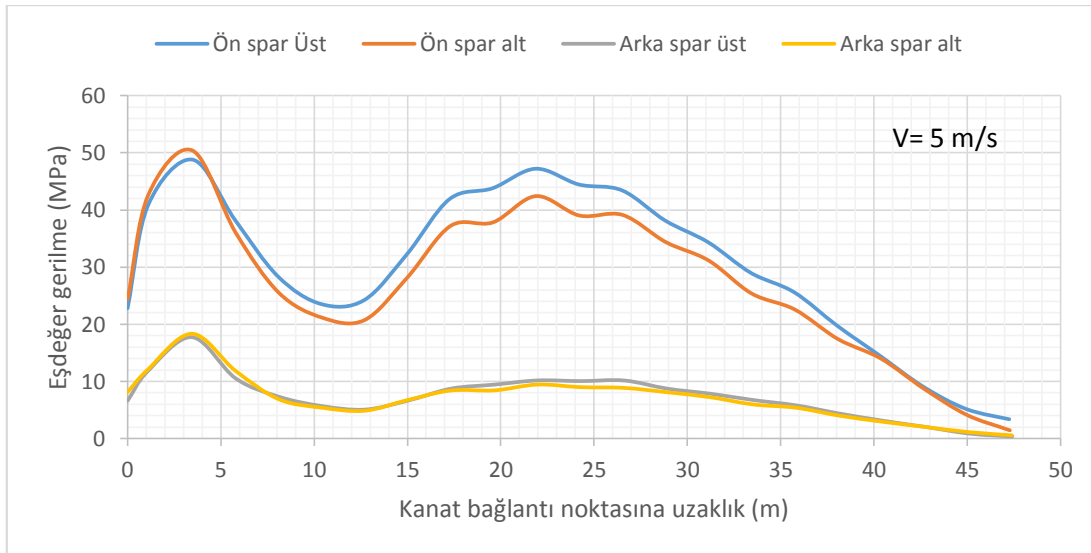
Şekil 6.53. Kanatta oluşan Von-Mises Eşdeğer gerilmesinin genel dağılımı

Kanadın iç yapı elemanında kanadın oluşan eşdeğer gerilme dağılımı belirlenerek Şekil 6.54’de verilmiştir. Kanadın dört farklı bölgesinde (ön spar üst, ön spar alt, arka spar üst, arka spar alt) kanat boyunca oluşan Von-Mises eşdeğer gerilmeleri belirlenerek Şekil 6.55’de verilmiştir.



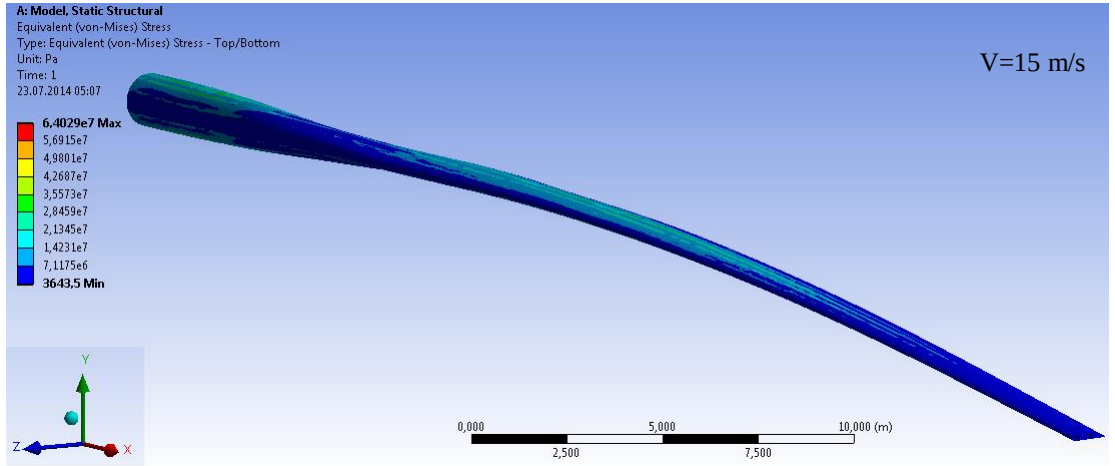
Şekil 6.54. İç destek elemanında oluşan Von-Mises Eşdeğer gerilmesinin genel dağılımı

Şekilden kanadın belirlenen bölgelerinde oluşan eşdeğer gerilmelerin rüzgarsız ortamda kanatta oluşan eşdeğer gerilmelere benzer olduğu, önde bulunan iç destek elemanında arkada bulunan iç destek elemanından daha yüksek gerilmeler oluştuğu görülmektedir.



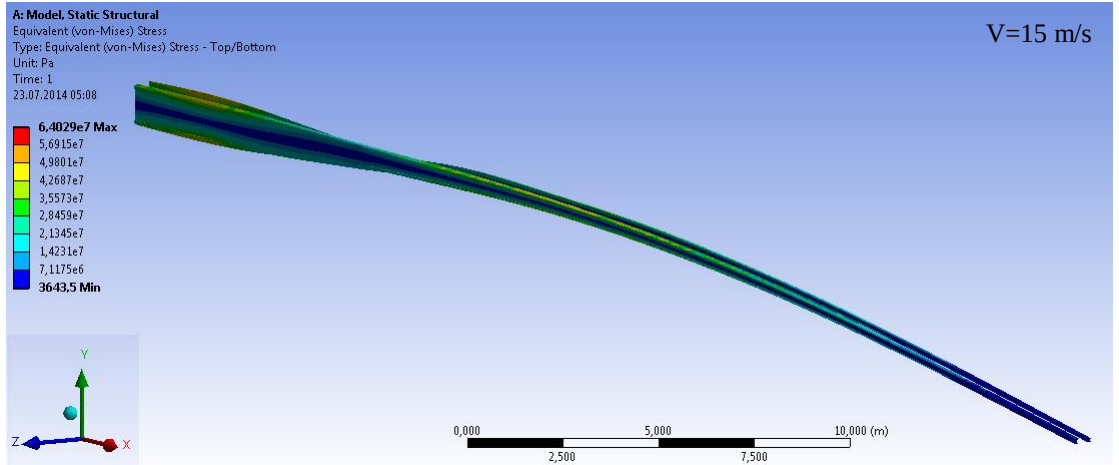
Şekil 6.55. İç destek elemanının dört farklı bölgesinde oluşan Von-Mises eşdeğer gerilmesinin kanat boyunca değişimi

Kanada gelen rüzgar hızı 15 m/s’ye değiştirildiğinde kanatta oluşan eşdeğer gerilmelerin genel dağılımı Şekil 6.56’da verilmiştir. Şekilden kanatta oluşan eşdeğer gerilmelerin 64,029 MPa ile 3643,5 Pa aralığında olduğu görülmektedir.



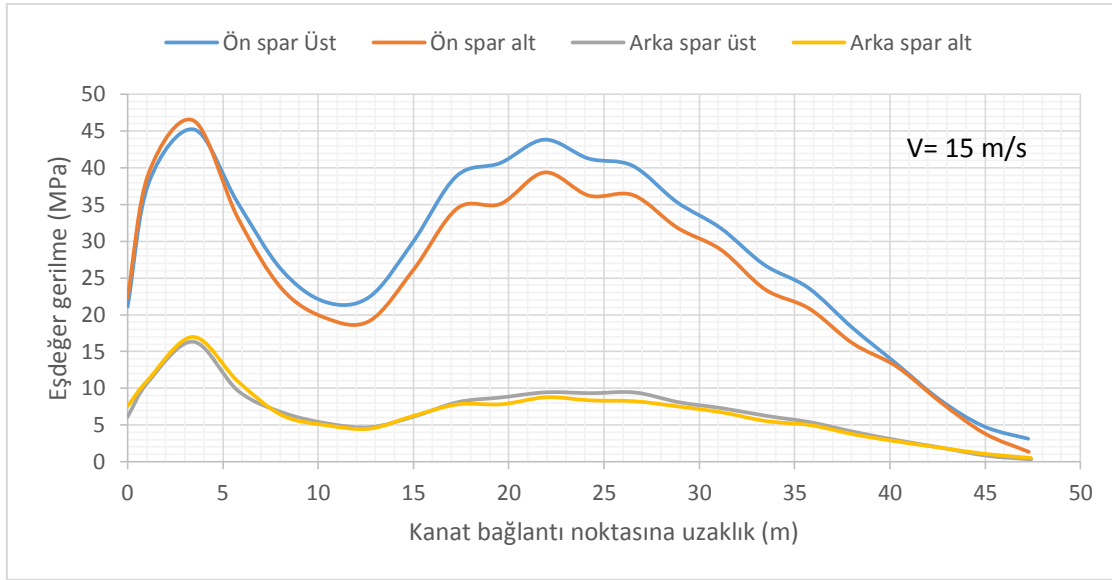
Şekil 6.56. Kanatta oluşan Von-Mises Eşdeğer gerilmesinin genel dağılımı

Kanadın iç yapı elemanında kanadın oluşan eşdeğer gerilme dağılımı belirlenerek Şekil 6.57’de verilmiştir. Kanadın dört farklı bölgesinde (ön spar üst, ön spar alt, arka spar üst, arka spar alt) kanat boyunca oluşan Von-Mises eşdeğer gerilmeleri belirlenerek Şekil 6.58’de verilmiştir.



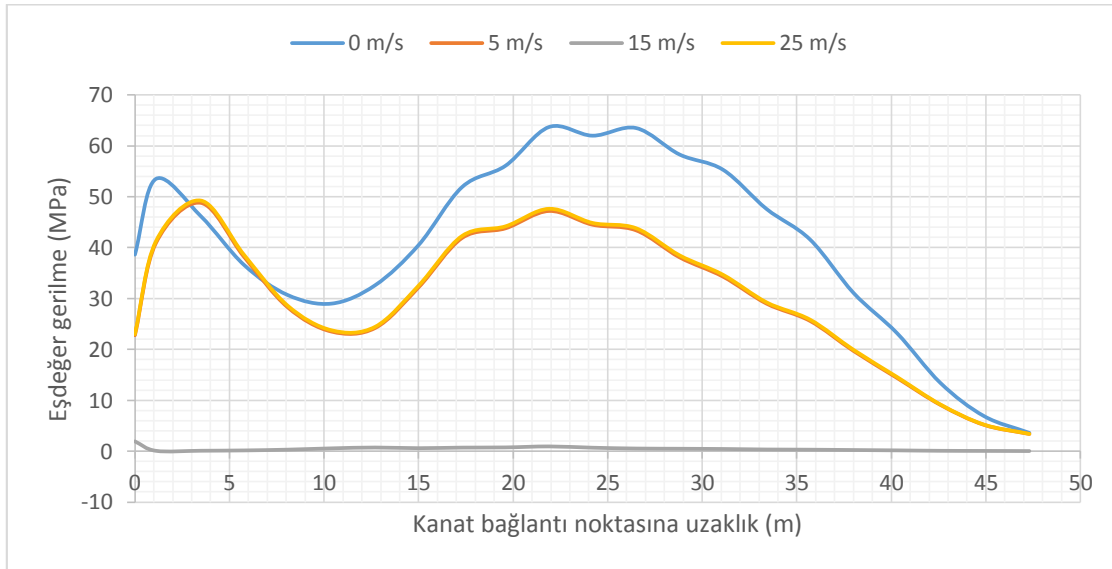
Şekil 6.57. İç destek elemanında oluşan Von-Mises Eşdeğer gerilmesinin genel dağılımı

Şekilden kanadın belirlenen bölgelerinde oluşan eşdeğer gerilmelerin rüzgarsız ortamda ve 5 m/s’lik rüzgar hızında kanatta oluşan eşdeğer gerilmelere benzer olduğu, önde bulunan iç destek elemanında arkada bulunan iç destek elemanından daha yüksek gerilmeler oluştuğu görülmektedir.



Şekil 6.58. İç destek elemanının dört farklı bölgesinde oluşan Von-Mises eşdeğer gerilmesinin kanat boyunca değişimi

Seçilen rüzgar hızlarında yapılan analizler sonucu belirlenen kanatta oluşan kayma gerilmeleri birleştirilerek Şekil 6.59’da verilmiştir. Şekilden, rüzgar hızı arttıkça beklendiği gibi kanatta oluşan gerilmelerin azaldığı görülmüştür. Bu durum rüzgar hızı arttıkça kanatta oluşan kaldırma kuvvetinin artması ve kanada etki eden yerçekimi yüklerinin tersi yönünde etki ederek bu kuvvetin etkisini azaltmasından kaynaklanmaktadır.

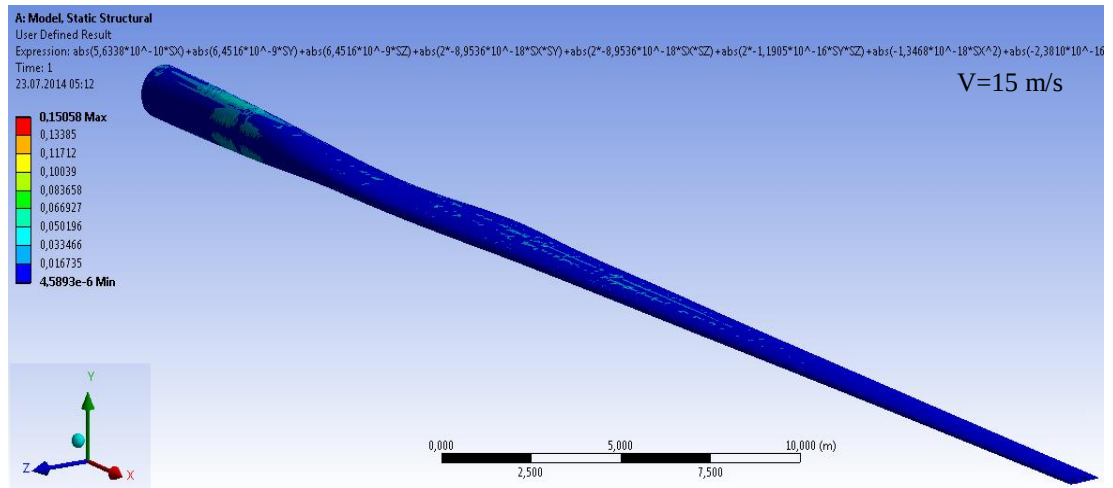


Şekil 6.59. Farklı rüzgar hızlarında kanatta oluşan en büyük Von-mises gerilmesinin kanat boyunca değişimi

6.3. Farklı Rüzgâr Hızlarında Kanadın Hasar Kontrolü

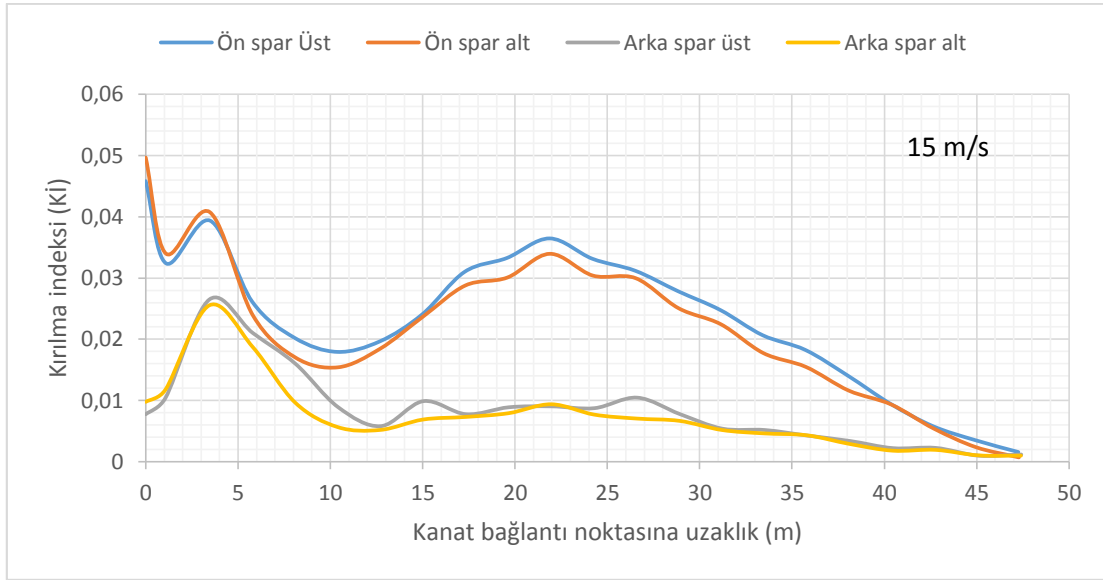
Rüzgâr türbinlerinde kanada etki eden yüklerin kanatta hasar oluşumuna neden olup olmayacağı kontrol edilmelidir. Bu amaçla bu kısımda farklı rüzgâr hızları için kanatta hasar kontrolü yapılmıştır. **Tsai-Wu** hasar kontrol kriterine göre yapılacak olan hasar kontrolünde her bir rüzgâr hızı için (0 m/s, 5 m/s, 15 m/s, 25 m/s) kanadın **Kırılma İndeksleri (Kİ)** değerlendirilmiştir.

Kanada gelen 15 m/s'lik rüzgar hızında Kırılma İndeksinin (Kİ) genel dağılımı Şekil 6.60'da verilmiştir. Şekilden kanatta $0,1505$ ile $4,5893 \times 10^{-6}$ aralığında değişen kırılma indeksine sahip elemanlar olduğu görülmektedir. Kanadın dört farklı bölgesinde (ön spar üst, ön spar alt, arka spar üst, arka spar alt) kanat boyunca oluşan kırılma indeksi dağılımı belirlenerek Şekil 6.61'de verilmiştir.



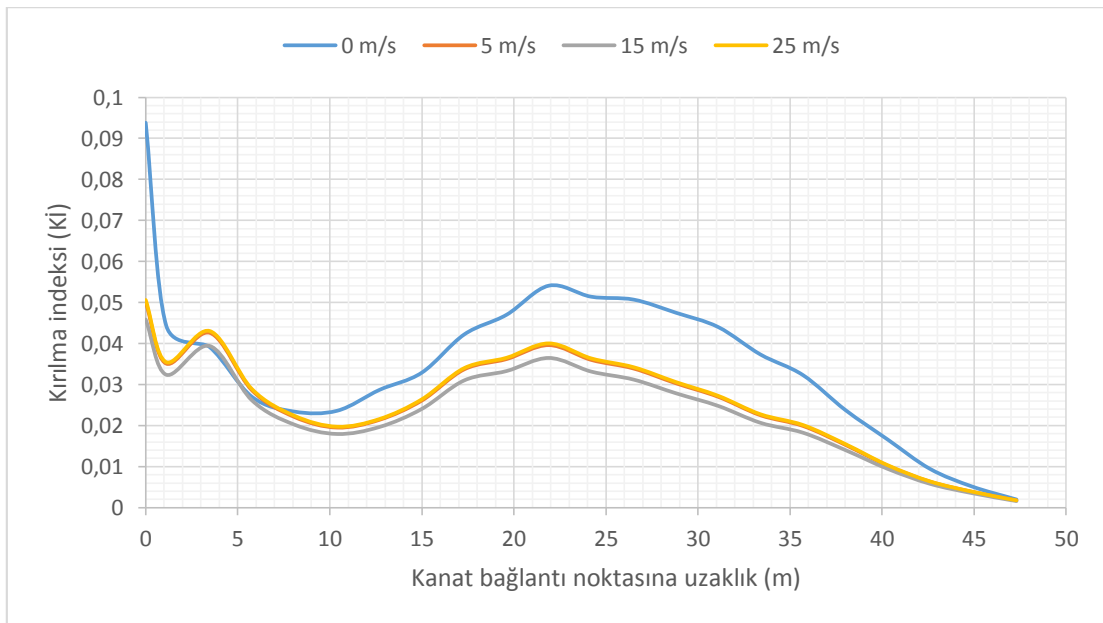
Şekil 6.60. Kanadın kırılma indeksinin (Kİ) genel dağılımı

Şekilden kanadın belirlenen bölgelerinde oluşan kırılma indeksinin 0 ile 0,005 aralığında olduğu görülmektedir. Şekildeki kırılma indeksleri değerlendirildiğinde, ön spar elemanında oluşan kırılma indekslerinin arka spar elemanında oluşan kırılma indekslerinden yüksek olduğu görülmektedir. Kanatta oluşan kırılma indeksleri ön sparda elemanında en yüksek değerini kanat bağlantı noktasında (0,05), arka spar elemanında ise yaklaşık olarak geçiş bölgesinde (0,27) almaktadır.



Şekil 6.61. Kanadın dört farklı bölgesinde kırılma indeksinin kanat boyunca değişimi

Seçilen rüzgar hızlarında kanadın kırılma indeksi dağılımları birleştirilerek Şekil 6.62'de verilmiştir. Şekilden, kanat yatay pozisyondayken rüzgar hızı arttıkça kırılma indeksi değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Kanatta oluşan normal, kayma ve eşdeğer gerilmeler dikkate alındığından bu beklenen bir davranıştır. Tsai-Wu kriterine göre bir kompozit yapıda hasar oluşabilmesi için kırılma indeksi değerinin 1'den büyük olması gerekmektedir. Burada en büyük kırılma indeksi değeri 0,1 olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, bu tasarımın belirlenen koşullardaki belirlenen yüklemeler altında hasara uğramayacağı tespit edilmiştir.



Şekil 6.62. Farklı hızlarda kırılma indeksinin (Kİ) kanat boyunca değişimi

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, enerji kaynaklarının ve rüzgar enerjisinin son yıllarda dünyada ve ülkemizdeki durumu, rüzgar türbinleri, yatay eksenli rüzgar türbinlerinin temel elemanları, kanatların aerodinamik ve yapısal tasarım esasları ile ilgili genel bir değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca 2 MW'lık bir rüzgar türbin kanadının tasarım parametreleri belirlenmiş, farklı rüzgar hızlarındaki akış analizleri yapılmış, yapılan akış analizleri kanadın statik analizine aktararak kanadın farklı rüzgar hızlarındaki mekanik davranışı değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada kanadın farklı rüzgar hızlarındaki mekanik davranışının belirlenmesi amacıyla ANSYS yazılımında sistem birleştirme işleminden yararlanılarak kanadın akışkan yapı etkileşimi için bir model oluşturulmuştur. Bu modelle kanadın etrafındaki akış ortamında akış analizi yapılarak kanada etki eden aerodinamik yükler (kanada etki eden basınçlar) belirlenmiştir. Daha sonra akış analizi ile kanadın statik analizi arasında bir sistem birleştirme işlemi tanımlanarak belirlenen aerodinamik yükler kanadın statik analizine aktarılmıştır. Bu çalışmada iki ayrı durum için kanadın mekanik davranışı değerlendirilmiştir. Bunlardan birinci durum kanada etki eden yerçekimi yüklerinin (rüzgarsız ortamda yapılan analiz) (0 m/s'lik rüzgar hızında yapılan analiz) kanadın mekanik davranışına etkisi, ikinci durum ise yerçekimi yükleri ise aerodinamik yüklerin birlikte kanadın mekanik davranışına etkisidir. Bu çalışmada ayrıca kanadın iç destek yapısının optimum halinin araştırılması için kanadın iç bölgesine topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Ancak bu kısımda istenilen sonuç aerodinamik yükler dikkate alınarak optimizasyon yapılamadığı için istenilen sonuca ulaşamamıştır. Bu çalışma sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir

1. Dünyada ve Türkiye'de enerji ihtiyacının karşılanmasında büyük oranda yenilenemez enerji kaynaklarının tercih edilmekte olduğu belirlenmiştir.
2. Son yıllarda dünyada ve Türkiye'de enerji ihtiyacının karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının giderek arttığı belirlenmiş olup bu durum dünyanın ve Türkiye'nin yenilenebilir enerji konusunda bilinçlendiğini göstermektedir.
3. Türkiye'de son yıldaki yenilenebilir enerji kullanım miktarları değerlendirildiğinde, en yaygın kullanılan yenilenebilir enerji kaynağının hidrolik ve rüzgar olduğu,

Türkiye'nin güneş enerji potansiyelinin yüksek olmasına rağmen bu enerjiden yeterince yararlanılamadığı belirlenmiştir.

4. 2011 ve 2012 yılı verilerine göre dünyada ve Türkiye'de rüzgar enerjisi kullanımının giderek arttığı belirlenmiştir.
5. Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliğinin (TUREB) 2014 yılı verilerine göre 2013 yılı sonunda işletmede 75, inşa halinde ise 35 adet rüzgar enerjisi santralının bulunduğu, 2013 yılında Türkiye'deki rüzgar türbinlerinin kurulu gücünün 2958,45 MW seviyesine ulaştığı ve inşa hakkındaki santrallerin tamamlanması ile birlikte Türkiye'deki rüzgar enerjisi kurulu gücünün 4000 MW düzeyine ulaşacağı belirlenmiştir..
6. Rüzgar türbinlerinde kanat malzemesinden istenilen özellikleri Alüminyum ve kompozit malzemelerin sağladığı, ancak alüminyum kanatların imalatının zorluğu ve maliyetinin yüksek olması nedeniyle kompozit malzemelerin rüzgar türbin kanatları için en uygun malzeme olduğu, Kompozit malzemeler arasında falan değerlendirmeye göre ise kanat için en uygun malzemenin cam fiber/ epoksi kompozit olduğu belirlenmiştir.
7. Rüzgar türbin kanatlarının el yatırması , vakum torbalama ve vakum infüzyon yöntemleriyle imal edilebileceği, bu imal yöntemlerinden el yatırma yönteminde kaliteli ürün imalatının çalışanın becerisine bağlı olduğu vakum torbala yöntemiyle kanat üretim maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı günümüzde kanat imali için yaygın olarak vakum infüzyon yönteminin kullanıldığı belirlenmiştir.
8. Rüzgar türbin kanadına etki eden yükleri belirlemek için kullanılan kanat koordinat sisteminde kanada XK yönünde aerodinamik, yerçekimi ve santrifüj yükleri, YK yönünde aerodinamik ve yerçekimi yükleri, ZK yönünde ise yerçekimi ve santrifüj yükleri ettiği belirlenmiştir.
9. Rüzgar türbin kanatları kullanım ömürleri boyunca çeşitli yüklere maruz kaldıklarından kanadın aerodinamik özelliklerinin yanında mekanik özellikleri de göz önünde bulundurularak tasarlanması gerektiği, kanada etki eden yüklerin etkisini sağlıklı bir şekilde belirleyebilmek için kanadın akışkan-yapı analizinin yapılması gerektiği, bu analizinin ANSYS yazılımında yapılabileceği belirlenmiştir.
10. Kanat üreticileri tarafından hazırlanan kataloglar ve literatürde bulunan bilgilerden yararlanılarak kanat tasarımı yapılabileceği gözlemlenmiştir.
11. Kanadın etrafındaki akış ortamında yapılan akış analiziyle, kanada etki eden aerodinamik yüklerin belirlenebileceği ve bu yüklerin kanadın mekanik davranışının belirlenmesinde kullanılabileceği görülmüştür.

12. Yapılan analizler sonucunda kanadın dairesel kesitli bölgesi, ve geçiş bölgesinde yüksek rüzgar hızlarının olduğu, hızların kanat ucuna doğru giderek azaldığı ve kanat ucunda analize konu olan rüzgar hızına eşit olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum oluşturulan modelin gerçeğe yakın sonuçların elde edilmesini sağlayacağı belirlenmiştir.
13. Yapılan akış analizi sonucu kanat etrafında oluşan basınçların beklendiği gibi kanadın alt yüzeyinde pozitif, üst yüzeyinde ise negatif olduğu gözlemlenmiştir.
14. Kanada gelen rüzgar hızlarının büyüklüğü arttıkça beklendiği gibi kanat etrafında oluşan rüzgar hızlarının ve kanat yüzeyinde oluşan basınçların büyüklüklerinin de arttığı görülmüştür.
15. Yapılan kanadın statik analizi sonucu, rüzgar hızı arttıkça kanatta oluşan şekil değişimlerinin, kanatta oluşan gerilmelerin, kanadın kırılma indeksinin azaldığı belirlenmiştir. Bu durum rüzgar hızı arttıkça kanatta oluşan aerodinamik kaldırma kuvvetinin de artması ve kanada etki eden yüklerin etkisini azaltmasından kaynaklanmaktadır.

İleride yapılacak çalışmalar için öneriler

1. Bu çalışma ile belirlenen sonuçların yapılacak deneysel çalışmalar ve veriler ile benzer sayısal çalışmalar ile karşılaştırılmasının yapılması yararlı olacaktır.
2. Bu çalışmada kompozit yapı olarak tek fiber doğrultulu E-Cam/ Epoksi malzeme kullanılmıştır. Bu çalışmaya ek olarak farklı fiber doğrultularına sahip malzemelerin farklı katmanlı malzemelerin mekanik davranışının da belirlenmesi ve bu çalışma sonucu elde edilen bilgilerle karşılaştırılması yararlı olacaktır.
3. Bu çalışma kullanılan kanat modelinin dinamik analizinin, serbest titreşim analizinin ve yorulma analizinin yapılması yararlı olacaktır.
4. Rüzgar türbin kanatlarında E-Cam ve Karbon fiber malzeme dışında farklı malzeme alternatiflerinin de araştırılması yararlı olacaktır.

8. KAYNAKLAR

- Ackermann, T. Ve Söder, L., 2000. Wind energy technology and current status: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4,314-374.
- Aktemur, K., 2010. Bir rüzgar türbininin bilgisayar destekli analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 87 s.
- Aktepe, İ., 2013. Rüzgar türbin kanadının optimal tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 115 s.
- Asseff, N.,S., 2009. Design and finite element analysis of an ocean current turbine blade, Phd Thesis, Florida Atlantic University. 92 s.
- Bakhtiary, N. Friedrich, A. Mulfinger, M. Sauter, P. 1996. A new approach for sizing, shape and topology optimization, SAE International Congress and Exposition, Detroit, Michigan USA.
- Bakioğlu, M., 2009. Cisimlerin Mukavemeti Cilt 1, Beta Yayınevi, 362 s. İstanbul.
- Balaban, G.B. 2011. Otomotiv kayar kapı mekanizmalarında ağırlık optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 126 s.
- Bansal, R.C., Bahatti, T.S., Kothari, D.P., 2002. On some of the design aspects of wind energy conversion systems, *Energy Conversion and Management*, 43, 2175-2187.
- Berthelot, J.M. 1999. *Composite Materials Mechanical Behaviour and Structural Analysis*, Springer, ISBN 978-1-4612-0527-2, 646 s.
- Bhatt, P., Satankar, R., 2013. Comparing the stress on wind turbine blades using ANSYS, *International Journal of Engineering Trends in Engineering and Development*, 3, 311-327.
- BP statistical Review of World Energy, 2013, British Petroleum (BP), London, UK.
- Brondsted, P. ve ark, 2005. Composite materials for wind power turbine blade, *Annual Reviews*, 35:505-538.
- Brondsted, P., Nijssen, R., P., L., 2013. *Advances in wind turbine blade design and materials*, Woodhead Publishing..
- Cai, X., Pan, P., Zhu, J., Gu, R., 2013. The analysis of the aerodynamic character and structural response of large-scale wind turbine blades, *Energies*, 6, 3131-3148.

- Chandrala, M., Choubey, A., Gupta, B., 2012. Aerodynamic analysis of horizontal axis wind turbine blade, *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2, 1244-1248.
- Chen, X. Zhao, W. Zhao, X.L. Xu, J.Z., 2014. Failure Test and Finite Element Simulation of a Large Wind Turbine Composite Blade under Static Loading, *Energies*, 7, 2274-2297.
- Çelik, S. N., 2012. Türkiye'nin enerjide dışa bağımlılığının azaltılmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, 102s.
- Çengel, Y.A. ve Cimbala, J.M., 2008. Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları. Çeviri Editörü: Tahsin Engin, İzmir Güven Bilimsel Kitabevi, 938 s., İzmir.
- Çetin, S. N., 2011., Rüzgar elektrik santrallerinde yeni açılımlar ve Türkiye analizi, *Yeni Enerji Dergisi*, Sayı 21.
- Demirci, S., 2011. Rüzgar türbin göbeğinin yapısal tasarım ve optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 105 s.
- DNV, 2002. Guideliness for Design of Wind Turbines, Second Edition, ISBN 87-550-2870-5, Denmark.
- Emniyetli, G., 2007. Evsel elektrik ihtiyacının karşılanması için rüzgar türbin tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 134 s.
- Griffin, D.A. and M.D. Zuteck, 2001. Scaling of composite wind turbine blades for rotors of 80 to 120 meter diameter, *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the Asme*, 123(4). 310–318
- Griffith, T. Ve Ashwill, T.D, 2011. The Sandia 100-meter all-glass baseline wind turbine blade:SNL100-00, Sandia National Laboratories.
- Grujicic, M., Arakere, G., Panduragan, B., Sellappan, V., Vallejeo, A., Ozen, M., 2010. Multidisciplinary design optimization for glass-fiber epoxy-matrix composite 5 mw horizontal-axis wind-turbine blades, *Journal of Materials Engineering and Performance*,19(8):1116-1127.
- Hameed, M., S., Afaq, S., K., 2013. Design and analysis of a straight bladed vertical axis wind turbine blade using analytical and numerical techniques, *Ocean Engineering*, 57, 248-255.
- Hau, E., 2006. Wind turbines fundamentals, technology, application, economics. Second Edition, ISBN 10-3-540-24240-5, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.
- Hayli, S., 2001. Rüzgar enerjisinin önemi dünyada ve Türkiye'deki durumu, *Fırat Üniversitesi, Sosyal Bilimler Dergisi*, Cilt 11(1), 1-26.

- Hendriks, H.B. ve ark. 2001. Application of an advanced cost model in different design phases of on and offshore wind turbine, energy research center of Netherlands.
- Herbert, G. M.J., Iniyon, S., Sreevalsan, E., Rajapandian, S., 2005. A review of wind energy technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11., 1117-1145:
- Howard, A.M. 2007. Computational Design of Shape Changing Structures via Topology Optimization, Master Thesis, University of Colorado. 113 p.
- Höyland, J., 2010. Challenges for large wind turbine blades, Philosophiae Doctor Thesis, Norwegian University of Science and Technology .
- Jonkman J., Butterfield, S, Musial, W ve Scott, G., 2009. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development, technical report, National Renewable Energy Laboratory.
- Karabağ, S., 2011. Rüzgar Türbini Kanadı İmalatı, İzmir Rüzgar Sempozyumu ve Sergisi.
- Karadağ, H.I., 2009. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgar enerjisinin önemi ve rüzgar türbin tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 130 s.
- Karpat, S., 2011. Rüzgar türbin kanatlarında kullanılan malzemelerden üretilen farklı kompozit yapıların mekanik ve titreşim özelliklerinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 66 s.
- Kaygusuz, K., 2004. Wind Energy: Progress and Potential, 2004. Energy Sources, 26:95-15.
- Koç, E., 2008. Osmaniye'nin sosyo-ekonomik ve kültürel yapısı, ISBN:978-9944-0426, 233-247 s., Osmaniye.
- Koç. E., 2013, Makina Elemanları Cilt 1, Nobel Kitabevi, 417 s., Adana.
- Koltukçu, H., 2010. Yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye açısından SWOT analizi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, 136 s., Kütahya.
- Kong, C., Kim, J., 2000. Structural design of medium scale composite wind turbine blade, KSAS International Journal, 1, 92-102.
- Kurtaran, H. 2005. Optimizasyon teorisi ve uygulamalar, Ders notu, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Tasarım ve İmalat Mühendisliği Bölümü.
- Küçükçalı, R., 2008. Yenilenebilir Enerjiler ve Alternatif Sistemler, İsisan Yayınları. 674s.
- Kwon, S., Chung, J., Yoo, H., H., 2013. Structural dynamic modeling and stability of a rotating blade under gravitational force, Journal of Sound and Vibration, 332, 2688-2700.
- Lee, K. 1999. Principles of CAD/CAM/CAE Systems. Addison Wesley.

- Levelized cost of energy analysis, lizard version 2.0, 2008.
- Levelized cost of energy analysis, lizard version 6.0, 2012.
- Liu, X., Zhang, X., Li, G., Chen, Y., & Ye, Z., 2010. Dynamic Response Analysis of the Rotating Blade of Horizontal Axis Wind Turbine. *Wind Engineering*, 34(5), 543-560.
- Mahri, Z., L., ve Roubah, M.;S., 2008. Calculation of dynamic stresses acting on wind turbine blades using finite element method, *Journal of Arab Universities for basic and applied sciences*, 6, 32-47.
- Manwell, J.F., McGowan, J. G., Rogers, A.L., 2002. *Wind turbine explained, theory design and application*, John Wiley&Sons, ISBN 0-471-49972-2, England.
- Onat, C., 2001. Rüzgar Türbini Pervanesi Dizaynı, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 115 s. Malatya.
- Peerigna, J., Brood, R., Ceyhan O., Engels, W., Winkell, D.D. 2011. Upwind 20 MW wind turbine pre-design: blade design and control, Energy research Centre of Netherlands
- Peter, W.C., Chr,stensen, A.K. 2008. *An introduction to structural optimization*, Springer, London.
- Proos, K. 2002. Evolutionary structural optimization as a robust and reliable desing tool, Doctoral Thesis, School of Aeronautical, Mechatronica nd Mechanical Engineering, Sydney, 203. P.
- Schubel, P. J., ve Crossley, R. J., 2012. Wind turbine blade design, *Enegies*, 5, 3245-3449.
- SP Systems, 2001. *Guide to Composite Engineering Materials*.
- Subrahmanian, K.P. ve Dubouloz, F., 2009. *Adhesives for bonding wind turbine blades, Reinforced Plastics*.
- Şenel, M.C., 2012. Rüzgar Türbinlerinde Güç İletim Mekanizmalarının tasarım Esasları – Dinamik Davranış, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 202 s.
- Tekeli, M., 1993. Bir rüzgar türbin palasının yapı analizi, Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 106 s.
- Tenguria, N., Mittal, N.D., Ahmed., S., 2011. Structural analysis of 38.95 m horizontal axis wind turbine blades, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 6, 183-188.
- Topçu, M., Taşgetiren, S., 1998. *Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodu*, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Ders Kitapları, Yayın No:007, Denizli.

Tresher, R., Robinson, M., 2008. Wind energy Technology: Current Status and R&D Future, Physics of Sustainable Energy Conference.

Updated Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants, 2013, Independent Statistics & Analysis.

Uysal, A. 2008. Rüzgar türbini kanat malzemelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 95 s.

Yerebakan, M., 2001. Rüzgar Enerjisi, İstanbul Ticaret Odası, Yayın no:2001-33. İstanbul

Yılmaz, S. 2008. Eğilme-Burulma Bağdaşımı Rüzgar Türbini Pala Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 63s.

Yılmaz, Ö., 2009, Gemi Etrafındaki Akışın Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemiyle İncelenmesi, Bitirme Çalışması, KTÜ Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Trabzon, 41 s.

Wu, W., Young, W., 2012. Structural analysis and design of the composite wind turbine blade, Applied Composite Materials, 19, 247-257.

Xiong, L., Xianmin, Z., Gangqiang, L., Yan, C., Zhiqun, Y., 2010. Dynamic response analysis of the rotating blade of horizontal axis wind turbine, Wind Engineering, 5, 543-560.

URL - 1: www.elektrikport.com, ziyaret tarihi 04.02.2014.

URL - 2: www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/WETF/Facts_Volume_2.pdf, ziyaret tarihi 02.01.2014.

URL - 3: <http://www.fh-schmalkalden.de/schmalkaldenmedia/wind+turbines.pdf>, ziyaret tarihi: 10.11.2013.

URL - 4: http://www.gurit.com/files/documents/2_aerodynamics.pdf, ziyaret tarihi, 09.11.2013.

URL - 5: www.intechopen.com/books/advances-in-wind-power/a-model-for-dynamic-optimization-of-pitch-regulated-wind-turbines-with-application, ziyaret tarihi 02.01.2014.

URL - 6: www.kk-electronic.com/pitch-system.aspx, ziyaret tarihi 02.01.2014.

URL - 7: www.mragheb.com/NPRE475WindPowerSystems/VerticalAxisWindTurbines.pdf, ziyaret tarihi: 05.01.2014.

URL - 8: http://www.vestas.com/Files/Filer/EN/Brochures/090821_Product-brochure-V80-2.0MW-06-09-EN.pdf, ziyaret tarihi 21.07.2014

URL- 9: <http://ocw.tudelft.nl/fileadmin/ocw/courses/OffshoreWindFarmEnergy/res00062/Terminology.pdf>, ziyaret tarihi 17.01.2013.

URL - 10: www.tureb.com.tr/tr/bilgi-bankasi/turkiye-res-durumu?download=102:turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporu-ocak-2014, ziyaret tarihi 04.03.2014.

URL - 11: www.symscape.com/examples/panel/naca4415, ziyaret tarihi 05.11.2013.

URL - 12: www.warlock.com.au/tools/bladecalc.php, ziyaret tarihi 05.04.2014.

URL - 13: windpowermonthly.com/article/1137943/service-maintain-wind-turbine-blade, ziyaret tarihi 06.05.2014.

URL - 14: www.dr-huso.com/makale/makale194.pdf, ziyaret tarihi 12.10.2013.

URL - 15: www.scribd.com/doc/28808604/An-Introduction-to-Structural-Optimization, ziyaret tarihi 02.05.2013.

URL – 16: www.wikipedia.com, ziyaret tarihi 06.02.2014.

URL -17: www.howstuffworks.com, ziyaret tarihi 25.03.2014.

URL-18: www.burakveelif.com, ziyaret tarihi: 05.05.2014.

URL – 19: www.aerofoiltools.com, ziyaret tarihi: 07.05.2014.

URL – 20: www.globalspec.com, ziyaret tarihi: 04.04.2014.

URL – 21: www.reinforcedplastics.com, ziyaret tarihi: 08.05.2014.

URL – 22: www.turbinatob.com, ziyaret tarihi: 08.05.2014.

URL – 23: www.bladedynamics.com, ziyaret tarihi: 02.11.2014.

URL – 24: www.aerofoildb.com, ziyaret tarihi: 09.05.2014

URL – 25: <http://www.exergy.se/goran/hig/re/05/wind.pdf>, ziyaret tarihi: 02.04.2014

ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı : Kadir KAYA

Doğum Yeri ve Tarihi : İçel/1988

Adres : Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü 55139 Kurupelit/SAMSUN

E-Posta : kadir.kaya@omu.edu.tr

Lisans : Erciyes Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü