

**YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİN
KANATLARININ AKIŞKAN-YAPI ETKİLEŞİMİ
YÖNÜNDEN İNCELENMESİ**

Kamer DOĞAN



T.C
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİN KANATLARININ AKIŞKAN-YAPI
ETKİLEŞİMİ YÖNÜNDEN İNCELENMESİ**

Kamer DOĞAN

Prof. Dr. Emin GÜLLÜ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2014
Her Hakkı Saklıdır
TEZ

Kamer DOĞAN tarafından hazırlanan “YATAY EKSENİ RÜZGAR TÜRBİN KANATLARININ AKIŞKAN-YAPI ETKİLEŞİMİ YÖNÜNDEN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Emin GÜLLÜ

Başkan: Prof. Dr. Emin GÜLLÜ
U.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye: Prof. Dr. Ali VARDAR
U.Ü. Ziraat Fakültesi
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye: Yrd. Doç. Dr. M. Özgün KORUKÇU
U.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. Ali Osman DEMİR
Enstitü Müdürü
../../2014

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullandığım verilerde herhangi bir tahribat yapmadığımı,
- ve bu tez herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

../../2014

Kamer DOĞAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİN KANATLARININ AKIŞKAN-YAPI ETKİLEŞİMİ YÖNÜNDEN İNCELENMESİ

Kamer DOĞAN

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Emin GÜLLÜ

Bu çalışmada yatay eksenli rüzgar türbin kanatları akışkan-yapı etkileşimi yönünden incelenmiştir. Çalışma iki ana tema üzerinden yürümüştür: ilki kanat geometrisinin rüzgar ile teması sonucu oluşan kuvvetleri anlamak, ikincisi ise bu kuvvetlerin kanat üzerinde yarattığı deformasyon ve gerilmeleri incelemek. Bu iki olgu akılda tutularak interaktif bir tasarım sürecine gidilmiş ve sonuçta bir rüzgar türbin kanadı hem aerodinamik hem de yapısal yönden incelenmiştir. Çalışma aerodinamik tasarımla başlamış akabinde bu tasarım ile elde edilen sonuçlar ışığında bir kanat yapısı oluşturulmuştur. Elde edilen kanat yapısının aerodinamik, yerçekimi ve merkezkaç kuvvetleri etkisi altında uğradığı deformasyon ve gerilme bilgileri ışığında hem aerodinamik hem de yapısal tasarım revize edilmiştir. Bu yolla kanadın mümkün olan en yüksek verimde olması hedeflenirken yapısal olarak da güvenli bir alanda kalınmıştır.

Kanat ortalama rüzgar hızının yerden 30 m yükseklikte 7,25 m/s olduğu ortamlar için optimize edilmiştir. Bu durumun temel sebebi ülkemizin sahip olduğu rüzgar enerjisi potansiyelinin % 60 civarında bir bölümünün ortalama rüzgar hızı 7 ile 7,5 m/s olan bölgelerde toplanmış olmasıdır. Ancak kanat dönme hızı ile oynanarak farklı rüzgar hızlarında da yüksek verim elde etmek mümkündür. Kanat 2,05 m olarak tasarlanmıştır. Her ne kadar bu çalışmada temel hedef daha büyük kanat tasarlamak olsa da bu amaca sayısal çözümleyici programlarının ihtiyaç duyduğu bilgisayar donanımının eksikliği nedeniyle ulaşılamamıştır. Kanadın aerodinamik tasarımında yoğun olarak Qblade ve ANSYS CFX yazılımlarından yararlanılmış, ön tasarım Pala Elemanı Momentum Teorisine göre elde edilmiştir. Akabinde daha gelişkin bir yazılım olan Navier-Stokes çözücüsü CFX ile aerodinamik tasarım sonlandırılmıştır. CFX'den elde edilen kanat üzerindeki basınç dağılımı bilgisi bir sonlu elemanlar çözücüsü olan ANSYS Mechanical yazılımına aktarılmış ve buradan da deformasyon ve gerilme sonuçları elde edilmiştir. Yapısal tasarım aşamasında temel giriş teorisi ile laminasyon teorisinden yararlanılmıştır. Ayrıca yine Co-Blade isimli yazılım da tasarımının ilk aşamalarında faydalı olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre aerodinamik verimi % 40 civarında olan kanat yalnızca 8 cm uç sehim yapmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar türbin kanadı, akışkan-yapı etkileşimi, ANSYS CFX, ANSYS Mechanical, kompozit malzeme.

2014, ix + 97 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

FLUID-STRUCTURE-INTERACTION INVESTIGATION OF HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE BLADES

Kamer DOĞAN

Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Emin GÜLLÜ

In this study, a Fluid-Structure-Interaction investigation of horizontal axis wind turbine blades is conducted. The study is carried on two major fields: first, understanding the generated forces as a result of interaction between the blade outer geometry and wind. Second, investigation of the deformation and stress occurring on the blade by those forces. Keeping in mind both those two aspects, a wind turbine blade is both aerodynamically and structurally designed by means of an iterative process. Process has started with aerodynamic design and the results of this step with gravity and inertial forces is fed to the second step which is the structural design. Afterwards, the results of second step are taken into account to revise the whole design. By choosing that path, while keeping the aerodynamic efficiency at maximum possible, the design was kept structurally safe also.

The blade is optimized for the fields where the average wind speed at a height of 30 m is 7,25 m/s. This stems from the fact that in our country % 60 of the usable wind energy potential is available at locations where wind blows at speeds between 7 and 7,5 m/s. But it is possible to obtain high aerodynamic efficiency at different wind speeds by changing the blade rotational speed. The blade is 2,05 m long. Although this study aimed to design larger turbines, due to the lack of sufficient computer hardware which is needed by numerical solvers, a small-scale one is achieved.

In the design of the aerodynamic design step, Qblade and ANSYS CFX was used. Primary design was achieved by means of the Blade Element Momentum theory. Afterwards, a higher fidelity Navier-Stokes solver CFX was used to finalize the aerodynamic design. The pressure distribution on the blade is transferred from CFX to a finite element solver ANSYS Mechanical and stress plus deformation data was achieved. In the structural design process, basic beam theory with the classical lamination theory was helpful with the use of Co-Blade program. The final design has approximately % 40 aerodynamic efficiency with a tip deflection of 8 cm.

Key Words: Wind turbine blade, fluid-structure interaction, ANSYS CFX, ANSYS Mechanical, composite material.

2014, ix + 97 pages.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de enerji birçok konuda kilit roledir. Bu bakımdan bu tez çalışması da bir yenilenebilir enerji türü olan rüzgar enerjisini konu edinmiştir. Temel hedef ülkemizde zaten var olan rüzgar enerji yatırımları konusunda teknik bilgi birikimini arttırmaktır. Bu sayede temelde ithal edilen rüzgar türbinlerinin ileriki yıllarda yerli üretimi için gereken insan kaynağının geliştirilmesine katkı sunulmak istenmiştir. Çalışma ile Türkiye rüzgar atlasına göre optimize edilmiş bir kanat tasarlanmış ve akışkan-yapı etkileşimi yönünden analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar umut verici olup bu teknolojinin ülkemizde de rahatlıkla geliştirilebileceğini göstermektedir.

Tez çalışmam boyunca her konuda desteğini ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Emin GÜLLÜ ' ye çok teşekkür ederim.

Kamer DOĞAN

../../2014

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Rüzgar Enerjisinin Tarihi.....	4
2.2. Rüzgar Güllerinin Parçaları.....	5
2.3. Kanat Tasarımı.....	6
2.3.1. Akışkan – Yapı etkileşimi.....	6
2.4. Rüzgar Türbinlerinin Ayrodinamiği.....	8
2.4.1. Aktüatör disk modeli.....	11
2.4.2. Kuyruk akışındaki dönme ve etkileri.....	19
2.4.3. Pala elemanı momentum teorisi.....	22
2.5. Neden 3-Kanatlı Tasarım.....	27
2.6. Rüzgar Türbinlerinde Kanadın Yapısı.....	30
2.6.1. Rüzgar türbin kanadına etkiyen yükler.....	31
2.6.2. Kompozit Malzemeler.....	33
2.6.3 Kompozitlerin mekaniği.....	36
2.6.4 Malzemelerde yük altında oluşan bağlantılar(coupling).....	38
2.7. Yorulma(Fatigue).....	39
2.8. Sertlik(Stiffness).....	40
2.9. Kirişler.....	40
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	45
3.1. Bilgisayar Programları.....	45
3.2. Aerodinamik Tasarım Aşamaları.....	45
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	48
4.1 CFX Programının 2-Boyutta Doğrulanması.....	48
4.2. Kanadın CFX Modeli ve Simülasyon Sonuçları.....	60
4.3. Güç Hesabı.....	65
4.4. Ölçeklendirme.....	67
4.5. Kanat Yapısı.....	68
4.6. Kanat Malzeme Bilgisi.....	70
4.7. ANSYS Mechanical Simülasyon Sonuçları.....	72
5. SONUÇ.....	87
KAYNAKLAR.....	89
EKLER.....	91
EK 1. Navier-Stokes Denklemleri.....	91
EK 2. Bazı Kanat Kesitlerinde Basınç ve Hız Dağılımı ile C_p Eğrileri.....	92
ÖZGEÇMİŞ.....	97

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
a	Eksenel indüklenme faktörü
a'	Radyal indüklenme faktörü
L	Kaldırma kuvveti
D	Sürüklenme kuvveti
C_l	Kaldırma katsayısı
C_d	Sürüklenme katsayısı
C_m	Moment katsayısı
C_p	Güç katsayısı
C_p	Basınç katsayısı
C_T	İtme katsayısı
E	Young elastisite modülü
M	Moment
P	Güç
T	Tork
U_∞	Serbest rüzgar hızı
$\dot{m}$	Kütle debisi
ω	Dönme hızı
ρ	Yoğunluk
σ	Gerilme(Stres)

Kısaltmalar	Açıklama
CAD	Bilgisayar Destekli Çizim
CPU	Merkezi İşlem Birimi
USO	Uç Sürat Oranı(Tip Speed Ratio)
FRP	Elyaf takviyeli plastik
NACA	Amerikan Ulusal Havacılık Danışma Kurulu
NREL	Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Ajansı
SST	Shear Stress Transport
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
TSR	Tip Speed Ratio(Uç Sürat Oranı)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Dünya birincil enerji tüketimi	2
Şekil 1.2. Kaynaklarına göre Türkiye'nin elektrik üretimi	2
Şekil 1.3. Türkiye rüzgar atlası	3
Şekil 2.1. Rüzgar türbin parçaları	5
Şekil 2.2. Damla(Airfoil) şematığı	8
Şekil 2.3. Airfoil(Damla) kuvvetleri	9
Şekil 2.4. Basınç Gradienti	10
Şekil 2.5. Aktüatör disk modeli	12
Şekil 2.6. Güç katsayısı-indüklenme faktörü ilişkisi	16
Şekil 2.7. Rotor durumları	17
Şekil 2.8. Farazi akış tüpü	18
Şekil 2.9. Aksiyal hız ve basıncın rotor öncesi ve sonrası değerleri	19
Şekil 2.10. Akış çizgilerinin dönmesi	20
Şekil 2.11. Bir türbinin verim limiti	21
Şekil 2.12. Rotor düzlemi	22
Şekil 2.13 Hız üçgeni	23
Şekil 2.14 Kuvvet üçgeni	23
Şekil 2.15. Rüzgar türbin teorik performanslarının USO(TSR) ile değişimi	28
Şekil 2.16. Türbine gelen rüzgar profili	31
Şekil 2.17. Kompozit malzeme sınıflandırması	34
Şekil 2.18. Karışım kuralı	37
Şekil 2.19. Temsili bir ankastre giriş	41
Şekil 2.20. Türbin kanadının temsili hali, yük dağılımı ve moment yük dağılımı	42
Şekil 2.21. Yük altında temsili bir girişin	43
Şekil 3.1. Aerodinamik tasarımda kullanılan interpolate edilmiş profiller	47
Şekil 4.1. Basınç Konturları , Hücumaçısı= 0°	50
Şekil 4.2. Hız Konturları , Hücumaçısı= 0°	50
Şekil 4.3. Basınç Konturları , Hücumaçısı= 2°	51
Şekil 4.4. Hız Konturları , Hücumaçısı= 2°	51
Şekil 4.5. Basınç Konturları , Hücumaçısı= 4°	52
Şekil 4.6. Hız Konturları , Hücumaçısı= 4°	52
Şekil 4.7. Basınç Konturları , Hücumaçısı= 6°	53
Şekil 4.8. Hız Konturları , Hücumaçısı= 6°	53
Şekil 4.9. Basınç Konturları , Hücumaçısı= 8°	54
Şekil 4.10. Hız Konturları , Hücumaçısı= 8°	54
Şekil 4.11. Basınç Konturları , Hücumaçısı= 10°	55
Şekil 4.12. Hız Konturları , Hücumaçısı= 10°	55
Şekil 4.13. Basınç Konturları , Hücumaçısı= 12°	56
Şekil 4.14. Hız Konturları , Hücumaçısı= 12°	56
Şekil 4.15. Basınç Konturları , Hücumaçısı= 14°	57

Şekil 4.16. Basınç Konturları , HücümAçısı= 14^0	57
Şekil 4.17. NACA0012 damlası için HücümAçısı-Kaldırma(Lift) katsayısı grafiği	58
Şekil 4.18. NACA0012 damlası için $C_l - C_d$ grafiği	58
Şekil 4.19. NACA0012 damlası için HücümAçısı-Kaldırma(Lift) katsayısı grafiği	59
Şekil 4.20. NACA0012 için $C_l - C_d$ deney sonuçları	59
Şekil 4.21. 3-Boyutlu simülasyondan bir ağ eleman kesiti	62
Şekil 4.22. Türbin simülasyon hacmi(Iso Görünüş) ve NACA4412 damla profili	62
Şekil 4.23. Türbin simülasyon hacmi(Sağdan Görünüş)	63
Şekil 4.24. Türbin simülasyon hacmi(Önden Görünüş)	63
Şekil 4.25. Kanadın dönüş hızı	64
Şekil 4.26. Tasarlanan rotorun Qblade programına göre güç üretimi	65
Şekil 4.27. Tasarlanan rotorun Qblade programına göre tork üretimi	66
Şekil 4.28. Farklı Re değerleri için NACA4412 C_l -Hücüm Açısı bağlantısı	67
Şekil 4.29. Farklı Re numaralarındaki akış koşullarında performans eğrisi	67
Şekil 4.30. Kanada etkiyen kuvvetler	72
Şekil 4.31. Linner çözüm deformasyonu	73
Şekil 4.32. Non-lineer çözüm deformasyonu	74
Şekil 4.33. Dış kabuk normal gerilme(X,Y,Z yönleri)	75
Şekil 4.34. Spar(flanş) normal gerilme(X,Y,Z yönleri)	76
Şekil 4.35. Köpük(Webcore) normal gerilme(X,Y,Z yönleri)	77
Şekil 4.36. Kesmeplakası(Webshell) normal gerilme(X,Y,Z yönleri)	78
Şekil 4.37. Dışkabuk kesme(shear) gerilme(XY,YZ,XZ)	79
Şekil 4.38. Spar kesme(shear) gerilme(XY,YZ,XZ)	80
Şekil 4.39. Köpük kesme(shear) gerilme(XY,YZ,XZ)	81
Şekil 4.40. Kesmeplakası kesme(shear) gerilme(XY,YZ,XZ)	82
Şekil 4.41. Rotor yarıçap kısalması	84

ÇİZELGELER DİZİNİ

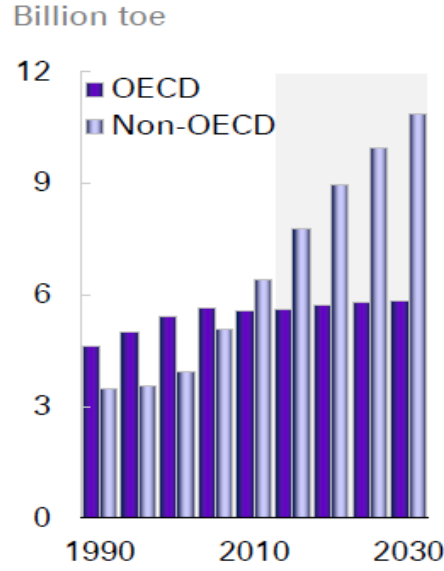
	Sayfa
Çizelge 1.1. Türkiye rüzgar enerjisi potansiyali	3
Çizelge 2.1. Rüzgar türbin tarlası maliyet kalemleri	29
Çizelge 4.1. Ayrodinamik tasarım ayrıntıları	59
Çizelge 4.2. Türbülans modellerinin kıyaslanması	62
Çizelge 4.3. Spar(flanş) yapısı boyutları	69
Çizelge 4.4. Kanat kütlesi	70
Çizelge 4.5. Köpük malzeme bilgisi	71
Çizelge 4.6. Kabuk malzeme özellikleri	71
Çizelge 4.7 Spar(Flanş) malzeme bilgisi	71
Çizelge 4.8 Kanat kısımlarının normal gerilmeleri ve dayanım sınırları	85
Çizelge 4.9 Kanat kısımlarının kesme gerilmeleri ve dayanım sınırları	86

1 . GİRİŞ

Enerji, önemi her geçen gün artmakta olan bir konudur. Başta ekonomik ve siyasi olmak üzere çok yönlü bağlantıları olan bu konu bu kısa giriş kısmında ana hatlarıyla incelenecektir. İncelemenin temelini başlıca enerji kaynakları ile bu kaynaklardan yararlanma oranları oluşturmaktadır. Ancak bu tez çalışması bir yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgar enerjisini konu edinmektedir ve incelemede rüzgar enerjisine özel bir önem atfedilecektir. Dünyanın enerji görünümüne kısaca değinilecek olup daha ziyade Türkiye'nin enerji rakamları üzerinde durulacaktır.

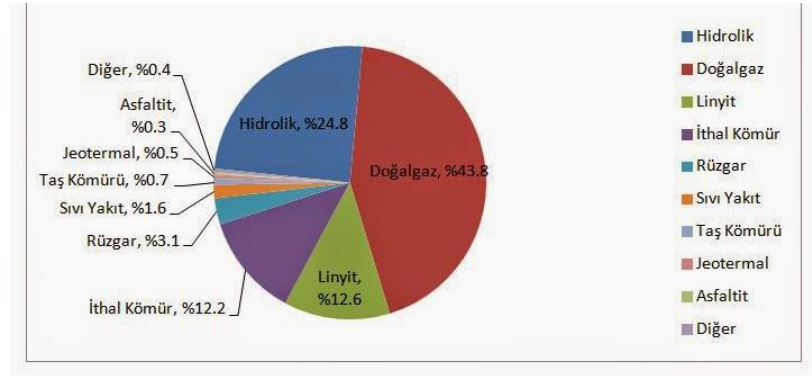
Enerji konusu son dönemde her zamankinden daha fazla olmak üzere dünya gündemini meşgul etmektedir. Bu olgu temelde “sürdürülebilirlik” kavramı ile birlikte ele alınmaktadır. Zira enerji kaynaklarının sınırlılığı, fosil kaynaklarının yenilenme hızının bunların tüketim hızının çok gerisinde olması enerji tüketim alışkanlıklarımızın ciddi bir biçimde yeniden ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Artan enerji maliyetleri ile fiyatları da farklı enerji kaynaklarına yönelme noktasında bir motivasyon kaynağı olmaktadır. Bu enerji kaynaklarından başlıcası da rüzgardır. Ayrıca küresel ısınma ve bunun olumsuz birçok sonucunun fosil kaynaklarından yararlanma neticesinde atmosferde yoğunluğu artan CO₂ gazı ile doğrudan bağlantılı olduğu yeni veriler ışığında giderek daha çok kabul gören bir olgudur(Yaşaroğlu 2014). Bu nedenle temiz enerji kaynaklarına ciddi bir yönelim vardır. Elbette bu durum farklı bir çok etmene de dayanmaktadır. Örneğin ülkelerin enerji bağımsızlığı çok önemli bir politik nedendir. AB bu konuda çok iyi bir örnek durumundadır. Dünyanın en büyük enerji tüketicilerinden biri olan AB aynı zamanda enerjide dışa bağımlıdır. Bu nedenle de başta rüzgar, güneş ve biyoenerji olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarına en büyük yatırımı AB ülkeleri yapmaktadır. Bu hususa Türkiye AB ile benzer bir kaderi paylaşmaktadır ve politikaları da benzeşmektedir.

Enerji tüketimi nüfus ve endüstriyel gelişmişlik ile çok yakından ilgilidir. Bütün istatistiki veriler bu yakın ilişkiyi doğrulamaktadır. Dünya nüfusundaki artış ve gelişmenin yönü önümüzdeki yıllarda daha fazla enerjiye gereksinim duyulacağını koşturmaktadır. Aşağıda verilen Şekil 1.1 BP Enerji Görünümü 2013 raporundan alınmıştır ve yukarıda bahsedilen durumu özetlemektedir.



Şekil 1.1 Dünya birincil enerji tüketimi (Anonim, 2013a)

Şekil 1.2 ile Türkiye'nin elektrik üretiminde yararlanılan kaynakların dağılımı gösterilmektedir. Rüzgar enerjisi 2013 yılında toplam elektrik üretiminin % 3,1'ini sağlamıştır ve Türkiye'nin 2023 enerji hedefleri göstermektedir ki bu oran ileride daha fazla artış gösterecektir.



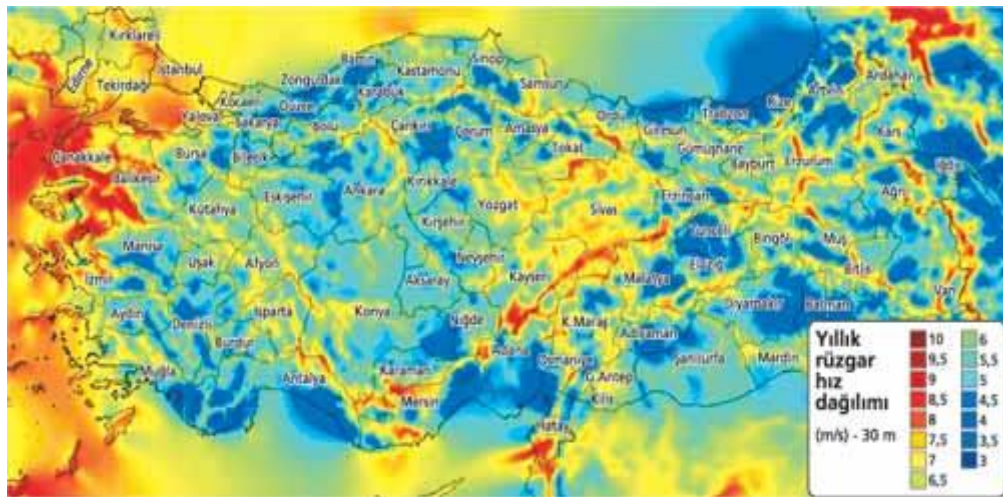
Şekil 1.2 Kaynaklarına göre Türkiye'nin elektrik üretimi (Anonim, 2013b)

Türkiye iyi sayılabilecek miktarda rüzgar enerjisi potansiyeline sahiptir. Bugünkü veriler ve teknolojik düzey baz alındığında yaklaşık olarak 48 000 MW'lık bir kurulu

güce sahip olmak mümkündür. Ancak 2013 yılı sonu itibariyle bu potansiyelin sadece 2958 MW’lık kısmından yararlanılabilmektedir. Aşağıdaki tabloda Türkiye’nin rüzgar atlası ve ortalama rüzgar hızlarının ne kadarlık bir potansiyele karşılık geldiği gösterilmektedir. Tabloda da görüldüğü gibi ortalama rüzgar hızının yerden 30 m yükseklikte 7,5 m/s üzerinde olduğu alanlar toplamda 20 000 MW’lık bir kurulu güç olanağı sunmaktadırlar. Bu alanlar Türkiye enerji stratejisinde ilk olarak yararlanılacak alanlar olarak görülmektedir ve 2023 hedeflerine göre öncelikli konumundadırlar.

Rüzgar Hızı(m/s)	Rüzgar Güç Yoğunluğu(W/m ²)	Kullanılabilir Alan(km ²)	Tekno-Ekonomik Potansiyel(MW)
7,0 – 7,5	400 – 500	5852	29 259
7,5 – 8,0	500 – 600	2599	12 994
8,0 – 9,0	600 – 800	1080	5 400
> 9,0	>800	39	196
Toplam		9570	47 849

Çizelge 1.1 Türkiye rüzgar enerjisi potansiyali (Anonim, 2013c)



Şekil 1.3 Türkiye rüzgar atlası (Anonim, 2013d)

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu kısımda genel bir literatür taraması yapılmıştır. Kısaca rüzgar enerjisinin tarihinden bahsedildikten sonra rüzgar türbinlerindeki ana parçalar tanıtılmıştır. Akbinde rüzgar türbin kanadının tasarım esasları en temel hatlarıyla ve akışkan-yapı etkileşiminin ne olduğunu anlatan bir alt bölümle beraber verilmektedir. Daha sonra ise rüzgar enerjisi dönüşümünde kullanılan en temel tezler ele alınmış ve aktarılmıştır. Bu bölümde rüzgar enerjisi dönüşümünün en temel elemanı olan damla profiller(airfoil) temel parametreleri ile birlikte tanımlanmışlardır. Akabinde sırası ile aktüatör disk modeli, bu modele kuyruk akışındaki dönme etkilerinin dahil edilmesi ile bulunan sonuçlar ve nihayetinde pala elemanı momentum teorisi açıklanmıştır. Bu aerodinamik açıklamaların sonunda türbinlerin neden 3-kanatlı tasarlandıkları sorusuna cevap aranmıştır. Kaynak araştırması bu noktadan sonra yapısal analize kaymıştır. Kanat yapısı bu yapıya etkiyen yüklerle beraber anlatıldıktan sonra kanatların imal edildikleri kompozit malzemeler ve kompozitlerin mekaniği ile ilgili taramaya yer verilmiştir. Malzemenin yük altında ne şekilde gerilme türleri yaşadıkları sorusu türbin kanadı tasarımına etkisi yönüyle cevaplandıktan sonra temel kavramlardan yorulma(fatigue) ve sertlik(stifness) açıklanmıştır. Son olarak ise kanat bir kirişe benzetilerek kirişlerin temel teoremleri aktarılmıştır.

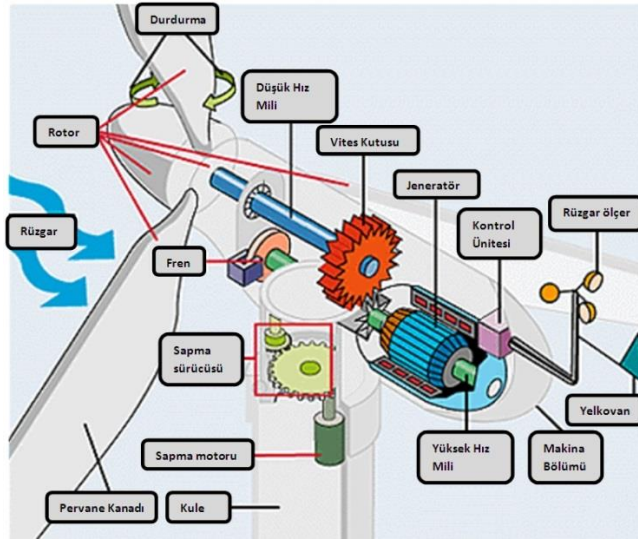
2.1. Rüzgar Enerjisinin Tarihi

Rüzgar güllerinin 3000 yıllık tarihi vardır. Rüzgar enerjisinden eski zamanlarda asıl olarak tahıl öğütme ve su pompalama işlerinde yararlanılmıştır. Ancak elektrifikasyonun doğması ve genişlemesi ile birlikte bu fonksiyonlar önemini kaybetmeye başlamıştır.

Ancak 20. yüzyılla birlikte rüzgar gülleri rüzgar türbinlerine dönüşmeye başladılar ve elektrik üretiminde kullanılır oldular. Ancak rüzgar türbinlerinin asıl yaygınlaşması 20 yıl öncesine gider (Schilling, 2012). Bunun temel nedeni de Avrupa Birliği'nde o dönemlerde oluşmaya başlayan sürdürülebilirlik konsepti ile enerji güvenliğinin sağlanması amacıdır. Normal şartlar altında aynı miktarda elektrik enerjisi üretebilmek için gerekli yatırım maliyeti rüzgar için daha fazladır. Bu nedenle serbest piyasaya

müdahale edilmeseydi rüzgar enerjisinin bugünkü yaygınlaşma düzeyine ulaşması mümkün olmazdı. Ancak başta AB ve akabinde dünyanın bir çok ülkesinde rüzgar enerjisi teşvik kapsamına alınmıştır ve bu sayede elektrik üretimindeki payı hatırı sayılır bir noktaya gelmiştir.

2.2. Rüzgar Güllerinin Parçaları



Şekil 2.1 Rüzgar türbin parçaları (Anonim, 2014)

Bir rüzgar türbini üretici firmaya ve tasarımına bağlı olarak değişmekle birlikte temelde kanatlar, hub, jeneratör, dişli kutuları, kule ve temeli ile çeşitli kontrol ve fren ekipmanlarından oluşur.

Kule türbini taşıyan elemandır. Yerde bir temel ile sabitlenmiştir. Kanatlar türbinin en önemli parçalarıdır. Kuvvet üretimi burada olur. Aynı zamanda maliyet olarak da türbindeki en pahalı kısımlardan birini teşkil ederler. Kanatlar bir hub(merkez) aracılığı ile birleşirler. Kanatlar düşük hızlı şafta bağlıdır. Bu şaft ise bir dişli kutusu marifetiyle yüksek hızlı başka bir şafta. Bahsedilen ikinci şaft alternatörün çeviricisidir. Makine bölümü kulenin tepesinde olup kanat hariç diğer tüm ekipmanları çevreleyen ve koruyan yapıdır.

2.3 Rüzgar Türbinlerinde Kanat Tasarımı

Bir rüzgar türbininin kanat tasarımı en verimli aerodinamik geometrinin bulunması ile başlar ancak birçok farklı değişken ile birlikte düşünüldüğünde problem temel olarak bir optimizasyon problemidir. Bunun nedeni aerodinamik verimi en yüksek geometrinin yarattığı yapısal problemlerdir. Bu noktada seçilen malzeme ve üretim tekniği de tasarımın üzerinde değiştirici bir etkiye sahiptir. Ancak bu iteratif sürece bir yerinden başlanmalıdır ve bu nokta aerodinamik tasarım basamağıdır. Bu basamak sonlandığında yapısal tasarım için gerekli en önemli veri de elde edilmiş olacaktır: kanat üzerine etkileyen aerodinamik kuvvetler. Akabinde bu kuvvetler dikkate alınarak bir yapısal model kurulur ve gerekli durumda kanadın geometrisinde değişikliğe gidilir. Ayrıca kanadın üzerine etkileyen kuvvet nedeniyle geometrisi ilk tasarımdan sapar. Bu değişiklik yeni bir kuvvet dağılımına sebep olur ve yapısal tasarım da bundan etkilenir. Bu durum akışkan-yapı etkileşimi olarak tarif edilir ve belirlenen kriterler sağlanana kadar tasarım hem aerodinamik hem de yapısal yönden sürekli revize edilir.

2.3.1. Akışkan – Yapı etkileşimi

Rijid geometri kabulü hesap kolaylığı sağlaması nedeniyle bir çok alanda yapılır. Ancak bu idealizasyon bazı durumlarda terk edilmelidir. Havacılık (kanat tasarımı) uygulamaları bu kabûlün uygun olmadığı alanlardan biridir. Aksi durumda varılan sonuçlar ile gerçek değerler arasındaki fark tolere edilebilir sınırları aşmaktadır. Bu noktada aerodinamik tasarım, oluşan kuvvetler, yapısal tasarımın bu kuvvetlere reaksiyonu ve nihayet bu reaksiyonun aerodinamik kuvvetleri değiştirme etkisi üzerinde durmak zorunludur. Bu ilişki akışkan- yapı etkileşimi olarak tanımlanır ve bu ilişkinin çözülmesi için farklı modeller bulunmaktadır.

Söz konusu olan problemin zorluk derecesi seçilen çözüm modelini de değiştirmektedir. Bu noktada akışkan-yapı etkileşiminin gerçekleştiği yüzeylerin doğru anlaşılması ve çözülmesi özellikle önemlidir. Zira akışkan alanı(domain) ile yapı alanı bu yüzey üzerinden etkileşmektedir. Kuvvetler bu arayüz üzerinden akışkan domaininden yapı domainine transfer edilirken, yeni geometri yani yeni akışkan

domain alanı da yine bu arayüz üzerinden akışkan çözümleyicisine transfer edilmektedir.

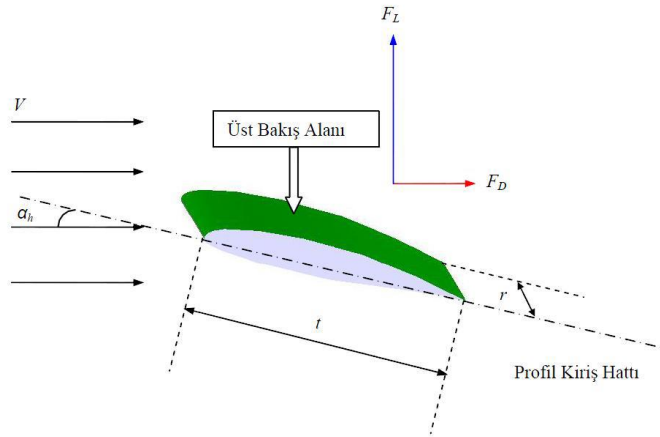
Akışkan-yapı etkileşimi problemlerinde iki ana domain ile bu iki domaini birbirlerine bağlayan bir arayüz bulunmaktadır. Akışkan domaini ile yapı domaini birbirlerine bağlanmak zorundadırlar. Aksi takdirde bir çözümden bahsetmek mümkün değildir. Oluşturulan bağlantı problemin tipine göre değişmekte ve çözülmesi istenen problemin zorluk derecesine bağlı olarak “zayıf” veya “güçlü” olabilmektedir. Bunun dışında bir de “tam bağlı(fully coupled)” yöntemi vardır ki bu yöntemde yapısal ve akışkan denklemleri tek bir denklemde birleştirilirler ve istenen yakınsama düzeyine erişilinceye kadar her bir adımda topluca çözümlenirler. Bu yöntem hızlı yakınsama ve daha kararlı bir çözüme ulaşma noktasında avantajlı olmasına rağmen hesaplama tekniği yönünden daha zordur ve hali hazırda piyasada kullanılan paket programlar bu esasla çalışmadıklarından çözüm elde etmek için özel bir yöntem geliştirilmesi zorunludur. Bu nedenle bahsi geçen “tam bağlı” yöntem çok sınırlı kullanılır.

Tekrar “zayıf” ve “güçlü” bağlantı türlerine dönecek olunursa, bu yöntemler temelde aynı prensibe dayanırlar. İki ayrı denklem seti iki ayrı çözümleyici tarafından ayrı ayrı çözülür. Daha sonra bir arayüz üzerinden gerekli veriler çözücüler arasında transfer edilir. Akışkan çözümleyici ile yapısal çözümleyici farklı domainlerde iş görürler. Bu noktada “zayıf” ve “güçlü” bağlantı farkı iki çözümleyicinin(solver) ne sıklıkta haberleştikleri ve veri transfer ettikleri ile ilgilidir. Daha sık veri transferi hesaplama zamanını arttırırken, daha kararlı ve doğru sonuçlara varılması noktasında avantajlıdır. Bu tez çalışmasında daha az hesaplama gücü gerektirdiğinden “zayıf” bağlantı yöntemi kullanılmıştır. Ancak literatürde önerilen yöntem “güçlü” bağlantıdır. Bu konu analiz sonuçları kısmında “yakınsama” başlığı altında incelenecektir (Salman, 2012).

Üstünde durulması gereken bir diğer nokta da akışkan-yapı etkileşiminin tek-yönlü mü yoksa çift-yönlü mü inceleneceğidir. İncelenmekte olan rüzgar türbin kanadı eğer tek yönlü incelenecek olursa, sadece akışkan çözücüsünün elde ettiği sonuçlar yani temelde basınç dağılımı yapısal çözücüye aktarılır ve ne akışkan ne de yapısal çözücü tekrar çalıştırılmazlar. Çift-yönlü incelemede ise belirlenen yakınsama kriterine varılana kadar(örneğin rotor süpürme alanındaki azalmanın belli bir değerin altına düşmesi gibi) kadar çözücüler ardı sıra veri transfer edilerek yeniden çalıştırılırlar(Akgül, 2012).

Konveks tarafa da “emme tarafı” denir. Çünkü burada basınç diğer yüzden daha azdır. Bu şekilde oluşan basınç dağılımı aynı zamanda eşitsiz bir kuvvet dağılımına da neden olmaktadır. Oluşan net kuvvet damlayı harekete zorlar. Eğer damla bir şafta bağlıysa, şaft gücü elde edilmiş olur. Bu basınç dağılımına ek olarak damla yüzeyi boyunca oluşan viskos sürtünme de son kuvvet dengesinde az da olsa rol oynar.

Yukarıda değinilen kuvvetler tamamen kolaylık olsun diye geleneksel olarak kord çizgisinin ön uca yakın $c/4$ noktasında toplanır. Burada bir moment ve iki kuvvet tanımlanır. Kuvvetlerden biri akışa paralel diğeri diktir. Paralel kuvvet “Drag(itme) Kuvvet” iken dik kuvvet “Lift(kaldırma)” olarak anılır. Eğme momenti(pitching moment) ise saat yönünde pozitif olacak şekilde tanımlanır.



Şekil 2.3 Airfoil(Damla) kuvvetleri

Akışkanlar mekaniğinde birimsiz değişkenler oldukça sık kullanılır ve bir çok kolaylık da sağlarlar. Damla için “Kaldırma Katsayısı”, “Sürükleme Katsayısı” ve “Moment Katsayısı” birimsiz katsayılarıdır.

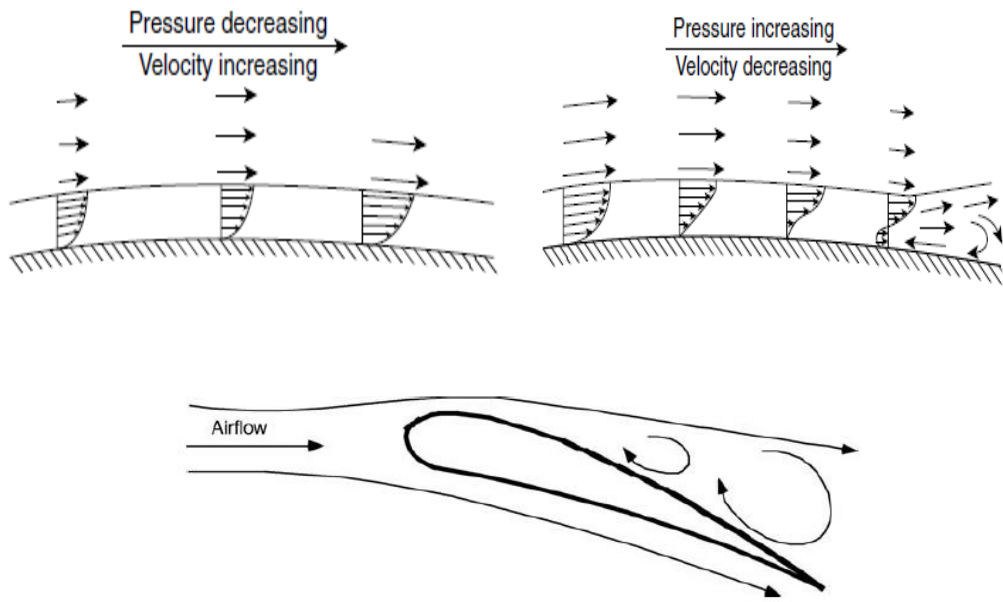
$$C_l = \frac{L/l}{\frac{1}{2}\rho U^2 c}$$

$$C_d = \frac{D/l}{\frac{1}{2}\rho U^2 c}$$

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U^2 c}$$

Kaldırma katsayısı kaldırma kuvvetinin üretilen toplam kuvvete oranını verirken, sürükleme katsayısı sürükleme kuvvetinin toplam kuvvete oranıdır. Moment katsayısı ise eğme momentinin dinamik momente oranıdır.

Bu açıklamalar sonrası akışı daha iyi anlayabilecek noktadayız. Daha önce de denildiği gibi kaldırma, sürüklenme kuvvetleri ile eğme momenti yüzey sürtünmesi ile beraber damla üzerinde kuvvet yaratan eşitsiz basınç dağılımından kaynaklanır. Basınç dağılımının oluşması akış hızı ile basıncı arasındaki bağıntının anlaşılması ile çözümlenebilir. Akışın hızı arttıkça basıncı azalır. Bernolli denklemi ve teorisi daha detaylı bir algı için incelenebilir. Kısaca söylenecek olursa, damlanın şekli nedeniyle üzerindeki akış farklı hızlarda olmakta ve bu da belli bir basınç yani kuvvet dağılımına neden olmaktadır.



Şekil 2.4 Basınç Gradienti(üst solda olumlu sağda olumsuz, altta ayrılma)(Miley, 1982)

Basınç dağılımı akış boyunca değişkendir. İki tip basınç gradienti vardır: olumlu(favorable) ve olumsuz(adverse). Eğer basınç akış boyunca düşüyorsa buna olumlu gradient denir, bu durumda akış yoluna hızlanarak devam eder. Olumsuz gradient durumunda akış engel ile karşılaşmıştır, yavaşlamaktadır. Buna bir de akışı her durumda yavaşlatan sürtünme etkisini dahil etmek gerekir. Dolayısı ile eğer olumsuz basınç gradienti + sürtünme kuvveti değeri yeterince büyükse akışı durdurur. Hatta akış tersine bile dönebilir. Bu terse dönme durumunu akış ayrılması(flow separation) diye tabir edilen olay izler. Stall da denilen bu olay damla kuvvetlerini dramatik olarak

etkiler. Kaldırma kuvveti aniden büyük bir düşüş gösterirken, sürüklenme kuvveti büyür. Dolayısı ile bir damlanın etkili bir biçimde kaldırma kuvveti yaratması isteniyorsa akışın sınır tabaka tarafından desteklenmesi ve stalla mahal vermemesi sağlanmalıdır.

Öneminden dolayı değinmekte fayda olan toplam kaldırma kuvveti dik basınç kuvvetlerinin tüm yüzey boyunca integral edilmesi ile bulunur. (Anderson, 2004)

$$L = \oint p \mathbf{n} \cdot \mathbf{k} dA ,$$

Burada;

- L kaldırma,
- A kanat yüzey alanı
- p basınç,
- $\mathbf{n}$ is the dik birim vektör, (kanadın içine doğru)
- $\mathbf{k}$ is the düşey birim vektör, (rüzgar akış yönüne dik)

Sürtünme ihmal edilmiştir.

Birçok model olmasına karşın en çok kabul gören modeller aşağıda özetlenecektir. Bu kısımdan önce bir rüzgar türbin kanadının üstüne kurulduğu damla incelendi. Ancak damla teorisi temelde 3-boyutlu olarak ele alınmamaktadır. Gerçek bir kanat ise 3-boyutlu bir yapıdır. Aslında aşağıda açıklanacak modeller tam da bu 2-boyut bilgisi ile 3-boyutlu bir yapıyı analiz etmeyi hedefleyen modellerdir.

2.4.1. Aktüatör disk modeli

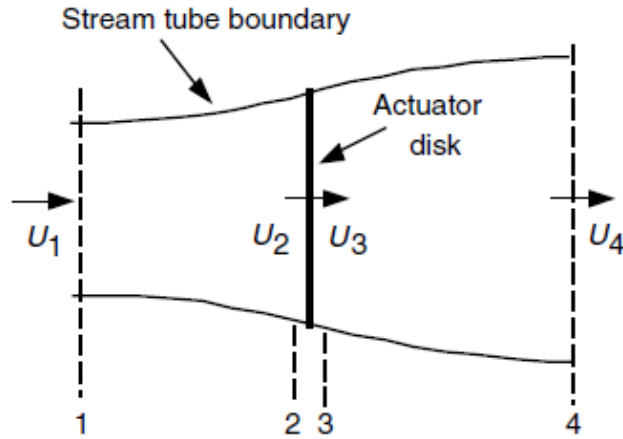
Bu model, rüzgar türbinlerinin rüzgarın kinetik enerjisini soğurma prosesini açıklayan ilk ve en basit modeldir ve Alman fizikçi Betz tarafından geliştirilmiştir. Sade ve basitleştirilmiş olmasına karşın, bir rüzgar türbininin temel çalışma prensibini ve sınırlarını anlamak açısından son derece kullanışlıdır.

Belirtildiği gibi, rüzgar türbini hareket eden havanın yani rüzgarın kinetik enerjisinden yararlanır. Maddenin korunumu yasasına göre, aynı miktarda hava yavaşlarsa aynı

zamanda genişlemek de zorundadır. Şekilde gösterildiği gibi hava türbine yaklaştıkça hem yavaşlıyor hem de daha geniş bir kesit alanına erişiyor. Kütle bu şekilde sabit kalmaktadır.

Devam etmeden önce bu analiz için geçerli olan varsayımlar ortaya konulmalıdır:

- 1) Homojen, sıkıştırılmaz, kararlı bir akış
- 2) Akışta sürtünme yoktur ve aktüatör diske etkiyen sürtünme direnci yoktur. Bu yüzden, akışın internal(içsel) enerjisi tüm süreç boyunca sabit kalmaktadır.
- 3) Havanın tamamı kinetik enerjisinin bir kısmını bırakarak diskten çıkmaktadır.
- 4) Diskin arkasındaki hava dönmektedir. Yani analiz 1-boyutludur. Tek hız doğrultusu disk aksı boyuncadır.
- 5) Statik basınç diskten çok önünde ve çok arkasında rahatsız edilmemiş ambient hava basıncına eşittir.



Şekil 2.5 Aktüatör disk modeli(Hansen, 2008)

Kütle akış miktarı, (yoğunluk x kesit alanı x hız) olarak tanımlanabilir ve kontrol hacmi boyunca sabittir.

$$(\rho AU)_1 = (\rho AU)_4 = \dot{m} \quad (2.1)$$

Burada “1” alt indisi gelen rüzgarı, “4” alt indisi ise diskin arkasındaki çıkan rüzgarı belirtmektedir.

Havanın hızı diskten geçerken değişir. Momentum değişim oranı (hızdaki değişim x kütle akış miktarı) kadardır. Bu momentum değişim oranı aynı zamanda havayı yavaşlatan “thrust(itme)” kuvvetine de eşittir.

$$T = U_1(\rho AU)_1 - U_4(\rho AU)_4 \quad (2.2)$$

Bu control hacim sisteminde momentum değişimi yaşandığına göre, buna neden olan bir kuvvet de olmalıdır. Ön kabullerde söylendiği gibi, incelediğimiz kontrol tüpü atmosferik basınç altındaki hava ile çevrilidir ve bu nedenle tüp üstünde bir kuvvet yaratamaz. Dolayısı ile bu kuvvet sadece diskte yaşanan basınç değişiminden doğmaktadır.

$$T = A_2(p_2 - p_3) \quad (2.3)$$

Basınç farkını bulmak için Bernulli eşitliğinden yararlanılabilir. Ancak bu eşitlik control tüpüne bir uçtan diğerine bir bütün olarak uygulanamaz. Zira diskte enerji havadan alınmaktadır. Fakat Bernulli diskin iki tarafına ayrı ayrı uygulanabilir.

Rüzgarın diske geldiği taraf için:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 \quad (2.4)$$

Diskten arkasındaki taraf için:

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (2.5)$$

Düzenlenirse;

$$p_2 - p_3 = \frac{1}{2}\rho U_1^2 - \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (2.6)$$

5 numaralı varsayıma göre 1 ve 4 numaralı kesitlerde basınç eşittir. Şekilde de görüldüğü gibi kesit alanı yumuşak bir biçimde değişmekte ve 1. kesitten 4. kesite bir hız sıçraması olmamaktadır. Bu durumda 2 ve 3 numaralı kestlerde hız rahatlıkla eşit kabul edilebilir.

Bu durumda, (3.6) numaralı denklem (3.3) denkleminde yerine konursa

$$T = \frac{1}{2}\rho A_2(U_1^2 - U_4^2) \text{ eşitliğine varılır.} \quad (2.7)$$

Bulduğumuz iki trust kuvveti eşitliklerini kullanarak;

$$\dot{m}(U_1 - U_4) = \frac{1}{2}\rho A_2(U_1^2 - U_4^2) \text{ varılır.} \quad (2.8)$$

Kütle akış miktarı $\rho A_2 U_2$ olduğuna göre

$$U_2 = \frac{U_1 + U_4}{2} \text{ olmalıdır.} \quad (2.9)$$

Demek oluyor ki havanın diskteki hızı kontrol hacminin giriş ve çıkış ortalamasıdır.

Disk havanın akışı üzerinde yavaşlatıcı bir etkiye sahiptir. Bu olgu axial indüksiyon faktörü olarak anılır ve $a = \frac{U_1 - U_2}{U_1}$ şeklinde ifade edilir. Kısaca hava hızındaki azalma miktarının bir ölçüsüdür. Eşitlik manipüle edilerek

$$U_2 = U_1(1 - a) \quad (2.10)$$

$$U_4 = U_1(1 - 2a) \quad (2.11)$$

olduğu görülür.

Aktüatör diskin rüzgardan elde ettiği güç P, (itme kuvveti x havanın hızı) olduğuna göre

$$P = \frac{1}{2} \rho A_2 (U_1^2 - U_4^2) U_2 = \frac{1}{2} \rho A_2 U_2 (U_1 + U_4) (U_1 - U_4) \quad (2.12)$$

Bu eşitlikte havanın girişte, diskte ve çıkıştaki hızları vardır. İndüksiyon faktörü “a” değeri ile manipüle edilecek olursa

$$P = \frac{1}{2} \rho A_2 U_1 4a(1 - a)^2 \text{ elde edilir.} \quad (2.13)$$

Rüzgar türbinleri için güç katsayısı, türbinin ürettiği gücün rüzgarda bulunan toplam kinetik enerjiye oranıdır.

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U^3 A} = \frac{\text{Türbin Gücü}}{\text{Rüzgarda mevcut güç}} \quad (2.14)$$

Burada rotor disk alanı A, kontrol hacme girişteki rüzgar hızı ise U olarak alınmıştır. Bu durumda güç katsayısı $C_{Power} = 4a(1 - a)^2$ olmaktadır.

Rüzgardan elde edilebilecek gücün üst limiti bazı türev işlemleri yardımıyla bulunabilir. Güç katsayısı “a” ile türevlendiğinde

$$\frac{dC_P}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a) \text{ olmaktadır.} \quad (2.15)$$

a=1 rahatlıkla görülebileceği gibi bir çözüm değildir. Aksi takdirde havanın diskin önünde tamamen durmuş olması gerekir.

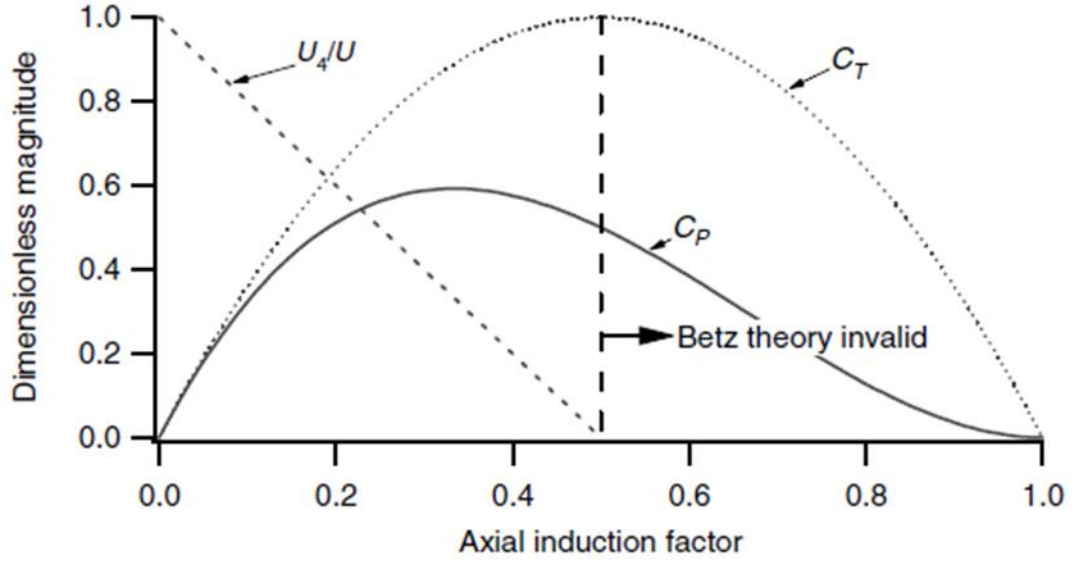
a=1/3 istenilen sonuçtur. Bu değer ile varılan maximum güç katsayısı $16/27 = 0.5926$ olmaktadır ve bu limit Alman bilim insanı Albert Betz tarafından bulunmuş olduğundan Betz limiti olarak da bilinir(Betz, 1922).

Diğer bir önemli parametre ise disk üzerinde oluşan itme kuvvetinin oluşabilecek maximum itme kuvvetine oranını ifade eden itme katsayısıdır.

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V_0^2 A} \quad (2.16)$$

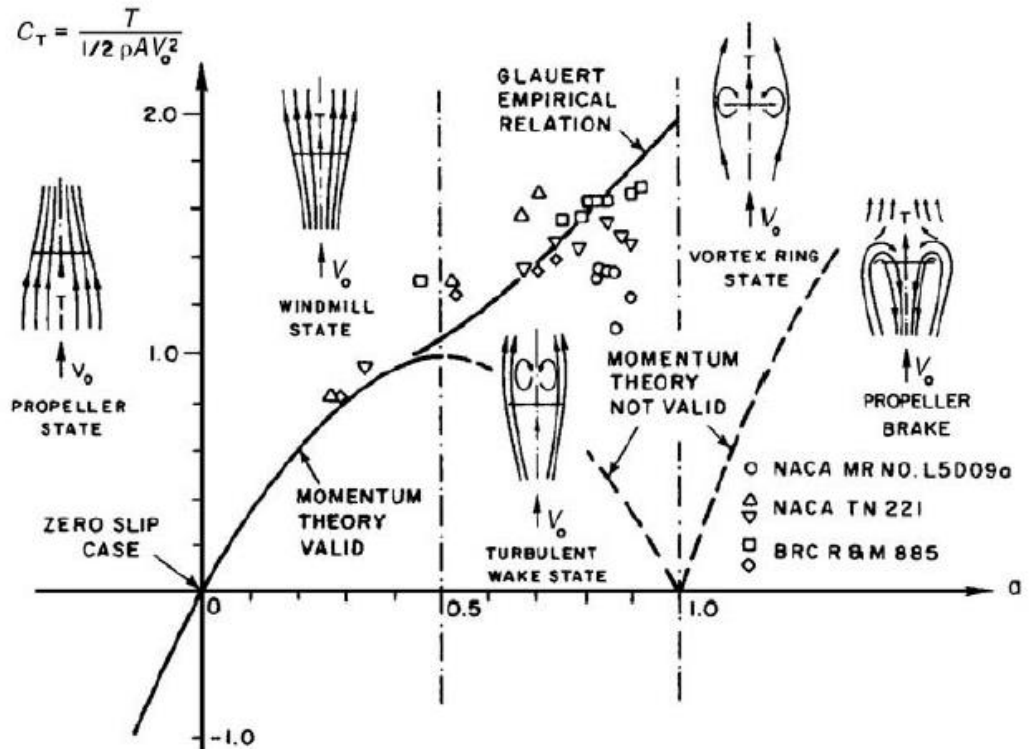
$$T = \frac{1}{2} \rho A U^2 [4a(1 - a)] \text{ olduğuna göre varılan eşitlik } C_T = 4a(1 - a) \text{ olmaktadır.}$$

Maximum trust katsayısı a=0.5 değeri için oluşmaktadır.



Şekil 2.6 Güç katsayısı-indükleme faktörü ilişkisi(Hansen, 2008)

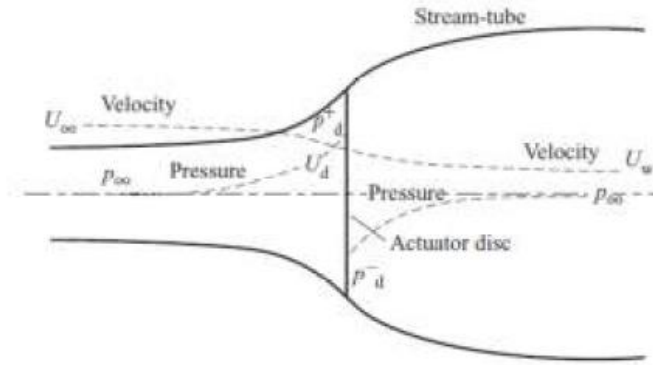
Yukarıda güç ve itme katsayılarına ait grafik verilmiştir. Elbette bu aşırı basitleştirilmiş teori 0.5 den büyük a değerleri için geçerli değildir. Aksi takdirde hava hızının diskin arkasında negatif olduğunu, yani geri akım olduğunu kabul etmemiz gerekir. Aslında gerçek akış şartlarında kısmen görülebilen bu durum teorinin ön varsayımlarına uymamaktadır. Aşağıdaki çizimde bu durum açıklanmıştır. Bakılacak olursa, Momentum Teorisinin geçerliliğini yitirdiği $a > 0.4$ değerlerinde rotor hali Turbulent Wake olmaktadır. Yani, kontrol hacim içerisindeki havaya dışarıdan momentum ilavesi vardır. Açıklaması basit olan bu durumun kaynağı disk akabinde aşırı yavaşlamış olan havanın ambient hava hızı ile oluşturduğu serbest shear tabakasının kararlılığını koruyamamasıdır. Oluşan büyük hız farkı girdaplara neden olmaktadır ve bu girdaplar ambient akıştan kontrol hacim içerisine momentum ve enerji transfer etmektedirler.



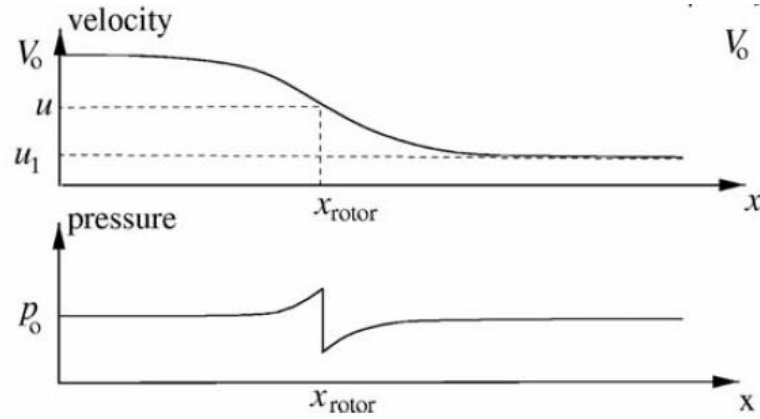
Şekil 2.7 Rotor durumları(Hansen, 2008)

Sonuç olarak, daha önce konulan kabuller ışığında denilebilir ki kontrol tüpünün içinde hız ve kesit alanı yumaşak bir biçimde değişmektedir. Hız azaldıkça kütle akışının sabitliğini koryabilmek için kesit alanı genişlemektedir. Yani, disk alanından geçen hava debisi disk olmadığı durumdan az olmaktadır. Aslında Betz limitinin sebebi de budur. Rüzgar türbini rüzgarın kinetik enerjisini alırken havayı yavaşlatmakta. Bu yavaşlama akabinde bir kesit alanı genişlemesine neden olmaktadır. Ancak enerji dönüşümünde iş yapan kuvvet basınç farkından doğmaktadır. Diske yaklaşırken yavaşlayan havanın basıncı artar ve açık hava basıncının üzerine çıkar. Bu basınç diskte iş yapar ve atmosferik basınç değerinin altına düşer. Ancak yoluna devam eden havanın hızı azalmaya devam eder ve bu süreç havanın basıncının tekrar artmasına neden olur. Sonuçta diskin akabindeki havanın basıncı tekrar kontrol hacmi girişindeki basıncına yani açık hava basıncına ulaşır. Fakat bu olurken havanın hızı düşmeye devam etmiştir ve kesit alanıda artmıştır.

Aşağıdaki çizimlerde yukarıda açıklanan husular daha net anlaşılmaktadır.



Şekil 2.8 Farazi akış tüpü(Manwll,2010)



Şekil 2.9 Aksiyal hız ve basıncın rotor öncesi ve sonrası değerleri(Manwll,2010)

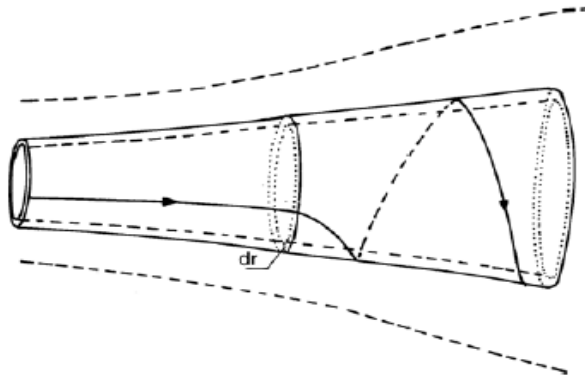
2.4.2 Kuyruk akışındaki dönme ve etkileri

Aktüatör disk modelinde akış 1-boyutlu olarak tasavvur edilmiştir. Elbette gerçek bir hava akımı rüzgar türbini için incelenecek olursa 3-boyutludur. Bu durumda aktüatör disk modeli her ne kadar inceleme için bir temel yaratıyor olsa da yetersizdir. Bu yetersizliğinin temel sebeplerinden biri de disk sonrası akışta dönme hareketinin

olmadığını varsaymasıdır. Bu varsayımı devre dışı bırakan ve yeni bir model geliştiren Glauert yeni ve daha doğru sonuçlara varmayı başarmıştır (Glauert,1935).

Temel olarak havanın disk sonrası dönme hareketi yapmasını dikkate alan bir modelin almayan modele göre daha düşük verim oranları vermesi son derece doğaldır. Zira Betz modeli çok ideal bir durumu varsaymıştır; sürtünme ve dönme hareketinden dolayı kaybedilen kinetik enerji dikkate alınmamıştır. Aslında teorik olarak arkasındaki havada dönmeye neden olmayan rüzgar türbini üretilebilir. Ancak bunu sağlamak ancak ilki ile ters yönde dönen bir disk ile mümkün olmaktadır, yani bir çeşit stator ile. Bu ek bir maliyet demektir ve türbin imalatçıları bu maliyete girmemek ve aynı zamanda ek parçaların getirdiği ek sorunlarla karşılaşmamak için verimden taviz vermekte ve dönme kayıplarına izin vermektedirler. Prandtl'ın modeli bu verim kaybının ne düzeyde olduğunu anlamaya izin vermektedir. Ancak bu haliyle model halen idealdir çünkü sürtünme kayıpları yine yok sayılmaktadır (Prandtl, 1952).

Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi gerçek bir rüzgar türbininin akabinde hava doğrusallığını kaybeder ve ikinci bir hız komponenti oluşur. Açısal momentumun korunumuna göre türbin kanadının aksi istikamette bir hız vektörü oluşur. Kanatlar, akışın kanada uyguladığı torka reaksiyon olarak dönmektedirler.

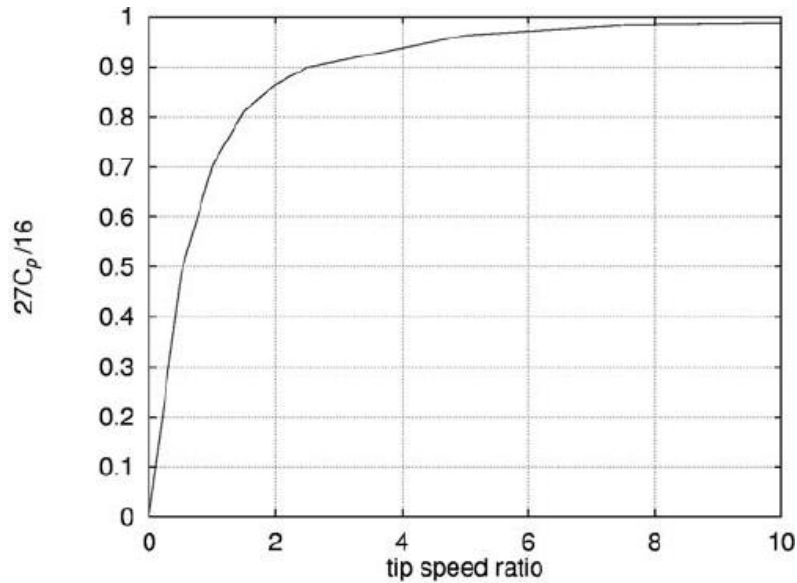


Şekil 2.10 Akış çizgilerinin dönmesi(Manwell,2010)

Bu durumda şu sonuca varılabilir ki rotorun torku arttıkça dönmeden dolayı kaybedilen kinetik enerji de artmaktadır. Başka bir deyişle bir türbinde tork ne kadar artarsa verim de o derece azalmaktadır. Dolayısı ile düşük tork ve yüksek devir sayılı bir türbin rotoru daha verimli olmalıdır ve yüksek tork düşük devir sayısında çalışan bir rotora göre

aerodinamik açıdan daha uygundur. Elbette dendiği gibi bu durum aerodinamik performans yönünden böyle olmakla beraber yüksek devir sayısının getireceği bir çok yapısal sorun vardır. Bu tip bir kanadın yorulma(fatigue) performansı oldukça kötü, dolayısı ile de ömrü kısa olacaktır. Bu konu yine bir optimizasyon problemidir ve tüm parametreler birlikte düşünülerek bir çözüm üretilmelidir.

Aşağıdaki grafikte rotor sonrası havanın dönmesini dikkate alan ideal bir türbinin performans eğrisi verilmiştir. Bu sonuç zaman zaman Alman bilim insanı Schmitz'e atfedilir, ancak Prandtl'ın da benzer çalışması vardır. Uzun hesaplama kısmı burada verilmemektedir. Kısa bir değerlendirme ile görülüyor ki rotor sonrası havanın dönmesinin dikkate alınıp alınmaması varılan sonuçları değiştirmektedir. Oluşan fark küçük TSR(uç hız oranı) değerlerinde büyük iken TSR değeri arttıkça azalmaktadır. $TSR > 8$ için oluşan fark oldukça az olmaktadır. Bu nedenle modern rüzgar türbinleri $TSR = 8$ civarındaki değerlerde çalıştırılmaktadır. Daha büyük TSR oranları beraberinde gürültü sorunu ve daha önce bahsedilen yapısal problemleri getirdiklerinden tercih edilmezler. Burada TSR'nin ne olduğunu kısaca açıklamak gerekliliği doğmuştur. TSR kanadın ucundaki çizgisel hızın gelen rüzgar hızına oranıdır. Yüksek TSR değeri aynı büyüklükteki kanatlarda artan devir sayısı ile, aynı devir sayısında ise büyüyen kanat uzunluğu ile sağlanabilir. Büyük rüzgar türbinlerinin küçüklere kıyasla daha verimli olmalarının bir nedeni de bu husustur.



Şekil 2.11 Bir türbinin verim limiti(Betz,1926)

2.4.3. Pala elemanı momentum teorisi

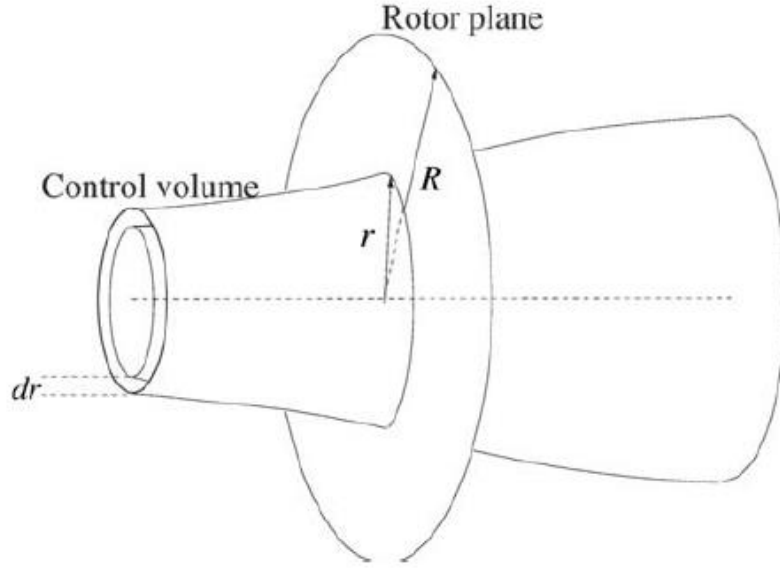
Pala Elemanı Momentum Teorisi ilk olarak 1935 yılında Glauert tarafından geliştirildi. Akabinde farklı bilim insanları ve mühendisler bu teoriye çeşitli katkılar sundular ve farklı halleriyle de olsa bu teori halen avam tasarım maksadıyla kullanılmaktadır.

Bunca zaman sonra bile halen kullanılıyor olmasının temel nedenleri varılan sonuçların doğruluk derecesinin kötü olmaması ile yöntemin oldukça basit ve hızlı olmasıdır. Dolayısıyla bu yöntem rotor-kanat tasarımında bir ilk belirteç olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem sadece yatay eksenli türbinler için geçerlidir.

Daha önce de söylendiği üzere bir rotorun yarattığı hava akımı oldukça kompleks ve 3-boyutludur. Böyle kompleks bir akışı çözmek zor ve zahmetlidir, zaman alıcıdır. Dolayısı ile tasarımı belli bir noktaya getirene kadar yapılması gereken bu 3-boyutlu akışı temsil edebilecek daha düşük dereceli bir yöntem geliştirmektir. Pala Elemanı teorisi de zaten esasen 2-boyutlu olan ancak 3-boyuta ekstrapol edilen bir yöntemdir. Bu ekstrapol edilme durumu beraberinde birçok varsayım getirmekte, bu varsayımların getirdiği doğruluktan sapma sorunu ise düzeltme faktörleri ile elemine edilmeye çalışılmaktadır.

Yöntemin temel felsefesi palanın/kanadın sonlu sayıdaki elemanlara ayrıştırılmasıdır. Bu yapılırken de kanadın geri kalanından izole edilen herbir parçanın diğer kısımlarla etkileşmediği varsayımı yapılır. Şekildeki aktöatör disk her biri “dr” kalınlığında olan halkasal elemanlara bölünür.

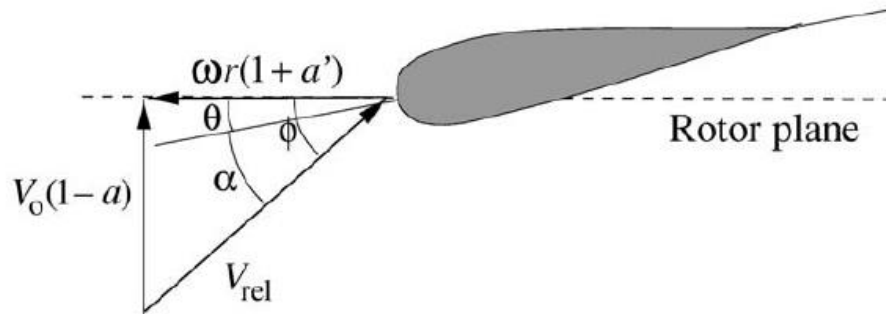
Belirtmeye gerek yoktur ki bu yöntem iteratif bir sayısal yöntem olup sonuçları ancak yaklaşıktır.



Şekil 2.12 Rotor düzlemi

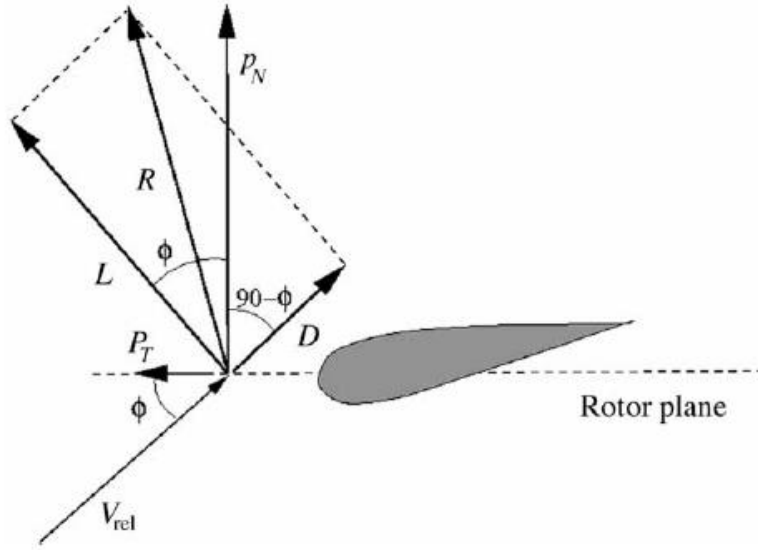
Rotor düzlemindeki hızlar aşağıda gösterilmektedir. Aksiyal indüklemeye faktörü(a), radyal indüklemeye faktörü(a'), lokal eğim açısı(pitch angle) bu çizimde görülen değişkenlerdir. Burada θ lokal eğim açısı olup damla kordu(chord) ile rotor düzleminin arasındaki açıdır ve kanadın o kesitinin lokal kıvrılma(twist) açısı ile kanadın eğim açısının(pitch) toplamına eşittir. Saldırı açısı bu durumda

$$\alpha = \phi - \theta \text{ olmaktadır.} \quad (2.17)$$



Şekil 2.13 Hız üçgeni

Pala Elemanı Metodu bu açılarla beraber yaratılan kuvvet diyagramı ile sonuca ulaşır. Önce Lift ve Drag kuvvetleri bulunur, akabinde bu kuvvetlerden yararlanılarak rotor düzlemine paralel ve dik kuvvetler bulunur.



Şekil 2.14 Kuvvet üçgeni

Temel trigonometri ile;

$$P_N = L \cos \phi + D \sin \phi \quad (2.18)$$

$$P_T = L \sin \phi - D \cos \phi \quad (2.19)$$

Eşitliklerin her iki yanı da $\frac{1}{2} \rho V_{rd}^2 c$ ile bölünürse:

$$C_n = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \quad (2.20)$$

$$C_t = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi \quad (2.21)$$

Böylece lift ve drag katsayıları elde edilmiş olur. Metod “solidity” tanımı ile devam eder. Solidity her bir halka kesitteki kanat alanının toplam kesit alanına oranıdır.

$$\sigma(r) = \frac{c(r)B}{2\pi r} \quad (2.22)$$

Bu arda B kanat sayısıdır. $C(r)$ lokal kordu temsil eder. Formülde de görüldüğü gibi solidity sabit olmayıp kanat boyunca değişir.

Her bir kesitteki kuvvet ve tork aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$dT = B p_N dr \quad (2.23)$$

$$dM = r B p_T dr \quad (2.24)$$

Bazı algebraik manipölasyonlarla

$$dT = \frac{1}{2} \rho B \frac{V_0^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} c C_n dr \quad (2.25)$$

$$dM = \frac{1}{2} \rho B \frac{V_0 (1-a) w r (1+a)}{\sin \phi \cos \phi} c C_t r dr \quad (2.26)$$

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_n} + 1} \quad (2.27)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_t} - 1} \quad (2.28)$$

elde edilir.

Pala Elemanı Metodu için iki önemli düzeltme vardır. Biri Prandtl uç kayıp faktörüdür. Pala Elemanı Metoduna zemin hazırlayan ön kabullerde türbinin sonsuz sayıda kanattan oluştuğu vardı. Ancak gerçekte sonlu sayıda (genelde 3 olmak üzere) kanat vardır. Elbette rotor arkasında oluşan hava akımı ve vortex durumu da iki durum için farklıdır. Dolayısı ile bir düzeltme ile bu soruna bir çözüm üretilmeye çalışılmıştır.

Prandtl indüksiyon faktörleri ile oynayarak aşağıdaki yenilerini elde eder.

$$a = \frac{1}{\frac{4 F \sin^2 \phi}{\sigma C_n} + 1} \quad (2.29)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4F \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_t} - 1} \quad (2.30)$$

$$\text{Burada } F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(e^f) \quad \text{ve} \quad (2.31)$$

$$f = \frac{B}{2} \frac{R-r}{r \sin \phi} \text{ şeklindedir.} \quad (2.32)$$

Glauert düzeltmesi ise başka bir nedendendir. Momentum teorisi aksiyal indüklemeye değeri $a > 0,4$ için geçerli değildir. Ancak iterasyon esnasında bu değer 0,4 değerini aşabilmektedir. Aştığı durumda eğer bir düzeltme yapılmaz ve yöntem kalibre edilmezse, yöntem önkoşullarına uymayan durumlar için sonuç üretir ve bu şekilde sağlıklı veri elde edilemez. Glauert bu sorunu empirik bir bağıntı ile çözümlmeye çalışmıştır.

$$C_T = \begin{cases} 4a(1-a)F & a \leq \frac{1}{3} \\ 4a(1 - \frac{1}{4}(5-3a)a)F & a > \frac{1}{3} \end{cases} \quad (2.33)$$

Burada F Prandtl düzeltme faktörüdür.

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma C_n} + 1} \quad (2.34)$$

$$\text{veya } K = \frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma C_n} \text{ olmak üzere}$$

$$a = \frac{1}{2} \left[2 + K(1 - 2a_c) - \sqrt{(K(1 - 2a_c) + 2)^2 + 4(Ka_c^2 - 1)} \right] \quad (2.35)$$

Bu model(Glauert ve Prandtl düzeltmelerine rağmen) daha sonra Hub(rotor merkezi) kayıplarını da dikkate alacak şekilde revize edilmiştir. Detaylı bilgi NREL basımı AeroDYN Teori manuelinde bulunabilir.

2.5. Neden 3-Kanatlı Tasarım

Şekilde görüldüğü gibi 3 kanatlı bir rüzgar türbini için ideal verim % 49 (Uç Sürrat Oranı=6,5 iken) civarında iken bu değer 2 bıçaklı bir türbin için %47 (Uç Sürrat Oranı=10 iken) ve son olarak da 1 bıçaklı için % 42(Uç Sürrat Oranı=15 iken) olmaktadır.

Bu verim oranları ideal durumu temsil ettiklerinden uygulamada gönül rahatlığı ile 0,9 gibi bir katsayı ile çarpılabilirler. Verim oranları sırası ile %44,1 , %42,3 ve %37,8 olur. Verim oranlarındaki düşüş 3-kanatlı tasarım ile kıyasla 2-kanatlıda % 4,1 ve 1-kanatlıda ise %14,3 olmaktadır.

Rüzgar türbin tarlası maliyetinin yaklaşık olarak % 76'lık bir bölümü direk olarak türbin maliyetidir. (EWEA,2009) Bir türbinin maliyet analizine bakıldığında ise kanat maliyeti türbin maliyetinin % 20'si civarında bir kısmına tekabül etmektedir. (Hau, 1993) Bu durumda 2-kanatlı bir türbin için maliyet % 5,07 civarında daha az olmaktadır. ($0,333 \times 0,2 \times 0,76 = 0,0506$) 1-kanatlı bir türbin için bu oran % 10,13 olur.

Bu durumda 3-kanatlı bir tasarım yerine 2-kanatlı bir tasarım makul görünmektedir. Zira %4,1 lik bir verim kaybı ile maliyet % 5,07 azaltılmaktadır. Aslında detaylı bir maliyet analizi (Net Şimdiki Değer prosedürü gibi) yapılırsa bunun tersi sonuç çıkacaktır. Ancak bu kısma girmeden de durumun görünenden farklı olduğu açıklanabilir.

Şöyle ki bir türbin kanadı esasen statik yükleri yenmek için tasarlanır ancak ömrü yorulma(fatigue) direnciyle sınırlıdır. Kanadın her bir dönme hareketi ömrünü azaltmaktadır. Bu parametre Uç Sürrat Oranı(TSR) üzerinden takip edilebilir. Dolayısı ile bir kanadın diğer koşullar aynı tutulmak kaydı ile USO(TSR) değeri ne kadar fazla ise ömrü de o kadar azdır, denebilir. Bu oranlama dikkate alındığında 3-kanatlı tasarım için 20 yıl olacak olan hizmet ömrü, 2-kanatlı bir tasarımda yalnızca 13 yıl olacaktır.

Bu oranlar tasarımları yeniden fiyatlandırmada kullanılacak olunursa 2-kanatlı tasarım maliyeti gerçekte % 5,07 azalmamakta, aksine eşit süreli bir hizmet ömrü için %0,4 artmaktadır.

3-kanatlı tasarımda kanatların maliyet oranı = $0,76 \times \%20$

$$= \% 15,2$$

1 kanat maliyeti = $(2/3) \times \%15,2$

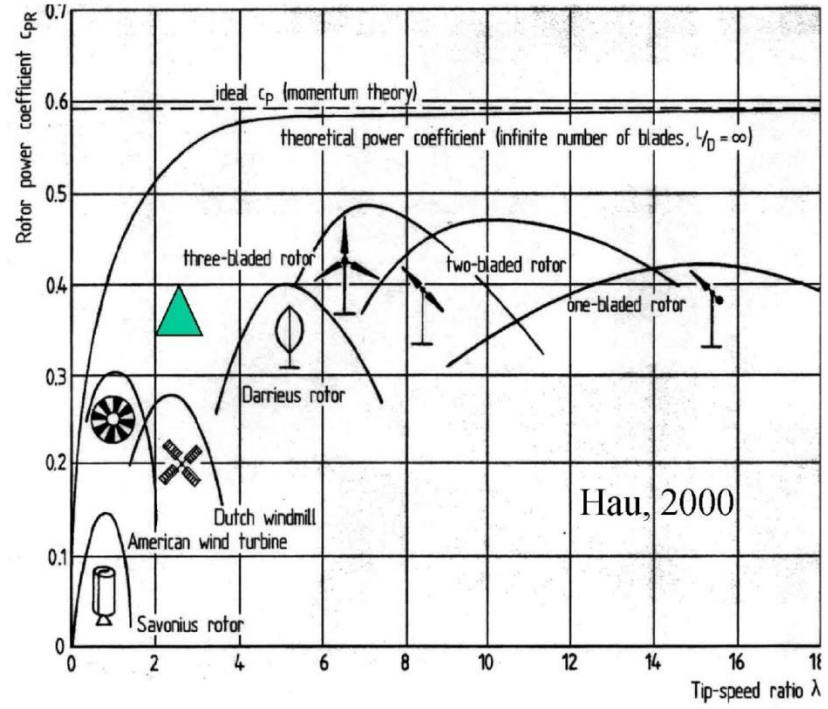
$$= \%10,14$$

Eşit ömür için bu oran (20/13) ile çarpılmalıdır. Bu durumda

$$\%10,14 \times (20/13) = \%15,6$$

$$\%15,6 - \%15,2 = \%0,4$$

Sonuç olarak en ekonomik çözüm 3-kanatlı tasarımdır. Bu tasarım 2-kanatlıya göre hem daha verimli, hem de daha ucuzdur. Piyasada da bu tip uzak ara domine olup 2-kanatlı tasarımlara çok ender, son yıllarda ise hemen hiç rastlanmamaktadır.



Şekil 2.15 Rüzgar türbin teorik performanslarının USO(TSR) ile değişimi(Hau,2000)

Parça	Toplam maliyetteki oranı
Rüzgar türbinleri	68-84
Temeller	1-9
Elektrik montajı	1-9
Şebeke bağlantısı	2-10
Arazi	1-5
Finansal maliyetler	1-5
Yol yapımı	1-5
Danışmanlık	1-5

Çizelge 2.1 Rüzgar türbin tarlası maliyet kalemleri(EWEA,2009)

2.6. Rüzgar Türbinlerinde Kanadın Yapısı

Kanat damlanın özel geometrisi sayesinde oluşan basınç farkının neden olduğu Lift(kaldırma) kuvveti sayesinde döner. Bu kuvvetle beraber bir de Drag(sürükleme) kuvveti kanada etki etmektedir. Bu kuvvet de temelde yine damlanın neden olduğu basınç dağılımından kaynaklanmaktadır. Sürtünme kuvveti de büyük olmamakla beraber kanada etki etmektedir. Bunların dışında kanadın dönmesinden(ivme) ve kütlesinden dolayı kanat üzerinde yükleme vardır.

Bu kuvvetler kanadı bükme momentlere neden olurlar. Bu moment kanadın kökünde maximum, ucunda ise minimum olmaktadır. Daha doğru bir ifade ile kanadın ucunda bükme momenti yoktur. Bu durumda kanadın yapısal olarak kökte daha dayanıklı olması gerekir. Bu doğrultusunda daha kalın bir kesit de gerektirmektedir.

Kanat tasarımında kabul gören uygulama kanadın içinin dolu olmamasıdır. Yani kanat aslında bir kabuktur. Ancak bahsi geçen kuvvetlere dayanabilmesi, aerodinamik şeklini koruyabilmesi için içinde destek yapısı olmalıdır. Bu yapı çeşitli şekillerde olabilir. I-kiriş yada kutu-kiriş en sık rastlanan destek yapılarıdır. Bu noktada kanat neden boşlukludur sorusuna daha net bir cevap vermek gerekebilir. Belirtildiği gibi kanat asıl olarak bükme momentlerine maruz kalmaktadır ve tasarımı asıl yönlendiren yükleme budur. Bükme momenti kanadın bir kanadını esnetip çekme stresine neden olurken diğer yüzünü sıkıştırarak kompresyon gerilmesi yaratır. Ancak neutral-axis üzerinde hiçbir gerilmeye neden olmaz ki bu neutral-axis kanat kesitinde ortalara denk gelmektedir. Bu haliyle gerilme olmayan bir bölgede malzeme bulundurma bir faydası yoktur, aksine getireceği fazla maliyet de zarar olacaktır. Bu nedenle türbin kanatları temelde kabuk yapılar ve destek kirişleri şeklinde tasarlanırlar.

Destek kirişleri iki ana kısımdan oluşurlar: spar cap ve shear web. Spar cap I-kirişteki flanşa denk gelmektedir. Nasıl ki flanş bükme momentine karşı koyar, spar cap de aynı işi görür. Shear web ise bu iki uçtaki flanşları bağlı tutmaktadır. Tüm kirişlerde olduğu gibi türbin kanadında da spar capler mümkün olduğunca ayrı konumlandırılırlar. Türbin kanadının kirişten tek farkı dışındaki aerodinamik kabuktur. Bu kabuk da bir miktar yapısal katkı sunar. Ancak esas bükme gerilimi spar tarafından karşılanır(Gurit, 2012).

Günümüzde orta ve büyük ölçekli rüzgar türbinleri FRP(elyaf takviyeli plastik) ile imal edilirler. Bunun nedeni FRP'nin mukavemet/ağırlık oranının metalden daha iyi olması ve ayrıca kanattaki yüklerin ağırlıkla tek yönlü olmasıdır. Elyaf yönü bu yöne göre ayarlandığında daha az malzeme ve ağırlıkla aynı gerilmeler karşılanmış olur.

Kanat parça parça değerlendirildiğinde spar, web, ve kabuk ayrı değerlendirilmesi gerekir. Çünkü bunlar farklı yüklemelere maruz kaldıklarından lamina tasarımları da farklılık gösterir. Spar kanat boyunca uzanan elyaf ile üretilirse çekme ve kompresyon yüklerine en iyi bir biçimde dayanır. Buna karşın web tek-yönlüden ziyade iki-yönlü elyaf ile takviyelendirilmelidir. 45^0 'lık simetrik elyaf yönleri en iyi sonucu verecektir. Çünkü bükme yüklemesinde web hem çekme hem kompresyona maruz kalacaktır. Spar'daki gibi kanadın açısal konumuna göre ya çekme ya kompresyon yükü değil de her ikisi birden oluşacaktır. Dolayısı ile diogonal bir yapının oluşturulması gerekir ki bu 45^0 'lık elyaf yönleriyle sağlanabilir. Kabuk da yine torsiyon ve burulmaya karşı temelde 45^0 'lık elyaf takviyeli kompozit ile üretilir.

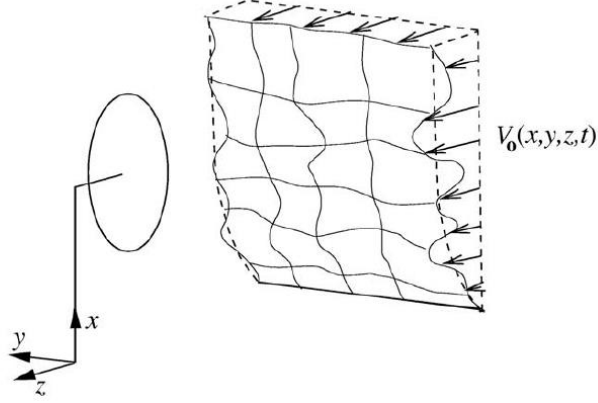
Bütün bu yapısal tasarım elbette kanat üzerindeki kuvvetler ile ilişkili iken kuvvetler de aerodinamik tasarımıyla bağıntılıdır. Örneğin daha ince damlalar daha yüksek verim sağlarlar. Ancak bunu daha büyük kuvvetler sayesinde yaparlar ve tam da bu nedenle bu daha büyük kuvvetlere karşı koyacak yapısal tasarımda daha kalın spar ve webe gereksinim vardır. Öye yandan daha ince kanat daha kısa web de demektir. Bu manada tüm bu değişkenler bir arada düşünülerek bir sonuca varılmalıdır.

Bu değerlendirmede bir diğer önemli konu ise yapının yorulma direncidir. Kanat hareketli bir yapıdır ve aynı zamanda stabil olmayan bir ortamda çalışmaktadır. Bu nokta üzerinde durulmayı hak etmektedir. Bir rüzgar türbininin çalışma koşulları nelerdir?

2.6.1 Rüzgar türbin kanadına etkiyen yükler

Bir rüzgar türbin kanadına etkiyen belli başlı yükler(kuvvet veya moment) başta aerodinamik olmak üzere atalet ve yer çekimsel olanlardır. Bunlara bu yüklerin belli koşullar altında doğurabileceği titreşimsel ve rezonans yükleri de dahil edilebilir. Bir

kanada etkiyen yükler farklı tiptedirler ve statik olabilecekleri gibi, periyodik, geçici(transient) veya stokastik de olabilirler.



Şekil 2.16 Türbine gelen rüzgar profili

Aerodinamik yük rüzgarın türbini geçerken kanat üzerinde oluşturduğu kuvvetlerdir. Bu kuvvet zamana ve konuma göre değişkendir. Öncelikle rüzgar her zaman içinde az ya da çok türbülans barındırır. Yani rüzgarın hızı sürekli değişkendir. Bu nedenle en fazla ortalama rüzgar hızından bahsedilebilir, rüzgar hızından değil. Bu rüzgar hızındaki dalgalanma sadece zamana değil rotot alanındaki konuma göre de değişir. Bu nedenle gerçek bir rüzgar türbininde statik bir aerodinamik kuvvetten bahsetmek mümkün değildir. Ancak türbülanslı bir akışın getireceği hesap zorluğu ve aynı zamanda nihai sonuçlara olan etkisinin pek de büyük olmaması nedeniyle genelde bu kuvvet statik olarak değerlendirilir. Dikkat edilirse paragrafta başlanırken “rüzgarın türbini geçerken kanat üzerinde bıraktığı” denildi. Yani kanada etkiyen aerodinamik yük sadece kanada bağlı değildir, aynı zamanda türbinin kulesi de bu yüklemeye etki sahibidir. Kanat kule hizasından geçerken impulsive bir etkiye maruz kalarak ekstradan yüklenir. Bu etki rotoru kulenin arkasında olan türbinler için daha büyük olur. Bu transient yük aynı zamanda periyodiktir de ve kanadın kule hizasından her geçişinde yeniden oluşur. Aerodinamik yüke rüzgar kesmesi(wind shear) de eklenmelidir. Rüzgar yer hizasında “0” hızında esmekte iken yükseğe çıkıldıkça hızı artmaktadır. Bu nedenle bir rüzgar türbin kanadı rüzgar türbülansının hiç olmadığı, kulenin de ihmal edilecek kadar ince olduğu bir ortamda bile yine statik yüklemeye maruz kalmayacaktır. Çünkü

kanadın üzerindeki bir nokta kanat dönerken sürekli farklı hızdaki rüzgara maruz kalacaktır. Ancak belirtmek gerekir ki modern rüzgar türbinlerinde kule oldukça yüksek olduğundan bu etki ihmal edilebilir durumdadır.

Atalet kuvvetleri de kanat tasarımında muhakkak dikkate alınırlar. Kanat zaten dönen bir yapı olduğundan bir merkezkaç kuvvet oluşur. Bu kuvvet devir sayısının karesi ile orantılı olarak artar. Bu nedenle yüksek devirde dönen kanatlarda özellikle önem kazanır. Ayrıca rotorun devir sayısı artarken veya azalırken oluşan ivmelenme de yine atalet kuvveti yaratır. Bu nedenle rotorun kontrol sisteminin ani devir sayısı değişikliğine izin vermeyecek biçimde tasarlanması önemlidir.

Diğer bir önemli yük de kanadın kendi ağırlığıdır. Esasen bu yük statik olsa idi bu denli önemli olmayabilirdi. Fakat ne yazık ki kanat dönerken kanadın özellikle kökünde yarılma yükü yaratır. Bu da kanat tasarımını temelinden değiştiren bir durumdur. Birçok tasarımcı yorulma yükü nedeniyle kanat üzerinde oluşan gerilmenin, ilgili yerdeki muhavemet değerinin oldukça altında kalmasına dikkat eder.

2.6.2. Kompozit Malzemeler

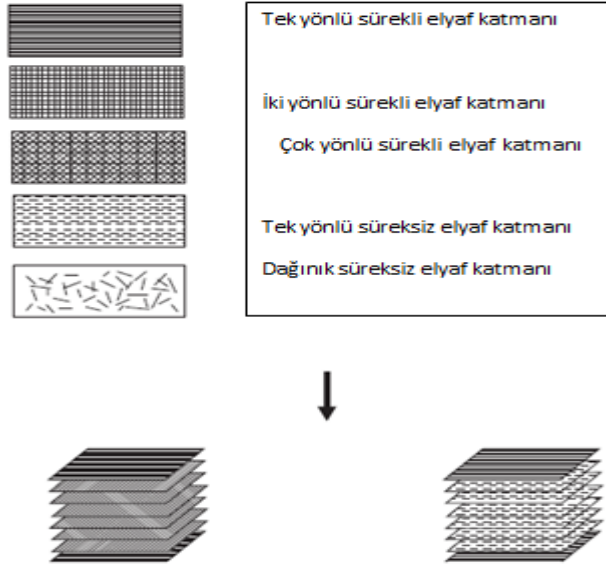
Elyaf takviyeli kompozit malzemeler temelde iki farklı malzemedan oluşur. Bunlardan yüksek muhavemet değerine sahip olan elyaf, matriks diye tarif edilen dolgu malzemesine gömülür. Bu haliyle oluşan malzeme kendi bileşenlerinden, yani elyaf ve matriksten farklı fiziksel özelliklere sahiptir. Ana hatlarıyla, elyaf malzeme yük taşıyıcı iken matris yükün elyaflar arasında transfer edilmesini sağlar, elyafı doğru oryantasyonda sabitler, nem gibi dış etmenlerden korur. Birçok farklı elyaf takviyeli malzeme farklı amaçlar ve endüstrilerde kullanılmaktadır. Ancak rüzgar türbin kanadı için E-Cam ya da karbon elyafı en sık rastlanan malzemedirler. Epoksi ve çeşitli plastikler ise matriks olarak kullanım alanı bulmaktadırlar. Kompozit malzemeler herbiri lamina(tabaka) denilen ince elyaf-takviyeli kompozit katmanlarının istenilen oryantasyon ve sayıda üst üste dizilmesiyle elde edilir, ve bu toplama laminate denir. Elyaf, matriks, sayı,kalınlık ve oryantasyon değerleri ile oynanarak istenilen fonksiyonu yerine getirebilecek en hafif, dayanıklı ve ucuz kompozit elde edilir.

Kompozit malzemeler özellikle 1970li yıllardan itibaren havacılık ve uzay alanlarında yaygın kullanım alanı bulmaya başlamışlardır. Geliştirilme amaçları da aynı mukavemet değerlerine daha hafif yapılarla ulaşma gerekliliğidir ki bu olgu havacılık alanında çok önemlidir. Zaman içinde otomotivden inşaata farkı alanlarda hayat bulan kompozit teknolojisinde anahtar nokta kompozit malzemenin hafif olmasıdır. Mukavemet değeri son derece yüksek olan çelik bu mukavemeti tüm yükleme doğrultularında göstermektedir ve son derece yüksek bir yoğunluk değeri vardır. Ancak bir yapıda kuvvetler çoğunlukla her yönden eşit olmazlar. Dolayısı ile kullanılan malzemenin mukavemet değerinin her yönde yüksek olmasına gerek yoktur. Çelik gibi malzemeler izotropiktirler ve bir çok doğrultuda mukavemet değerleri gerekli olanın çok üstündedir. Bir kompozit malzeme ise tasarlayanın gereksinimleri doğrultusunda ortotropik olabilir ve sadece gerekli olan yönlerde yüksek mukavim olurken diğer yönlerde zayıf olabilir. Elyafın doğrultusunda kompozit yüksek mukavimken, bu doğrultuya dik yönde oldukça zayıftır. Ancak kullanım yerine göre sadece bir yönde yüksek dayanım gerekli ise bu bir sorun değildir.

Bir örnekle; AISI4340 çeliği $7,87 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluğuna sahip iken çekme mukavemeti 1722 MPa 'dır(Bai, 2013) . Bu mukavemet değeri (elyaf yönünde) E-Cam takviyeli epoksi için 965 MPa olmaktadır (Mallick, 2008). Ancak bu kompozitin yoğunluğu sadece $1,85 \text{ gr/cm}^3$ 'tür. Dolayısı ile mukavemet/ağırlık mukayesesi yapılacak olursa kompozit malzeme çelikten yaklaşık 2,5 kat daha hafif olarak aynı dayanımı sağlayabilmektedir. Kritik nokta şudur: Çelik her yönde aynı dayanımı gösterirken kompozit sadece elyaf yönünde yani sınırlı bir yönde bu dayanıma haizdir. Tam da bu nedenle kompozit kullanımı yüksek dikkat ve uzmanlık gerektiren bir konudur.

Doğru kompozit malzemeye varmak için öncelikle uygulamada karşılaşılabilecek olan yüklemenin tipi(aksiyal, bükme, torsiyon...) ve modu(statik, değişken...) bilinmelidir. Daha sonra bu malzemedan üretilecek yapının servis ömrü, parçanın diğer parçalarla etkileşimi, atmosfer koşulları gibi değişkenler de göz önünde bulundurularak en ekonomik çözüme ulaşılmalıdır. Rüzgar türbin kanadı imalatı da bu prosedürden azade değildir.

Kompozit Malzeme Elde Etme Şematiği



Şekil 2.17 Kompozit malzeme sınıflandırması

Bir kompozit malzemede temel olarak elyaf ve matris malzeme bulunur. Bunlara ek olarak yapıştırıcı, ıslatıcı vs. de olabilir. Elyaf malzeme bir kompozitin temel mekanik özelliklerinde en önemli belirleyendir. Seçim esnasında yoğunluk, çekme ve sıkıştırma mukavemeti ve E(modulus) değerleri, yorulma ve creep(sürünme) davranışı ile fiyatı göz önünde bulundurulmalıdır.

Tüm bu kriterler bir arada düşünüldüğünde rüzgar türbin imalatçıları E-Cam elyafını kullanmaktadırlar. Çok büyük kanatlar için, kanadın belli yerlerinde karbon elyafı da kullanılmakla beraber bu istisnai bir durumdur. Aslında cam elyafı sadece türbin kanadı imalatında değil, genel olarak da en çok kullanılan elyaf türüdür. Cam elyafını bu denli popüler yapan en önemli yönleri ucuzluğunun yanında yüksek çekme mukavemeti ile mükemmel kimyasal direncidir. Fakat bu olumlu özelliklerinin yanında görece yüksek yoğunluğa ve düşük elatisite modülü nedeniyle kimi yerlerde kullanılamamaktadır. Ayrıca yorulma direnci de karbon elyafa nazaran zayıftır.

Matris materyaller de çeşitlilik göstermekle beraber temelde aynı fonksiyonları yerine getirirler. Bunların başında elyafı istenilen şekilde yerinde tutmak, kuvveti elyaflar arası dağıtmak ile elyafı dış etkilere ve darbelere karşı korumak gelmektedir. Matris yapısal olarak çekmede değil ama kompresyon yükü altında önemli bir işleve sahiptir. Elyafın kompresyon altında burkulmasına(buckling) mani olacak şekilde elyafı yatay olarak destekler. Bu sayede kompozitin kompresyon mukavemeti üzerinde büyük etkiye sahiptir. Ayrıca bir türbin kanadında olduğu gibi eğer büyük miktarda bükme(bending moment) yükleri varsa laminalar-arası mukavemet özel bir önem kazanır. Rüzgar türbin imalatında geleneksel olarak en çok termoset plastikler kullanılmaktadır (Gurit, 2012).

2.6.3 Kompozitlerin mekaniği

Bu tez çalışmasında kompozit malzeme ile bir türbin kanadı tasarımı yapılmıştır. Bu nedenle izotropik malzemeden daha farklı bir mekaniği olan kompozitlerin mekaniği üzerinde durulması gerekmektedir. Bu konu çok geniş ve farklı yaklaşımları barındıran bir alandır. Bu kısımda amaç temel kompozit mekaniğinin ana konularına vakıf olmaktır. Aşağıda tek-yönü sürekli elyaf ile üretilen bir katmanın çekme mukavemetinin hesaplama yöntemi açıklanmıştır. Yapılan ön kabuller şu şekildedir: elyaf matris içinde düzgün dağılmıştır ve matrise tam olarak yapışmıştır. Tüm elyaf yünleri özdeştir. Matris içerisinde boşluk yoktur. Uygulanan kuvvet elyaf yönünde veya bu yöne diktir. Malzemede ön gerilme yoktur. Elyaf ve matris lineer elastik sınırları içinde kalmaktadır.

Bu kabuller yapıldıktan sonra kompozite boylamasına bir kuvvet uygulandığı varsayılın. Matris ve elyaf mükemmel bağlı olduklarından aynı miktarda deformasyona uğrarlar.

$$\epsilon_{elyaf} = \epsilon_{matris} = \epsilon_{kompozit} \quad (2.36)$$

Bu halde elastik sınır dahilinde olduğu varsayılan kompozitte iki ayrı gerilme değeri oluşur.

$$\Sigma_{\text{elyaf}} = E_{\text{elyaf}} \varepsilon_{\text{elyaf}} = E_{\text{elyaf}} \varepsilon_{\text{kompozit}} \quad (2.37)$$

$$\sigma_{\text{matris}} = E_{\text{matris}} \varepsilon_{\text{matris}} = E_{\text{matris}} \varepsilon_{\text{kompozit}} \quad (2.38)$$

Kompozite uygulanan kuvvet elyaf ve matris tarafından belli oranlarda karşılanır. Elbette not edilmelidir ki elyafın elastiklik modülüsü matristen yüksek olduğu için gerilme her zaman elyafıta daha fazladır.

P, uygulanan kuvveti belirtmek üzere

$$P_{\text{kompozit}} = P_{\text{elyaf}} + P_{\text{matris}} \text{ olur.} \quad (2.39)$$

Kuvvet gerilme ile alanın çarpımına eşit olduğuna göre;

$$\sigma_{\text{kompozit}} A_{\text{kompozit}} = \sigma_{\text{elyaf}} A_{\text{elyaf}} + \sigma_{\text{matris}} A_{\text{matris}} \quad (2.40)$$

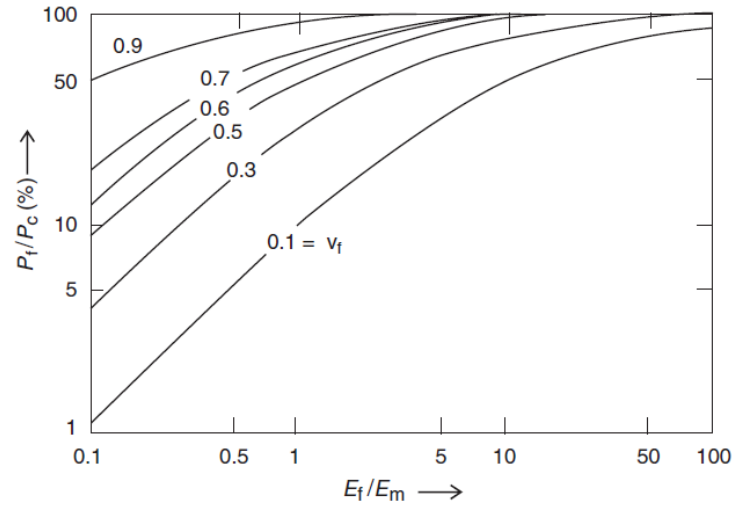
Buradan

$$\sigma_{\text{kompozit}} = (\sigma_{\text{elyaf}} A_{\text{elyaf}}) / A_{\text{komp}} + (\sigma_{\text{matris}} A_{\text{matris}}) / A_{\text{comp}} \quad (2.41)$$

sonucuna varılır.Çeşitli manipölasyonlarla kompozitin uygulanan yük doğrultusundaki elastisite modulusunun

$$E = E_{\text{matris}} + v_{\text{elyaf}}(E_{\text{elyaf}} - E_{\text{matris}}) \text{ olduğu görülür.} \quad (2.42)$$

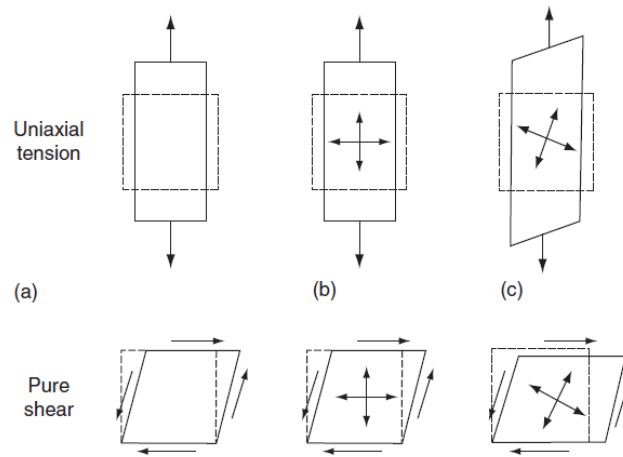
Burada v_{elyaf} elyafın kompozit içindeki hacimsel oranıdır. Elyaf ve matrisin karışım oranlarına ve ayrıca seçilen bu iki malzemenin modulus oranlarına göre kompozitin dayandığı kuvvetin ne kadarının elyaf ne kadarının matris tarafından çekildiği aşağıdaki çizelgede görülebilir. Anlaşılacağı üzere elyafın elastisite modülüsü(E_{elyaf}) matrisinkinden(E_{matris}) ne kadar büyükse ve elyaf hacmi toplam hacimde ne kadar fazla ise elyafın yük taşıma oranı da o denli fazlalaşmaktadır. Buna karışım kuralı da denmektedir.



Şekil 2.18 Karışım kuralı(Mallick, 2008)

2.6.4 Malzemelerde yük altında oluşan bağlantılar(coupling)

Herhangi bir malzeme belli yönde kuvvete maruz kalırsa deformasyon sadece o yönde olmaz. Farklı yönlerde de bozulma olur. Poisson teoremi bu konuyu açıklar. Ancak malzemenin isotropik, özel ortotropik veya anizotropik olması durumlarında yükün yönüne de bağlı olarak farklı deformasyonlar oluşur.



Şekil 2.19 Uzama-kesme eşleşmesi(Mallick, 2008)

Arzu edilen durum şekilde a(izotropik) ve b(ortotropik) şıklarında görülmüştür. Son durum olan c(anizotropik) şıkında uzama-kesme bağlantısının var olduğu

görülmektedir. Kompozit malzeme özel orthotropik malzemedir ve b şıkında olduğu gibi deforme olması ancak özel tasarımına bağıdır. Uzama-kesme bağıntısı(extension-shear), uzama-bükölme(extension-bending) bağıntısı ve bükölme-dönme(bending-twisting) bağıntıları malzemeyi etkilerler. Laminasyon simetrik katmanlar ile yapılırsa uzama-bükölme bağıntısı da oluşmaz. Bu nedenle kanat tasarımında laminasyon bu şekilde hazırlanmalıdır. Aksi takdirde birçok farklı faktör tasarımı etkileyecektir ve problem zorluğu artacaktır. Malzemenin çarpılması normal şartlarda olumsuz bir durumdur. Çok özel gereklilikler dışında kaçınılan bu durum türbin kanadında da istenmez.

2.7. Yorulma(Fatigue)

Yapıların statik yük altındaki dayanımları ile tekrarlanan yüklere karşı dayanımları aynı değildir. Bu olgu rüzgar türbin kanadı gibi tekrarlanan yüklere(kanadın kendi ağırlığı en önemli yüküdür bu yönden) maruz kalan yapılarda bir tasarım unsurudur. Metaller yorulma direnci genelde zayıf olan malzemelerdir. Ancak elyaf takviyeli yapılarda da bu durum ile az yada çok karşılaşmaktadır.

Küçük türbinlerde devir sayısı daha fazla olduğundan kompozit malzemeye kıyasla bu yönden daha iyi olan tahta kullanımı yaygındır. Bu tez çalışmasında konu edilen türbin normal şartlar altında tahtadan imal edilmelidir. Ancak tezin büyük ölçekli türbin tasarımı parametrelerine göre çalışmak gibi amacı olduğundan bu kusur bilinmesine rağmen tahta ile değil kompozit tasarım ile bir çalışma yapılmıştır. Türbin boyutunun küçük tutulma nedeni ise tamamen ihtiyaç duyulan CPU gücünü aza indirmektir.

Bu çalışmada yorulma sorunu Germanisher Lloyds tasarım kurallarına göre güvenlik katsayısının yüksek alınması ile çözümlenmiştir. Bu sayede S-N eğrisinde görece iyi bir yerde durulmuş olunacaktır.

2.8. Sertlik(Stiffness)

Bir rüzgar türbin kanadında tasarımın mukavemeti kadar önemli bir konu da sertlik(stiffness)dır. Kanat özel bir aerodinamik şekle haizdir ve ancak bu şeklini

koruyarak istenilen görevi yerine getirebilecektir. Dolayısı ile kanadın kırılmaması kadar geometrisinin aşırı derecede bozulmaması da önemlidir. Böylesi bir durum ancak stiff bir yapı elde edilerek önlenabilir. Örneğin bir an için kanadın kırılmadan geriye doğru esnediği ve dönme esnasında kuleye değdiği düşünölsün. Bu durumda sonuç kanadın kırılmasından pek de farklı olmayacaktır. Dolayısı ile kanat tasarımında stiffness da önemlidir. Tasarım kurallarına göre kanadın ucu en kötü esneme senaryosunda dahi rüzgarsız bir anda kuleye olan mesafesinin %30'undan az olmamalıdır.

Böyle bir tasarıma ancak daha yüksek E değeriine sahip malzemeler kullanılarak varılabilir. Kule rotor mesafesinin fazla uzatılması kule üstünde daha dengesiz bir yükleme oluşturacağından doğru bir çözüm değildir.

2.9. Kirişler

Bir rüzgar türbin kanadını ankastre(cantilevered) kiriş olarak düşünmek yanlış olmaz. Bu nedenle bu kısımda konuyla ilgili bir kısım ayrılmıştır.

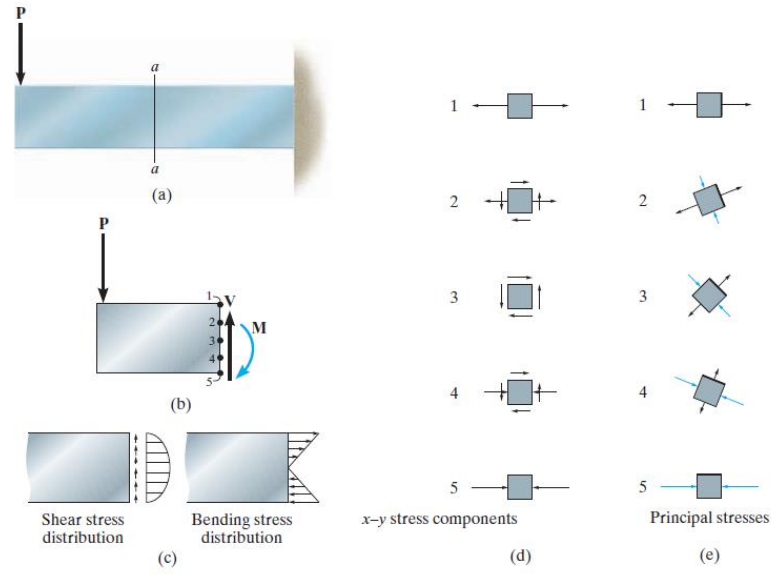
Kirişler genelde Euler-Bernolli veya Timoschenko modellerine göre çözöürler. Bu modellerin ön kabulleri farklıdır, dolayısı ile farklı formölasyonlara sahiptirler. Bunun doğal sonucu olarak da aynı problem için farklı sonuçlar verirler. Timoschenko kirişteki kayma ve dönmenin oluşturduğu eylemsizlik momenti faktörlerinin Euler-Bernoulli teorisine eklenmiş, dolayısıyla bir bakıma daha geliştirilmişidir. Ancak bu durum daha ziyade kısa/kalın kirişlerde önemli rol oynamaktadır. Bir rüzgar türbin kanadı ise ince/uzun, narin(slender) bir yapıdır. Dolayısı ile bu tezde Euler-Bernolli modelinin kullanılması ancak çok küçük sapmalar yaratacağından uygundur.

Tez çalışmasında yapısal tasarımın ilk adımı olarak kullanılan Co-Blade yazılımı kanat uç sehimini hesaplarırken Euler-Bernolli modelini kullandığından bu model bir miktar daha açıklamayı hak etmektedir. Elbette burada mevcut kanat için matematiksel bir model kurulup çözölmeyecektir. Zira bu başlı başına başka bir tez konusudur. Burada konu olan kanat 3-boyutlu oldukça kompleks bir şekle sahiptir. Buna ek olarak kanat isotropik malzemeden değil, orthotropik kompozit malzemeden yapılmıştır. Yine son olarak kanat üzerindeki yük son derece kompleks 3-boyutlu bir basınç dağılımına ek olarak kanadın ağırlığı ve dönmesinden dolayı oluşan kuvvettir. Dolayısı ile tasarlanan

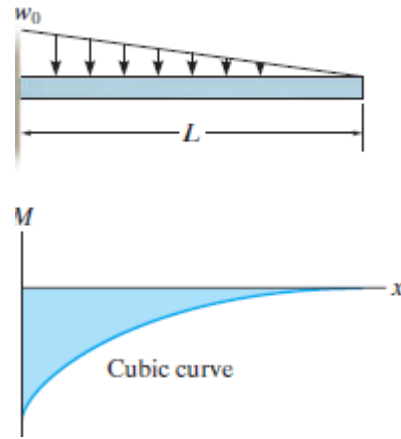
kanadın bu tezde oluşturulacak matematiksel bir modelle analitik çözümü mümkün değildir. Bu nedenle yapısal çözümleme bilgisayar programları ile yapılmıştır. Bu programlardan Co-Blade yük olarak basınç dağılımını değil de Pala Elemanı Teorisinden gelen kanadın belli kesitlerindeki noktasal yükleri almaktadır. Bu nedenle bir ilk basamak aracı olarak kullanılmış olup asıl son çözümleme dünyada kabul gören bir sonlu eleman sayısal çözücü olan ANSYS Mechanical yazılımı ile yapılmıştır.

Bu kısımdaki amaç sonuç elde etmekten ziyade kanadın yapısının ana hatlarının neden bu şekilde tasarlandıklarını açıklamak olacaktır. Örneğin kanat iskeletini oluşturan I-kiriş neden uçta ince iken köke doğru kalınlaşmaktadır, gibi.

Bir kiriş iki açıdan gerilmeye dayanmalıdır; kesme(shear) ve bükme(bending). Kesme gerilmesi kirişe dikey olarak uygulanan yük nedeniyle oluşur ve kesit içinde paraboliktir, bükme gerilmesi ise bu dikey yükün yarattığı moment kaynaklıdır ve kesit içinde lineerdir. Başka bir deyişle kesitte numaralı noktalardan 1 ve 5 üzerinde sadece maximum normal gerilme varken 3 numaralı bölgede sadece maksimum kesme gerilmesi vardır. Diğer noktalarda bu iki gerilme de mevcuttur. Ancak bu bileşenler bazı formülasyonlar veya Mohr çemberi vasıtası ile asal(principal) gerilmelere dönüştürülebilirler. Kanat üstündeki yük kanadın ucundan en geniş kesitindeki noktaya kadar uçtan itibaren artan kabul edilebilir. Bu durumda kanat üstündeki moment şeklindeki gibi kübik bir eğriye tekabül edecektir. Bu nedenle kritik yük bükme gerilmesidir. Bu gerilme uçtan köke doğru üstel olarak artacağından kanat için kritik kesit köktür. Ancak kökteki gerilmeyi karşılayacak malzeme oldukça fazla olacaktır ve kanat tamamen bu şekilde üretilecek olursa aşırı ağır, pahalı ve verimsiz olacaktır. Bu nedenle “tam gerilmeli kiriş” olarak tasarlanır. Bundan kasıt her kesitte o kesitte ihtiyaç duyulan dayanımı sağlayacak kadar malzeme olmasıdır, fazlası değil. Yani malzemeden tam olarak istifade edilmiş olunacak ve tam kapasitesinde kullanım olacaktır. Bu da ancak sabit değil değişken kesit ve malzeme ile mümkündür. Bu çalışmada elde edilen kanat yapısı bir çok deneme yanılma sonucunda elde edilmiştir ve amaç malzemenin gerektiği yerde gerektiği kadar kullanılmasıdır.

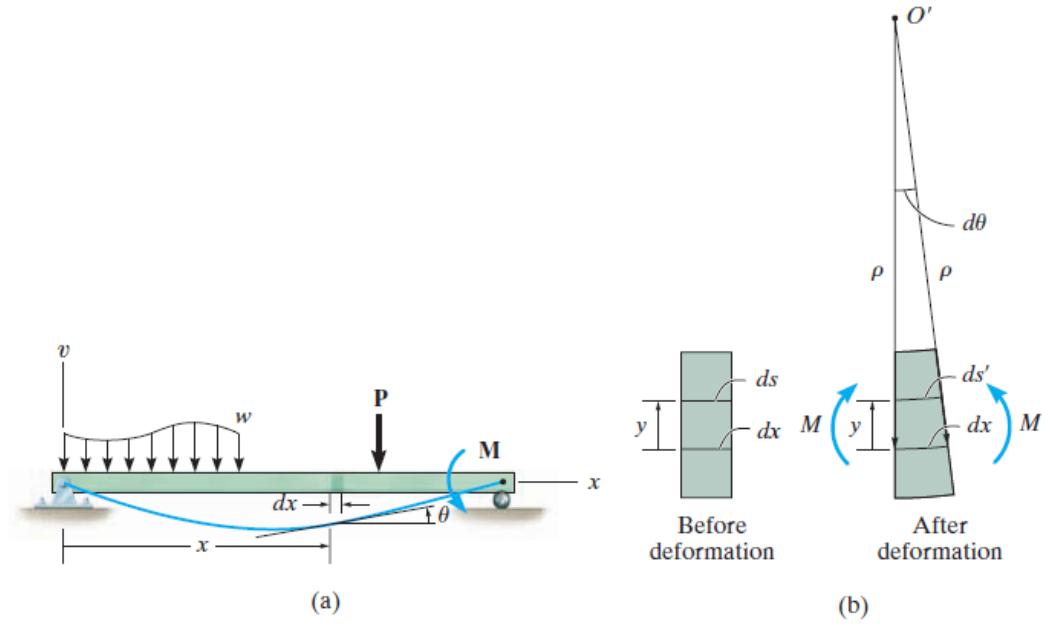


Şekil 2.19 a) Temsili bir ankastre kiriş, **b)** kesit yükleri, **c)** gerilmeler, **d)** gerilmelerin x-y komponentleri ve **e)** asal gerilmeler (Hibbeler, 2011)



Şekil 2.20 Türbin kanadının temsili hali, yük dağılımı ve moment yük dağılımı

Bir kirişin uzun eksenini boyunca her bir kesitindeki geometrik merkezden (centroid) geçen deformasyon eğrisine elastik eğri denir. Bu eğri kirişteki kesme kuvveti ve bükme momentinden dolayı oluşur yüklemenin olmadığı halden başka bir hal alır. Ancak daha önce de bahsedildiği gibi uzun narin yapılarda bu iki etkiden kesme kuvveti ihmal edilebilir. Bu sayede aşağıdaki formülasyonu geliştirmek mümkündür.



Şekil2.21 Yük altında temsili bir kirişin **a)** elastik eğrisi(mavi renk)
b) kesit deformasyonu(Hibbeler, 2011)

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2v/dx^2}{[1 + (dv/dx)^2]^{3/2}}$$

ifadesi elastik eğrinin matematiksel olarak ifadesidir.

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{\sigma}{Ey}$$

Hook kanunu gereği elastik eğri aşağıdaki şekle gelir.

$$\frac{d^2v/dx^2}{[1 + (dv/dx)^2]^{3/2}} = \frac{M}{EI}$$

burada eğrinin eğimi olan (dv/dx) ihmal edilirse eşitlik büyük oranda sadeleşmektedir ve

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{EI}$$

elde edilir. Manipülasyonla

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2v}{dx^2} \right) = w(x)$$

$V = Dm/dx$ ve $w(x) = Dv/dx$ olmak üzere son hale ulaşılır.

Akabinde sınır şartları uygulanarak eğimler, deformasyonlar ve gerilmeler bulunur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu kısımda kullanılan materyal ve yöntem ile ilgili konular açıklanacaktır. Öncelikle tasarım sırasında yararlanılan bilgisayar yazılımları kısaca açıklanacak, akabinde aerodinamik tasarım aşamaları açıklanacak ve elde edilen kanat geometrisine ait veri sunulacaktır.

3.1. Bilgisayar Programları

Qblade programı ücretsiz lisansı olan bir program olup rüzgar türbin analizlerinde kullanılmaktadır. Program Pala Elemanı Momentum Teorisine dayanmakta olup zaman içinde farklı algoritmalar ile zenginleşmiştir. Dolayısı ile program bu haliyle birçok kayıp faktörünü de dikkate alabilmekte ve sonuçları da bu oranda gerçeğe yaklaşmaktadır.

Bu yazılım ilk olara Berlin Teknik Üniversitesinde başını Prof. Dr. Christian Oliver Paschereit'in çektiği bir rüzgar enerjisi araştırma grubu tarafından oluşturuldu. Program, Deneysel Akışkanlar Mekaniği laboratuvarında hazırlanırken temel amaç bir türbin hesap yazılımı yaratmaktı. Bu yazılımın içinde entegre olan ve yazılımın en önemli kısmını teşkil eden XFOIL ise MIT(Massachusetts Institute of Technology)'den Mark Drela tarafından geliştirilmiştir. XFOIL bir damla hesap programı olup birçok yazılıma ve deneye karşı başarısı gösterilmiştir (Anonim, 2013e).

Kısacası Qblade içerisinde entegre başka bir yazılım olan, ki bu entegre yazılım damla hesaplarını yapıp polar bilgisini oluşturmaktadır, bir pala elemanı momentum teorisi hesaplayıcısıdır. Sırası ile damla bilgisi ile bir polar oluşturulur, bu polar 360 dereceye extrapolate edilir, damlalardan bir kanat tasarlanır ve rotor performansı değişik rüzgar hızları için hesaplanır.

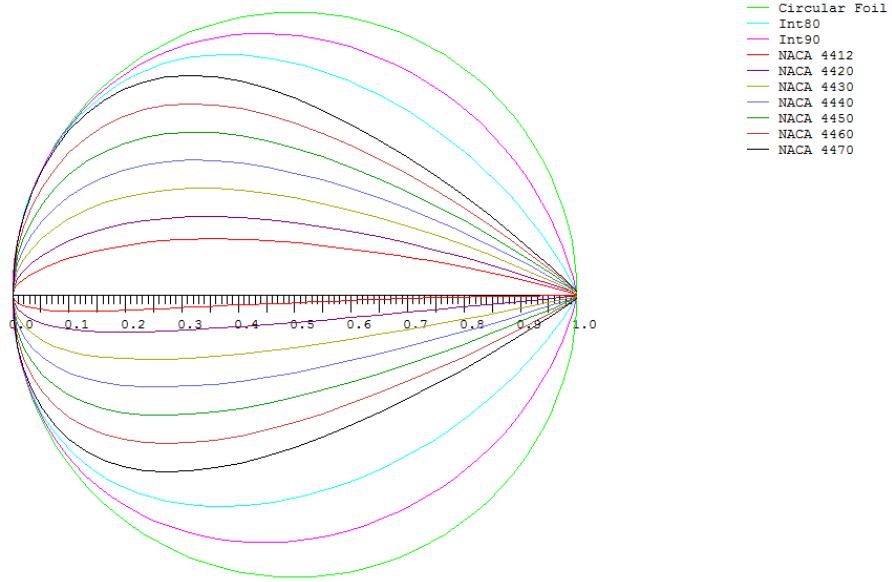
ANSYS çok gelişkin bir nümerik çözümleyicidir. İçinde 3 boyutlu tasarım yapmak, ağ elemanları ile sonlu elemanlar sistemi yaratmak, yükleri, malzeme bilgisini tanıtmak ve nihayet çözüme ulaşmak mümkün olabilmektedir.

ANSYS bir çok sektör için bir çok farklı yazılım sahibi bir sistemdir. Bu tez çalışmasında ANSYS'in akışkanlar mekaniği çözücüsü CFX ile yapısal çözücüsü ANSYS Mechanical'dan yararlanılmıştır.

3.2. Aerodinamik Tasarım Aşamaları

Kanat tasarımı önce 2D analizlerin yapıldığı Qblade programında yapıldı. Farklı NACA profilleri arasında optimum saldırı açısı altında L/D oranı diğerlerine nazaran daha yüksek olan görece ince bir profil olan 4412 seçildi. Akabinde bu profilin farklı akış koşullarında oluşturduğu kuvvetler incelendi. Qblade içinde alt program olarak entegre edilmiş XFOIL programı vasıtası ile $(-5,+20)$ derecelik saldırı açıları aralığında polar bilgisi elde edildi. Ancak Kanat Elemanı Momentum algoritmasında bu aralık dışında kalan açı değerleri için de C_l ve C_d bilinmelidir. Bu nedenle elde edilen polar extrapolasyon yöntemi ile $(-180,+180)$ aralığına genişletildi. Bu esnada karşılaştırmalı olarak Montgomerie ve Viterna teknikleri kullanıldı. Montgomerie üstünde karar kılındı ve tasarıma bu şekilde devam edildi. Akabinde Qblade programın kanat tasarım alt modülünde seçilen NACA profiline ait tam polar datasından yararlanılarak uygun chord uzunluğu ve lokal twist açıları araştırıldı. Yapılan birçok denemenin ardından bir ön tasarım oluşturuldu. Kanat uzunluğu 2 metre olarak belirlenmek zorunda kalındı. Aksi takdirde elde olan CPU gücü ile yapılacak olan CFX analizlerinin her birinin haftalarca sürmesi gerekecekti. Kanat 7,25 m/s rüzgar hızı için optimize edildi ve kanat geometri datası txt formatında dışa aktarıldı. Bu nokta bulutu CATIA programına aktarıldı ve bu ileri CAD programı ortamında 3-boyutlu tasarım tamamlandı. Ancak CATIA programının ileri “sweep” tekniği ile oluşturulan kanat bol miktarda NURB (Non-uniform rational B-spline) barındırdığından ve ANSYS Modeler bu datayı işleyemediğinden bu teknik terk edildi. Yine başka bir ileri yüzey aracı olan “blend” fonksiyonu ile kanat 3D tasarımı yapıldı ve bu data ANSYS Design Modeler ortamına aktarılarak CFX simülasyonu için uygun hale getirildi. Silindirik profiller vasıtası ile rotor merkezi(hub) oluşturuldu. Kanat 10 cm'lik kesitler şeklinde oluşturulmuştur. Her kesitin kord uzunluğu ve twist(bükülme) açısı farklıdır. Kök tasarımı için interpolasyon tekniği ile özel profiller yaratılmıştır(Şekil 4.1). Ön tasarımın kök bölgesinde daha kalın profiller kullanılarak son tasarım oluşturulmuştur.

Bu dönüşüm nedeniyle kanat yapısal olarak geliştirilmiş olup aerodinamik verimden bir miktar taviz verilmiştir.



Şekil 3.1 Aerodinamik tasarımda kullanılan interpolate edilmiş profiller

Kesit No	Pozisyon (metre)	Kord Uzunluğu (metre)	Bükülme (derece)	Damla Profili	Polar
1	0.0	0.14	45.14	Dairesel	Re 100.000
2	0.05	0.14	45.14	Dairesel	Re 100.000
3	0.15	0.206	30	NACA4450	Re 100.000
4	0.25	0.194	20.3	NACA4440	Re 100.000
5	0.35	0.16	14.3	NACA4430	Re 100.000
6	0.45	0.136	10.5	NACA4420	Re 100.000

7	0.55	0.116	7.8	NACA4412	Re 100.000
8	0.65	0.1	5.9	NACA4412	Re 100.000
9	0.75	0.088	4.5	NACA4412	Re 100.000
10	0.85	0.078	3.3	NACA4412	Re 100.000
11	0.95	0.07	2.4	NACA4412	Re 100.000
12	1.05	0.064	1.7	NACA4412	Re 100.000
13	1.15	0.06	1.0	NACA4412	Re 100.000
14	1.25	0.054	0.57	NACA4412	Re 100.000
15	1.35	0.05	0.11	NACA4412	Re 100.000
16	1.45	0.048	-0.26	NACA4412	Re 100.000
17	1.55	0.044	-0.60	NACA4412	Re 100.000
18	1.65	0.042	-0.90	NACA4412	Re 100.000
19	1.75	0.038	-1.125	NACA4412	Re 100.000
20	1.85	0.032	-1.4	NACA4412	Re 100.000
21	1.95	0.022	-1.6	NACA4412	Re 100.000

Çizelge 3.1 Aerodinamik tasarım ayrıntıları

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu kısımda tez çalışması ile ortaya konulan sonuçlar derlenmiş ve yorumlanmıştır. Bölüm CFX programının 2-D doğrulanması ile başlamıştır. Akabinde CFX ve Qblade yazılımlarının tasarlanan kanat için sonuçları irdelenmiştir. Bu esnada kurulan model de açıklanmıştır. Bu kısımda elde edilen sonuçlar yapısal tasarımda kullanılmak üzere depolanmıştır. Kanadın yüzeyinde oluşan basınç dağılımı bilgisi excel dosyası olarak yapısal tasarımda kullanılmak üzere ANSYS Mechanical yazılımına aktarılmıştır. Kanadın yapısal tasarımı iteratif olarak yapılmıştır. İlk tasarım belli noktalarda revize edilerek daha sağlam ve stiff bir yapıya doğru gidilmiştir. Bu noktada CATIA yazılımının parametrik olmasından istifade edilmiştir. Son olarak kanatta kullanılan malzeme ve gerilme sonuçları sunulmuştur.

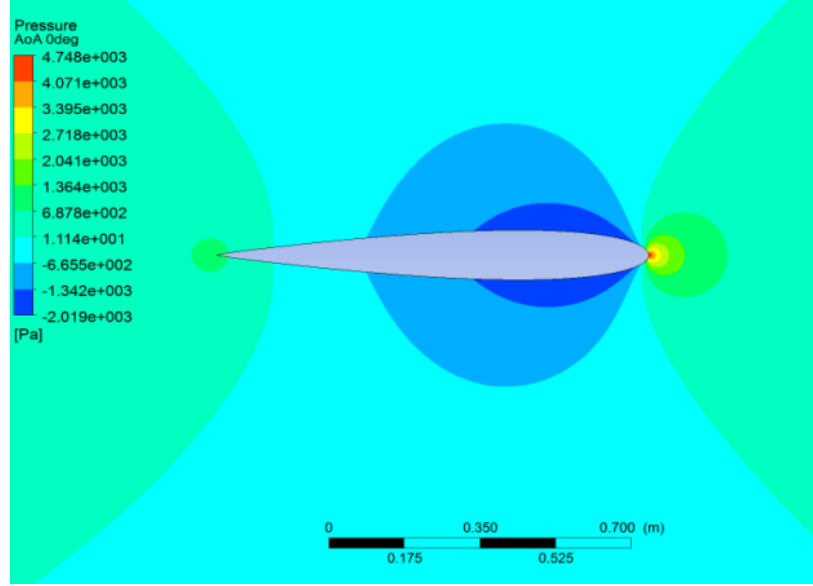
4.1. CFX Programının 2-Boyutta Doğrulanması

Farklı saldırı(hücum) açıları altında NACA0012 profili incelendi ve bazı CFX-Post fonksiyonları kullanılarak ilgili sonuçlara varıldı.

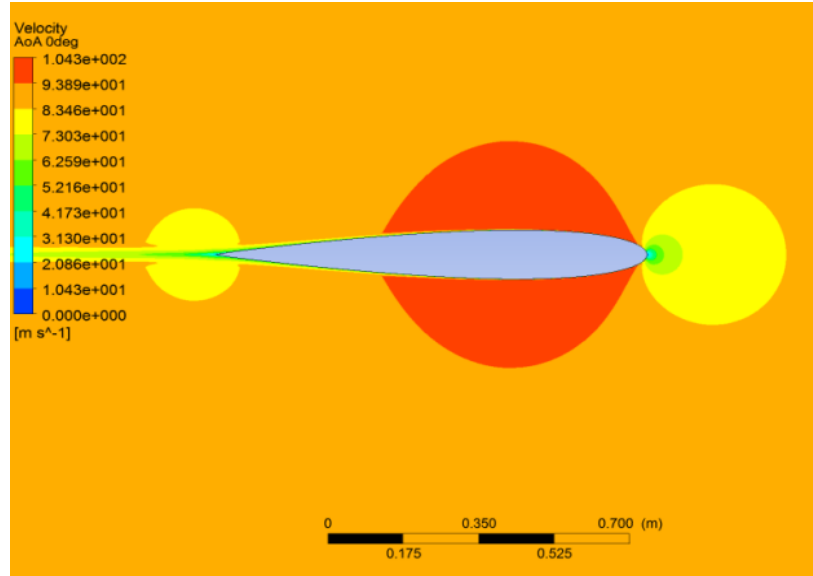
Saldırı açısı arttıkça Mach numarası da artmaktadır ve sıkıştırılamaz akış kabulü geçerliliğini yitirmektedir. Bu nedenle simülasyon sonuçları deney sonuçlarından sapmaya başlamaktadır. Ancak biliniyor ki bu profil için stall(akış kopması) 16^0 civarında başlamaktadır ve simülasyon sonuçları 14^0 civarına kadar deney sonuçlarını yakından takip etmektedir. Bu nedenle CFX programının 2-boyutlu akış için doğrulanmış olduğu söylenebilir.

Sonuçlar C_l tahminlerinin araştırılan 2D model için 12^0 değerine kadar çok iyi, 14^0 ye kadar ise iyi olduğunu göstermektedir. CFX C_l değerini bir miktar daha yüksek tahmin etmektedir ancak fark küçük olduğundan bu durum tolere edilir durumdadır.

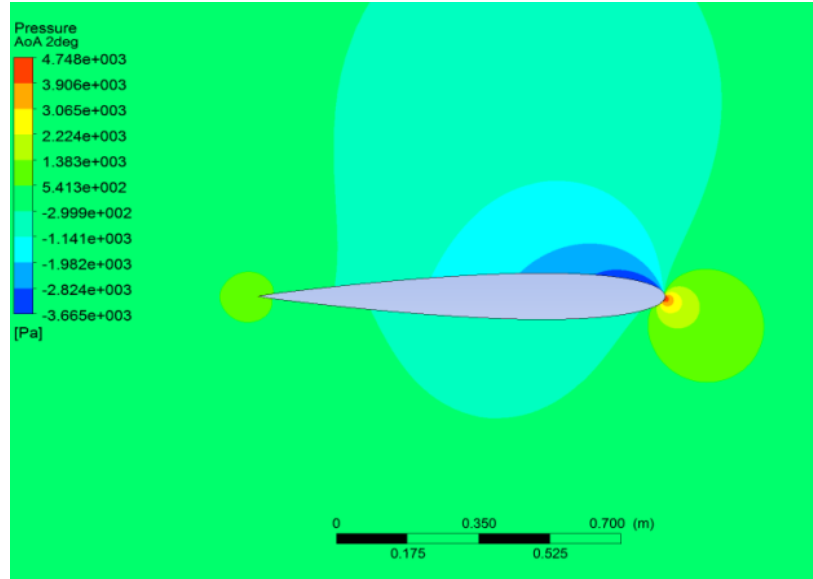
C_d tahminleri için de aşağı yukarı aynı durum söz konusudur. C_l değerinin 1'den küçük olduğu düşük açılar için C_d tahminleri deney sonuçları ile iyi uyum içindedir. Fakat C_l sonuçları için geçerli durum burada da devreye girmektedir. Saldırı açısı arttıkça ($C_l > 1,1$) CFX tahminleri deney sonuçlarından yine önemli sapmalar göstermektedir. Sonuç olarak incelenen aralıkta CFX sonuçları deney sonuçları ile uyumlu olduğundan CFX programının kullanılmasında bir sakınca yoktur.



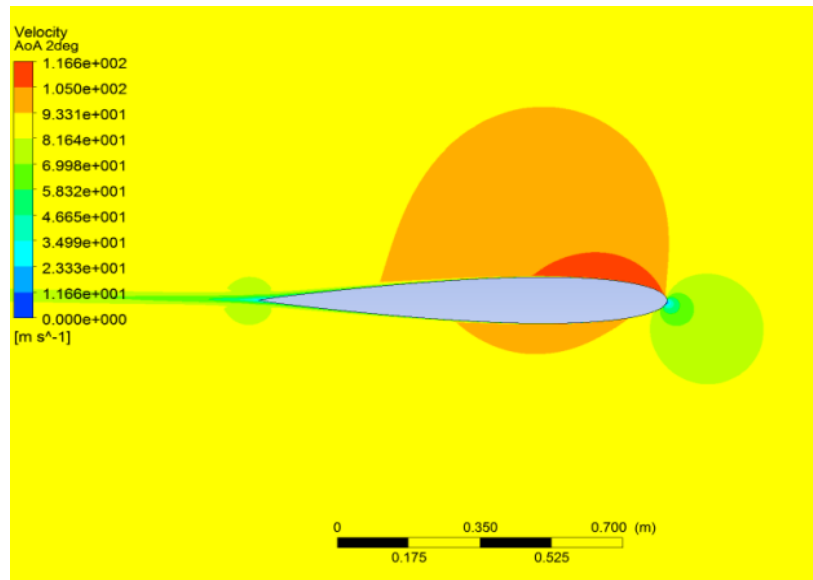
Şekil 4.1 Basınç Konturları , HücümAçısı= 0°



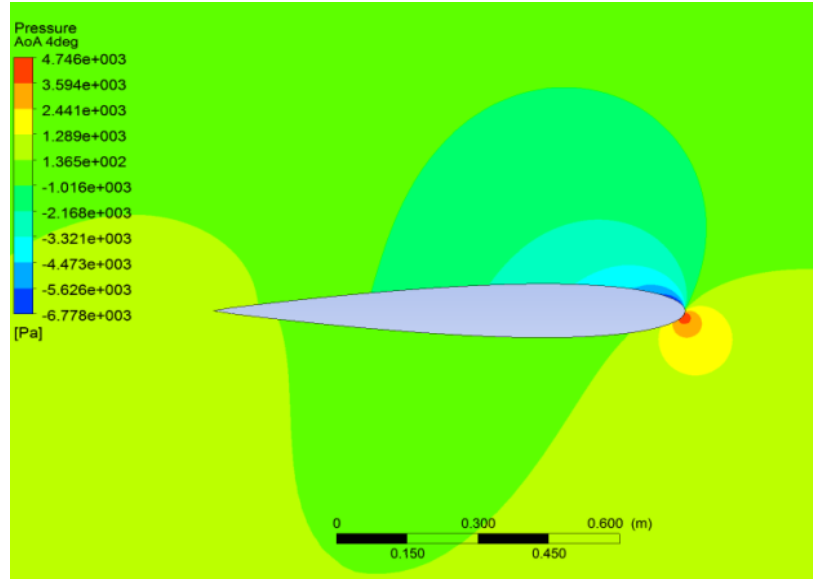
Şekil 4.2 Hız Konturları , HücümAçısı= 0°



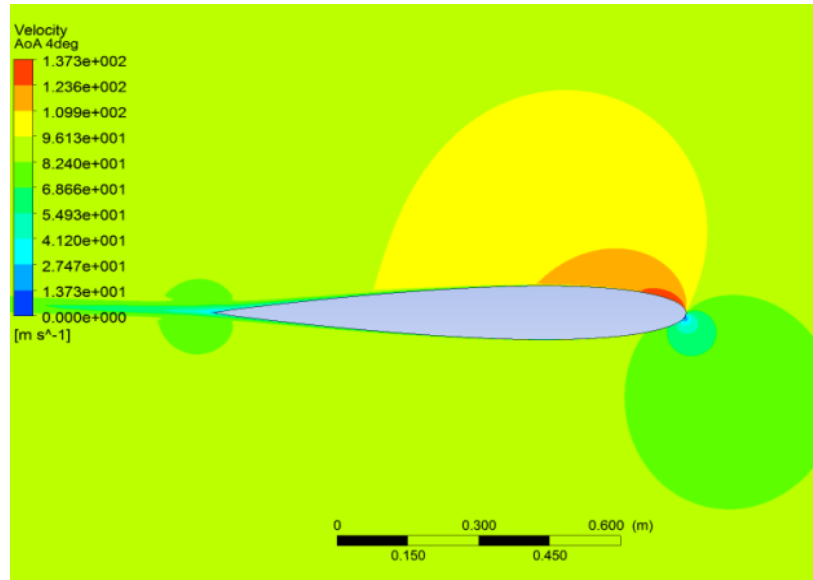
Şekil 4.3 Basınç Konturları , HücümAçısı= 2°



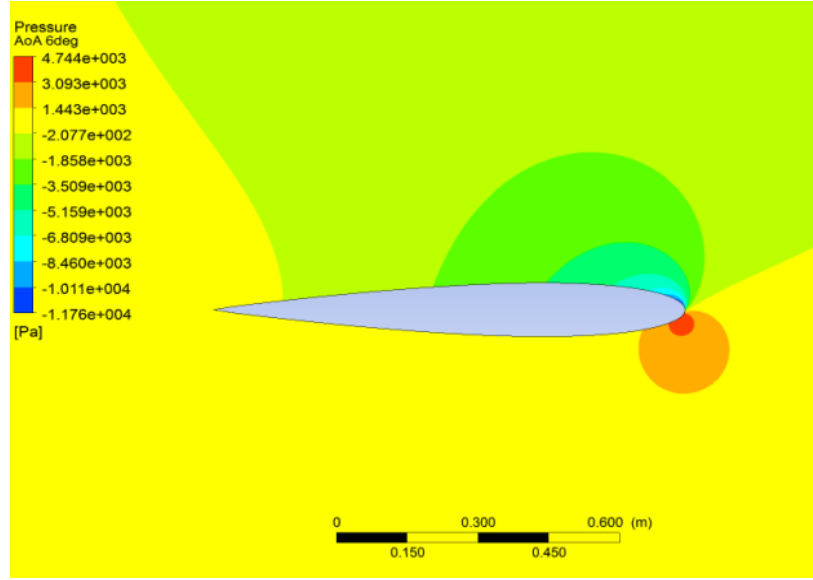
Şekil 4.4 Hız Konturları , HücümAçısı= 2°



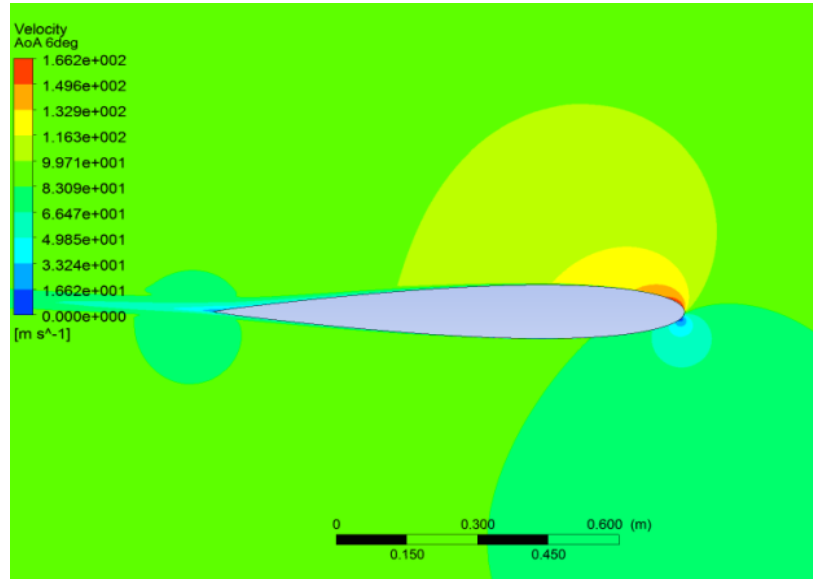
Şekil 4.5 Basınç Konturları , HücümAçısı= 4⁰



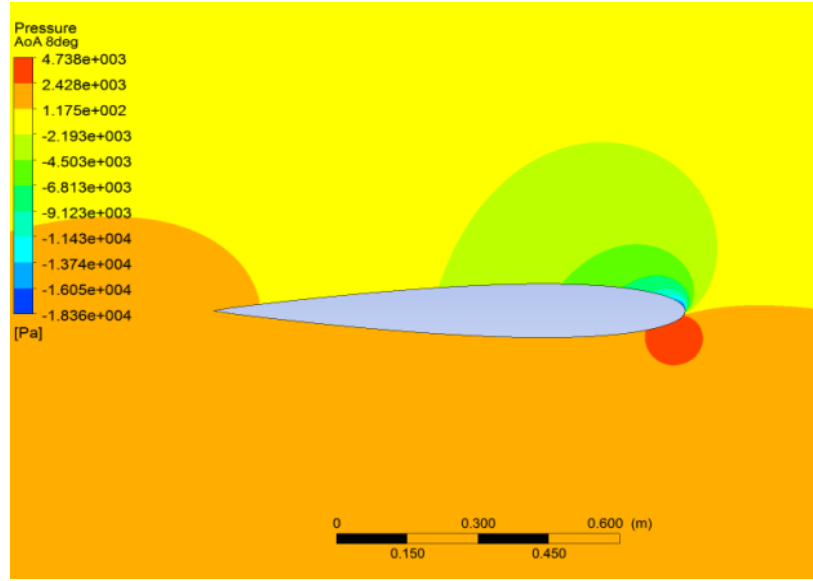
Şekil 4.6 Hız Konturları , HücümAçısı= 4⁰



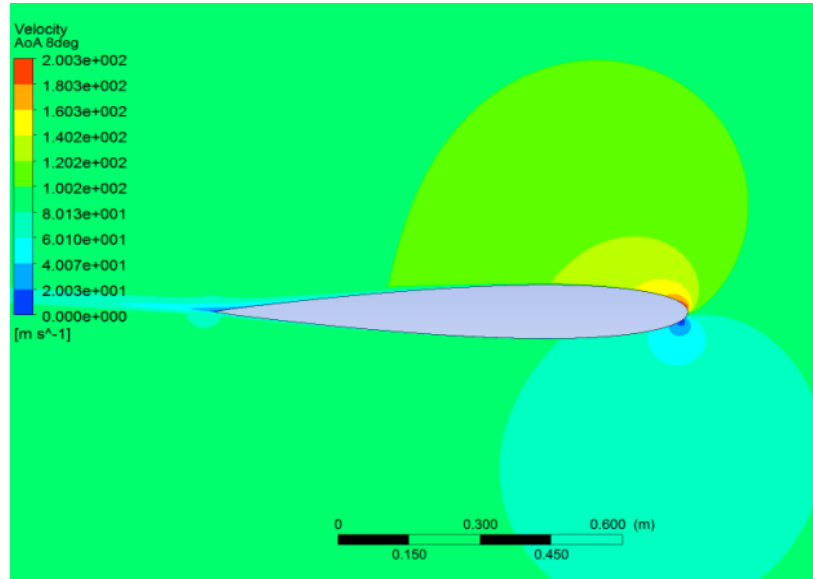
Şekil 4.7 Basınç Konturları , HücümAçısı= 6⁰



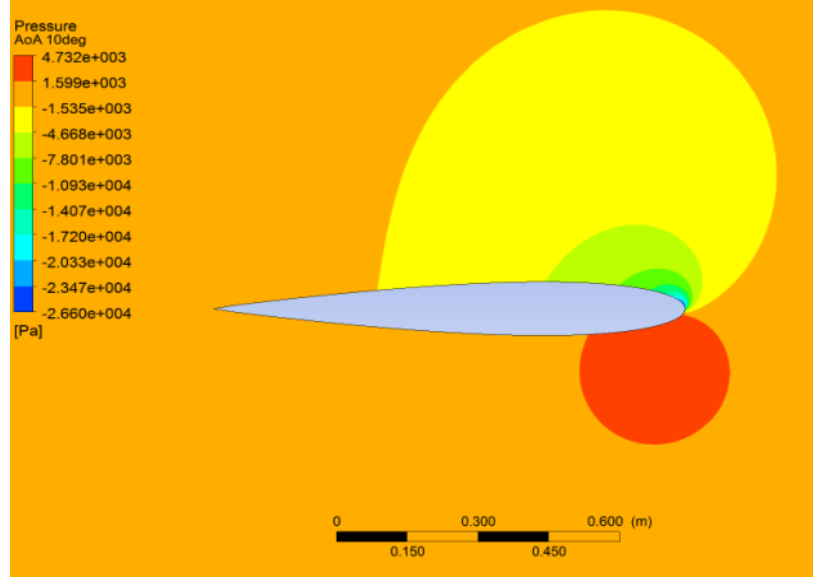
Şekil 4.8 Hız Konturları , HücümAçısı= 6⁰



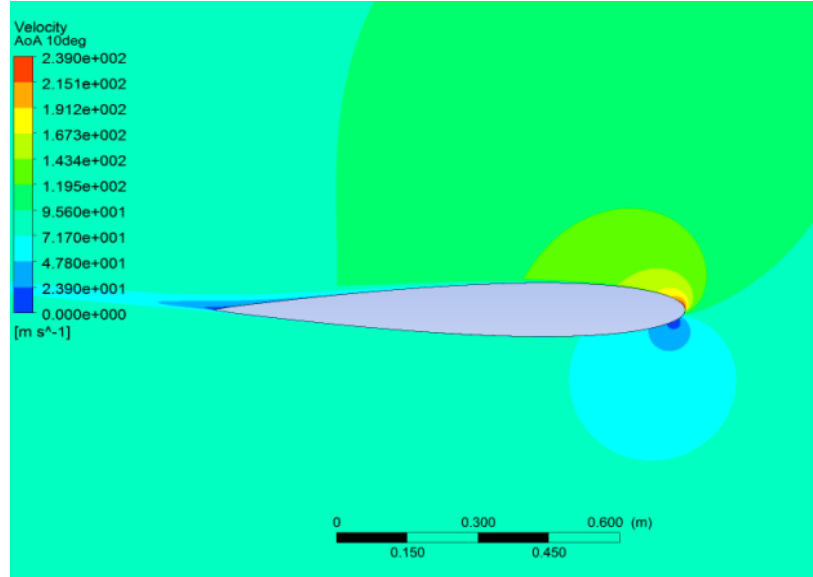
Şekil 4.9 Basınç Konturları , HücümAçısı= 8^0



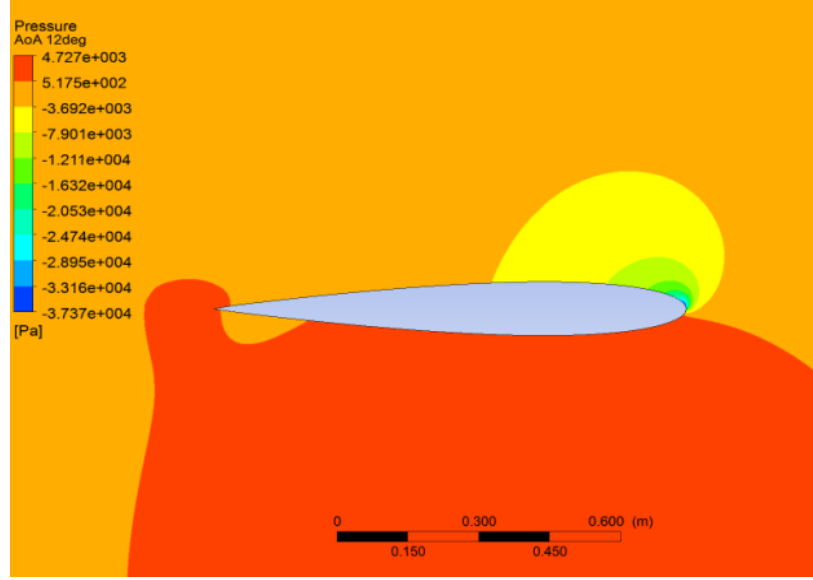
Şekil 4.10 Hız Konturları , HücümAçısı= 8^0



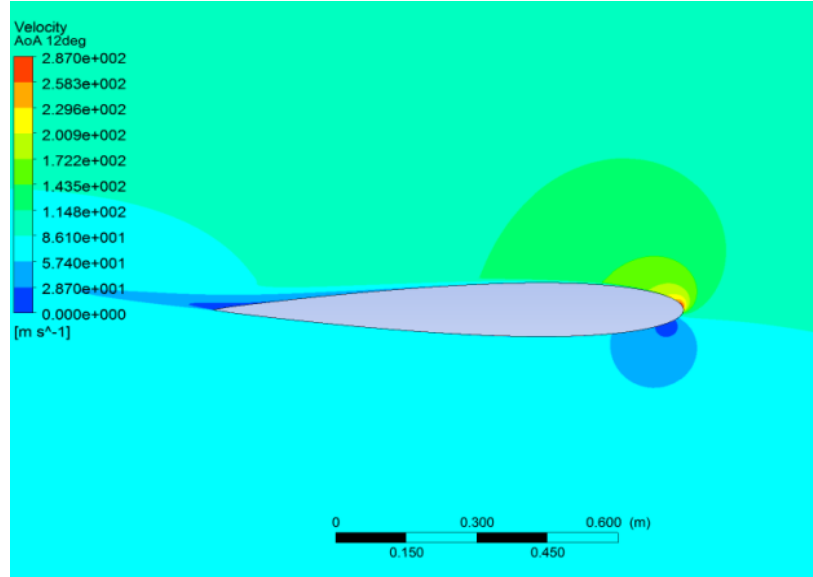
Şekil 4.11 Basınç Konturları , HücümAçısı= 10^0



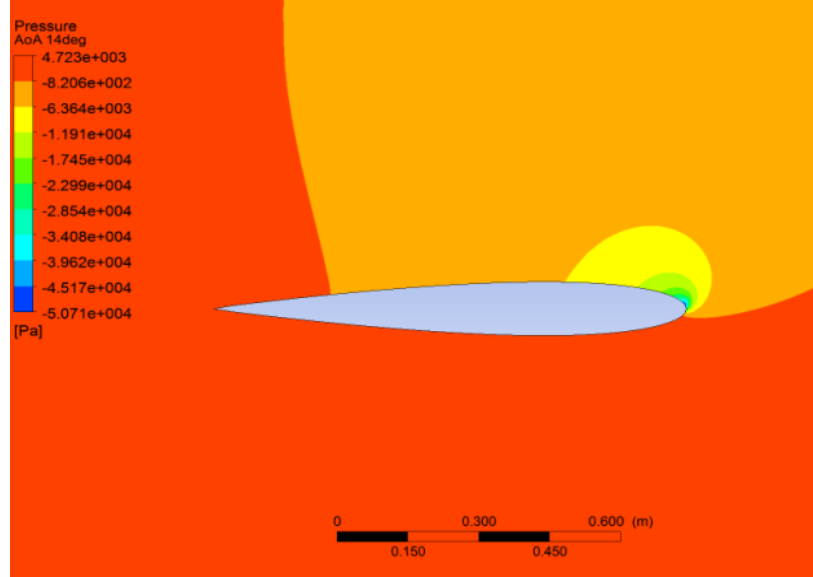
Şekil 4.12 Hız Konturları , HücümAçısı= 10^0



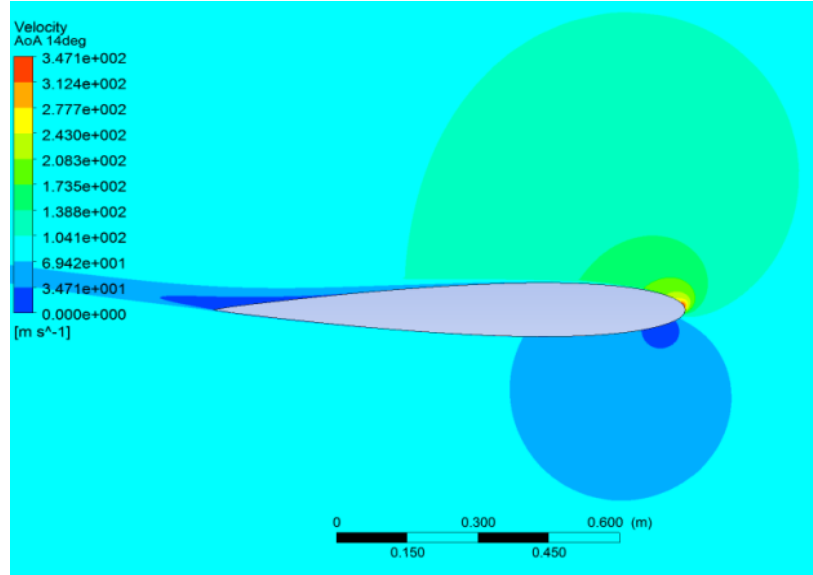
Şekil 4.13 Basınç Konturları , HücümAçısı= 12⁰



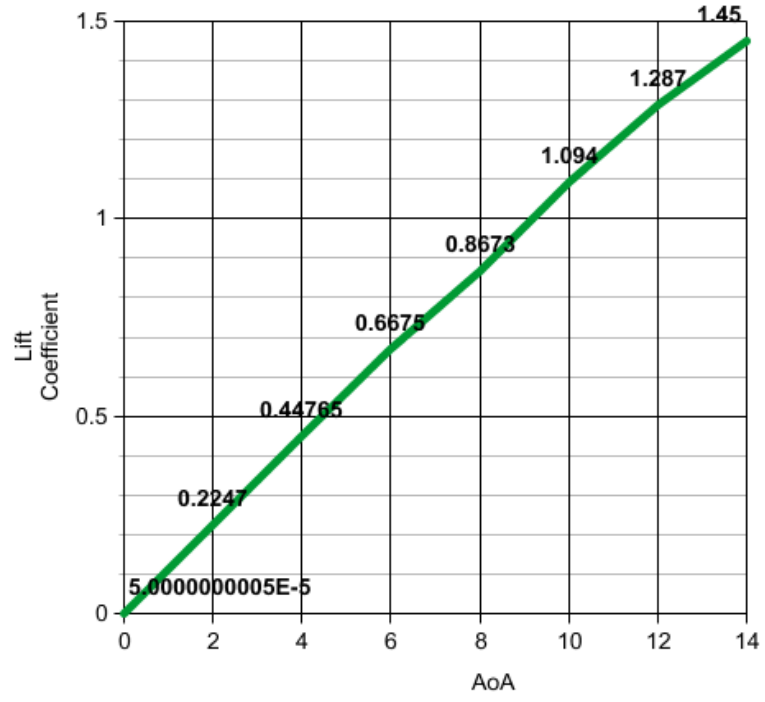
Şekil 4.14 Hız Konturları , HücümAçısı= 12⁰



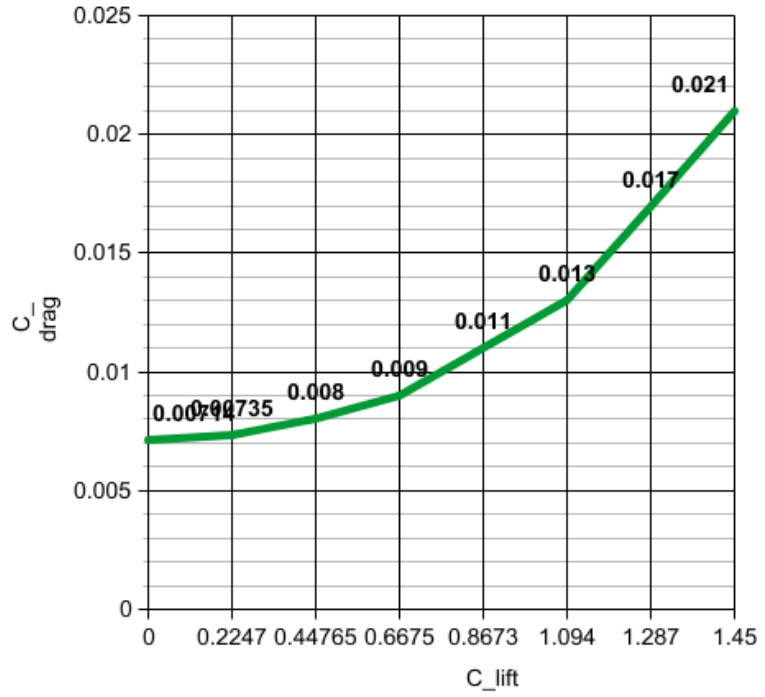
Şekil 4.15 Basınç Konturları , HücümAçısı= 14⁰



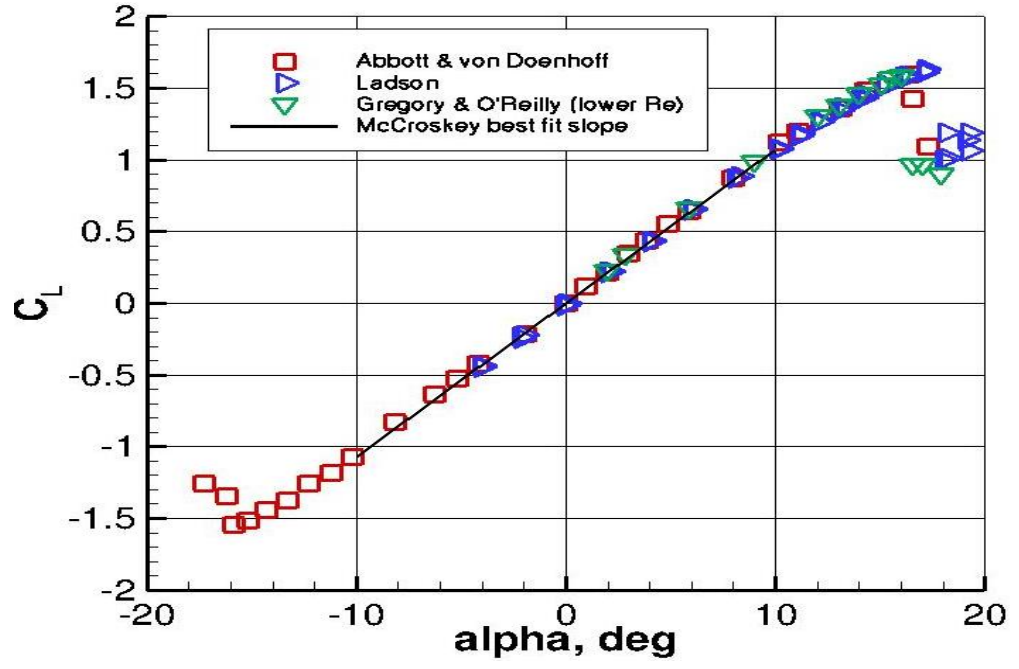
Şekil 4.16 Hız Konturları , HücümAçısı= 14⁰



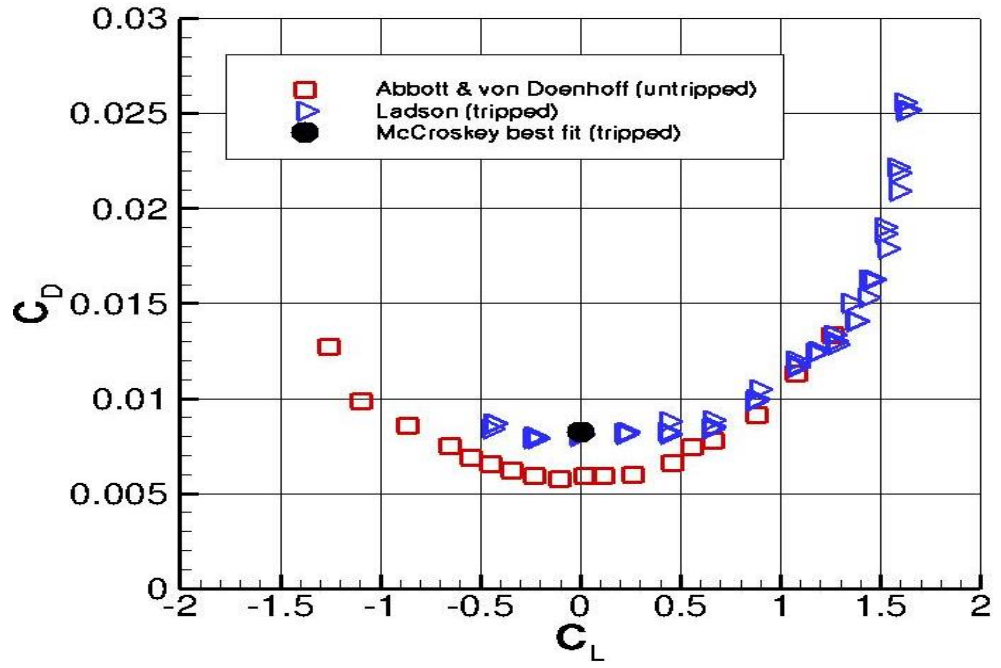
Şekil 4.17 NACA0012 damlası için HücümAçısı-Kaldırma(Lift) katsayısı grafiği
(CFX simülasyon sonuçları)



Şekil 4.18 NACA0012 damlası için $C_l - C_d$ grafiği
(CFX simülasyon sonuçları)



Şekil 4.19 NACA0012 damlası için HücümAçısı-Kaldırma(Lift) katsayısı grafiği
deney sonuçları (Ladson, 1987)



Şekil 4.20 NACA0012 için $C_L - C_d$ deney sonuçları (Ladson, 1987)

4.2. Kanadın CFX Modeli ve Simülasyon Sonuçları

Model CPU zamanından kazanabilmek maksadıyla periyodik olarak kurgulanmıştır. Analiz edilen türbin 3-kanatlı olduğu için, tüm süpürme alanı değil de sadece 120° lik bir kısım simüle edilmiştir. Önce bir kanat için sonuçlar bulunmuştur. Akabinde sonuçlar gerekli durumlarda (örneğin toplam tork ve güç hesabı gibi) 3 ile çarpılarak türbin değerleri elde edilmiştir. Simülasyon hacmi 8 metre çap, 20 metre uzunluğa sahip bir silindirin üçte birlik bir dilimidir. Türbin kanadı bu dilimde girişten itibaren 8 metrelik bir mesafeye konmuştur. Kanadın arkasında da 12 metrelik bir mesafe vardır. Kanat kasıtlı olarak ortaya konulmamıştır. Çünkü kanadın arkasında oluşan girdap çözümü daha zor bir alandır ve etkileri nispeten daha uzun bir mesafe boyunca etkilidir. Daha doğru sonuçlara varabilmek için kanat sonrası hava akımına daha fazla sayıda ağ elemanı ayrılmıştır. Süpürme alanı çapı 4 metre olduğundan ve kanadın çevresel etmenlerden mümkün olduğunca etkilenmemesini sağlamak amacıyla bunun iki katı olan 8 metrelik çapta bir çözüm alanı yaratılmıştır. Simülasyonda döner çerçeve(rotating frame) kullanılmıştır. Bu sayede türbinin dönüşü programa aktarılmıştır(Staude, 2006).

Çözüm alanı(domain) çoğu tetrahedral olmak üzere 4,3 milyonu aşkın elemana bölünmüştür. 780 000'den fazla sayıda düğüm(node) oluşmuştur. Katı-sıvı etkileşimi kanat yüzeyinde olmaktadır ve çözümü istenilen bölge de burasıdır. Bu nedenle çözümün kalitesini arttırmak maksadıyla kanat yüzeyine arttırma(inflation) uygulanmıştır. Kanat civarında ağ yoğunluğu diğer bölgelerden oldukça fazla olacak şekilde CFX ayarları ile oynanmıştır. Ayrıca en yoğun ağ seçeneği seçilerek ve geometrinin eğriselliğinin takip edilmesi sağlanarak çözüm gerçeğe en yakın olacak şekilde elde edilmiştir.

Seçilen türbülans modeli SST(Shear Stress Transport) daha önce de başarısı kanıtlanmış bir modeldir. Örneğin E. Lutum ve F. Cottier'in birlikte kaleme aldıkları "Aerothermal predictions on a highly loaded turbine blade including effects of flow separation" isimli makalede SST modelinin havacılık alanındaki uygulamalardaki üstünlüğü açıklanır. Buna benzer birçok makale mevcuttur. Yine örneğin Robert Maier-Staude tarafından kaleme alınan "Wind Turbine Modeling using ANSYS" isimli makalede de SST modeli en doğru sonuçları vermektedir. Bu başarısı da duvar

yakınındaki koşulları serbest akış bölgesi koşulları ile kombine edebilmesinde gizlidir. Bu özellikleriyle SST türbülans modeli nümerik bir yöntemin sahip olması gereken “iyi tanımlama düzeyi” yani problemi doğru kavraması ve probleme uygun olması, “tamlik” yani akışın ilgili tüm parametrelerini içermesi, kolay kullanılabilirlik, makul CPU gereksinimi ve gerçek değerlerden az sapma gibi özelliklerin tümüne haizdir (Tennekes, 1972).

Ancak bu model de diğer türbülans modelleri gibi akışın tamamını türbülanslı kabul etmektedir. Halbuki gerçekte akış damlanın belli bir noktasına kadar laminar olmakta akabinde türbülans oluşmaktadır. Bu durumda akışı baştan sona türbülanslı kabul eden bir modelin diğer nedenler bir yana sadece bu sebepten dolayı da belli bir hata payı barındırması beklenir. Bu sorunu çözmek için Menter bazı matematiksel geçiş modelleri üretmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan CFX programı da Menter formülasyonlarından yararlanarak ne zaman geçiş algoritmasının aktifleştirilmesi gerektiğini açıklayan empirik bağıntılar kurmuştur(Anonim, 2009b).

$$\frac{Re_{xt}}{Re_x} = \frac{380000 \cdot (100 \cdot Tu)^{-\frac{5}{4}}}{(\frac{\rho}{\mu} \cdot V \cdot L_{Cihaz})}$$

Burada;

Re_{xt} = Geçiş Reynolds Numarası

Re_x = Cihaz Reynolds Numarası

Tu = Serbest akış türbülans intensitesi. “k” türbülans kinetik enerjisi olmak üzere aşağıdaki gibi hesaplanır(Anonim, 2009a).

$$Tu = \frac{(2k/3)^{0.5}}{V}$$

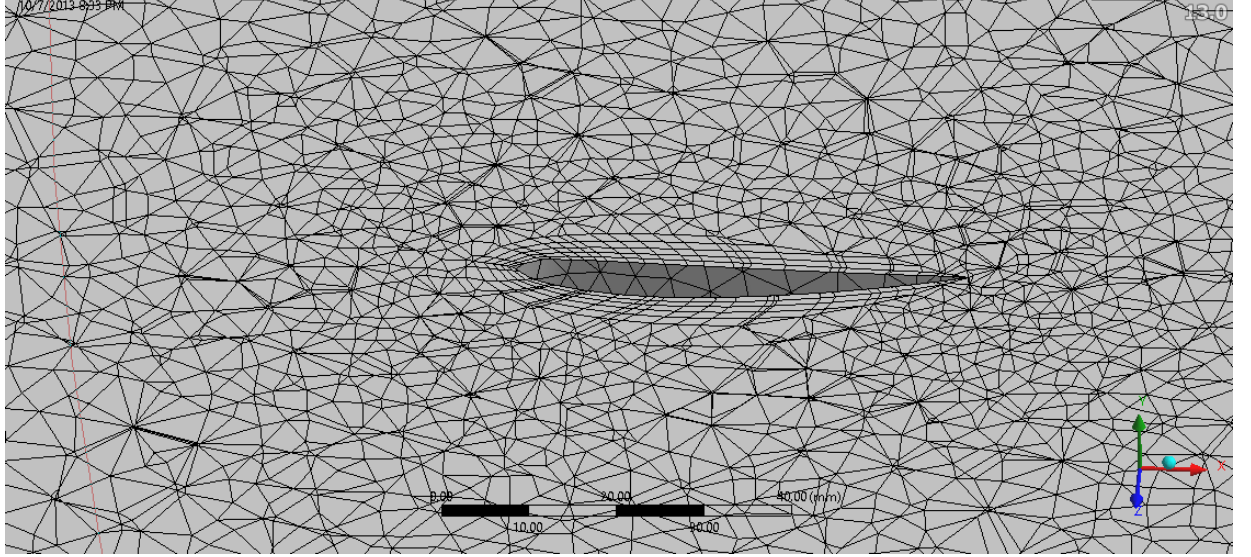
Bu bağıntı bir oran vermektedir ve çıkan sonuç ne kadar yüksekse laminar-türbülans geçiş algoritmasının kullanılması da o denli elzemdir. Çünkü bu oranın yüksek olması akışın uzun bir süre türbülanslı değil laminar olduğunu göstermektedir. Diğer tüm hesaplamalar da(kuvvet,basınç gibi) akışın laminar veya türbülanslı olup olmadığına göre değiştiğinden eğer Menter algoritması kullanılmayacaksa bu oranın düşük olması gerekmektedir.

Yapılan çalışmada yukarıdaki formülasyon kullanıldığında bahsi geçen oranın % 0,7 olduğu görülmüştür. Varılan sonuç beklenendir. Zira yüksek aerodinamik verim için türbin damla kesitlerinin yüksek (Kaldırma kuvveti/ Sürüklemeye kuvveti) oranına ulaştığı yüksek hücum açıları seçilmiştir. Daha doğrusu kanat geometrisi bu yüksek oranı verecek yüksek açılar oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Yüksek hücum açılarında da laminardan türbülansa geçişin çok hızlı olduğu göz önüne alınırsa varılan sonucun ne kadar doğru olduğu anlaşılabacaktır. Bu durumda SST modeline Menter algoritmasını dahil etmek sonucu hemen hiç etkilemeyecek sadece daha uzun hesaplama yöntemi nedeniyle sonuçların daha geç alınmasına neden olacaktır.

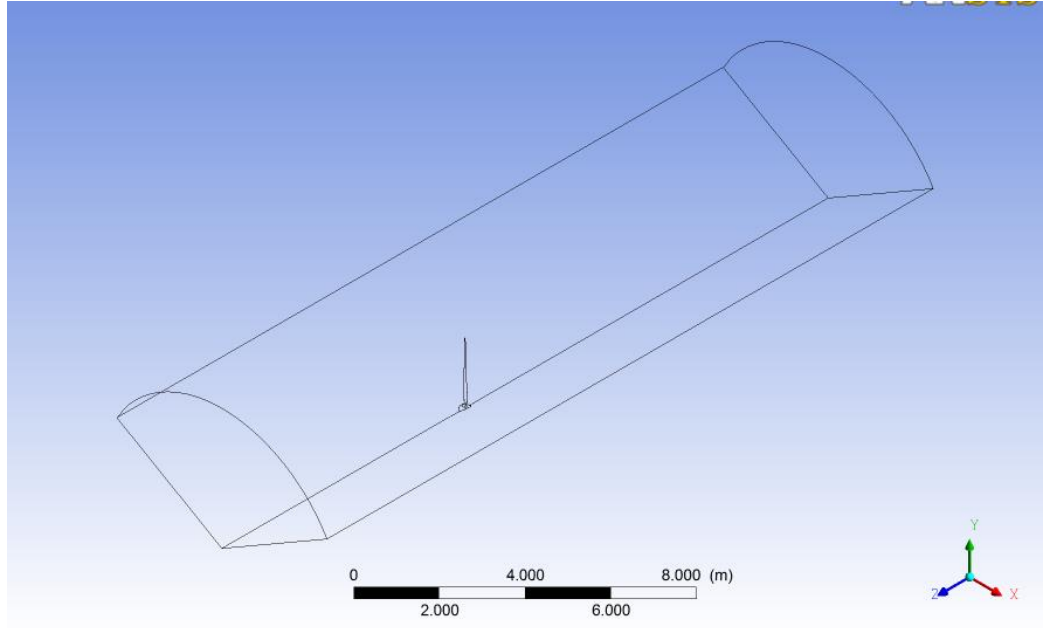
SST modeli aslında RANS türbülans modeli ailesinin bir üyesidir. Fikir vermesi bakımından seçilen türbülans modelinin sonuçları ne derecede etkileyebileceği kısa bir kıyaslama çalışması ile aşağıdaki gibi sunulmuştur. Yapılan bu 2-boyutlu analizde 1 metre uzunluğundaki bir NACA0012 profili üzerinden 7,25 m/s hızında hava farklı hücum açılarında geçirilmiştir. Araştırılan değer verilen bu koşullarda damlanın kaldırma/sürüklemeye kuvvetleri oranıdır. Tablada verilen sonuçlar da göstermektedir ki bazı durumlarda bırakınız doğru sonuç vermeyi bazı modeller hiç yakınsamamakta ve sonuç vermemektedir. Hücum açısı değiştikçe farklı türbülans modellerinin verdikleri sonuçlar da iyice farklılaşmaktadır. Bunun altında yatan temel sebep artan hücum açısı ile akışın komplekslik derecesinin de artmasıdır. Yine RANS ailesine mensup diğer iki model olan k-Epsilon ve k-Omega modellerine ait sonuçlar SST modelinin sonuçları ile birlikte verilmiştir.

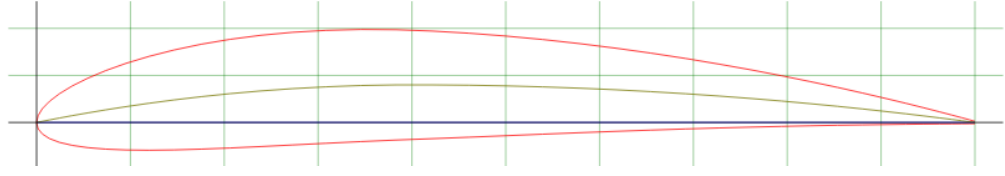
Hücum Açısı(derece)	0°	5°	10°	15°
k-Epsilon Model(L/D)	Yakınsama olmadı	38.5	51	46
k-Omega Model(L/D)	0	34	46	Yakınsama olmadı
SST Model(L/D)	0	45	45	29

Çizelge 4.1 Türbülans modellerinin kıyaslanması

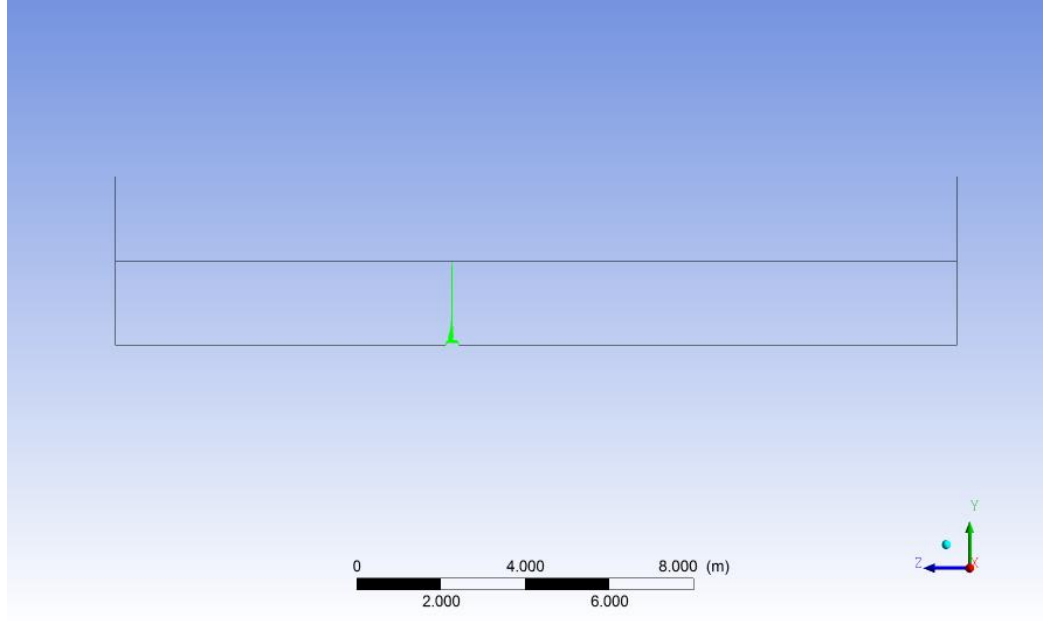


Şekil 4.21 3-Boyutlu simülasyondan bir ağ eleman kesiti

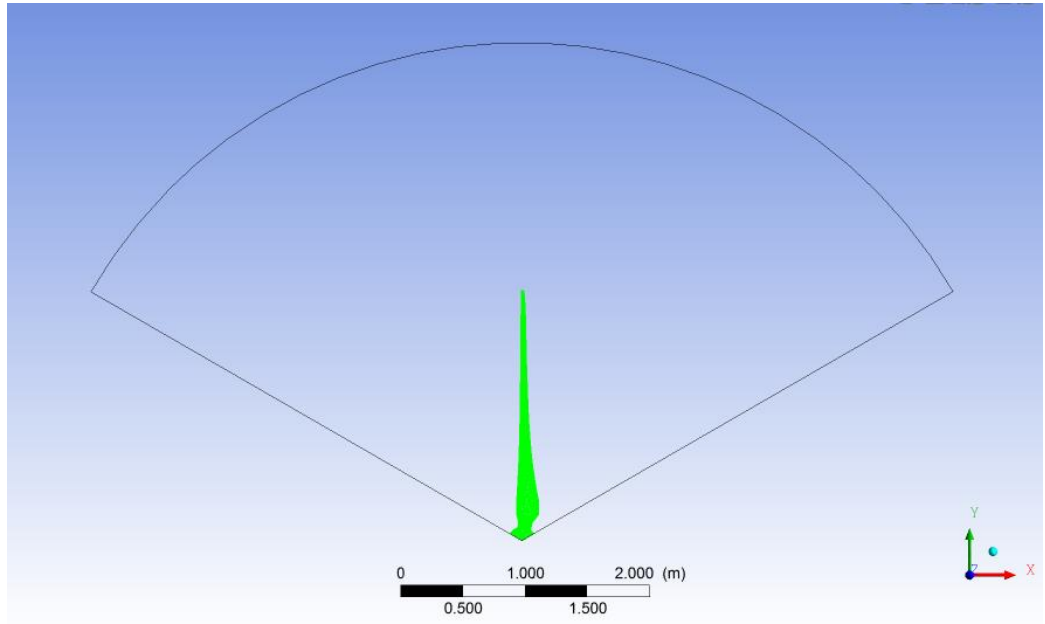




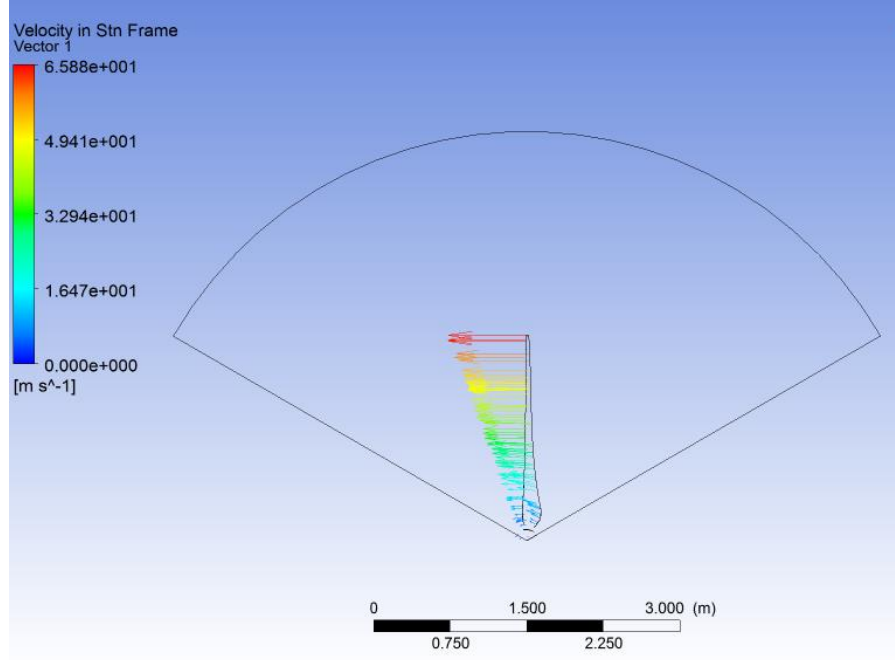
Şekil 4.22 Türbin simülasyon hacmi(Iso Görünüş) ve NACA4412 damla profili



Şekil 4.23 Türbin simülasyon hacmi(Sağdan Görünüş)



Şekil 4.24 Türbin simülasyon hacmi(Önden Görünüş)



Şekil 4.25 Kanadın dönüş hızı

4.3. Güç Hesabı

$$\text{Güç} = T \times \omega$$

Burada ω rad/sn biriminde dönüş hızıdır. Bu durumda $\omega = 2 \times \pi \times (313\text{devir}/60 \text{ saniye}) = 32,78 \text{ rad/sn}$ olur.

Simülasyon sunucuna göre bir kanadın ürettiği tork 12,6 Nm'dir. Dolayısı ile türbinin toplam torku 37,8 Nm olmalıdır.

$$\begin{aligned} P_{\text{turbine}} &= 37,8\text{Nm} \times 32,78(1/\text{sn}) \\ &= 1239 \text{ Watt} \end{aligned}$$

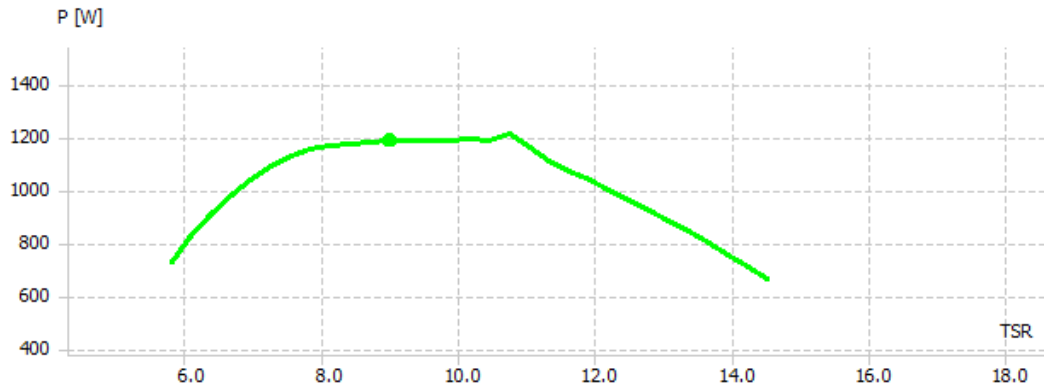
Kanadın optimize edildiği 7,25 m/s rüzgar hızında kanat süpürme alanı potansiyeli

$$\begin{aligned}
 P_{\text{müsait}} &= 0,5 \times \rho \times A \times U_{\infty}^3 \\
 &= 0,5 \times 1,225 \times (\pi \times 2,05^2) \times 7,25^3 \\
 &= 3080 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

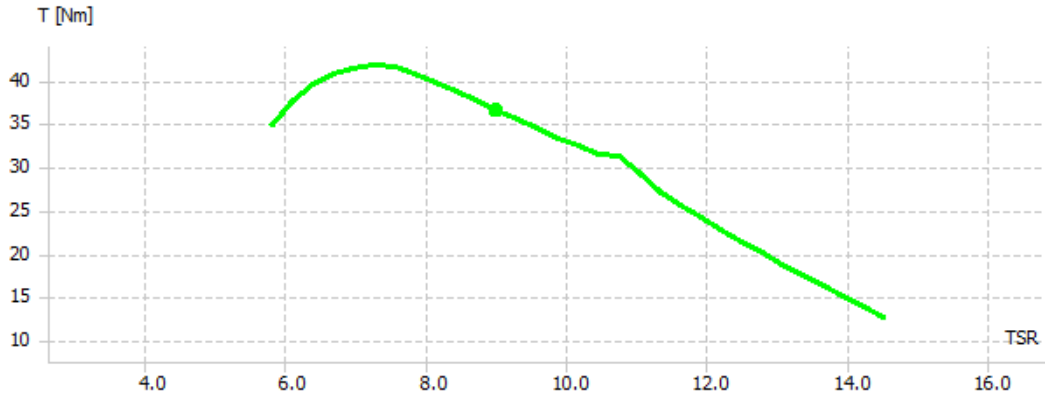
$$\begin{aligned}
 \text{Türbinin aerodinamik verimi} &= 1239/3080 \\
 &= \% 40,2
 \end{aligned}$$

Qlade ise üretilen gücü 1200 Watt olarak tahmin etmekte dolayısı ile de;

$$\begin{aligned}
 \text{Aerodinamik verim} &= 1200/3080 \\
 &= \% 39 \text{ olmaktadır.}
 \end{aligned}$$



Şekil 4.26 Tasarlanan rotorun Qblade programına göre güç üretimi

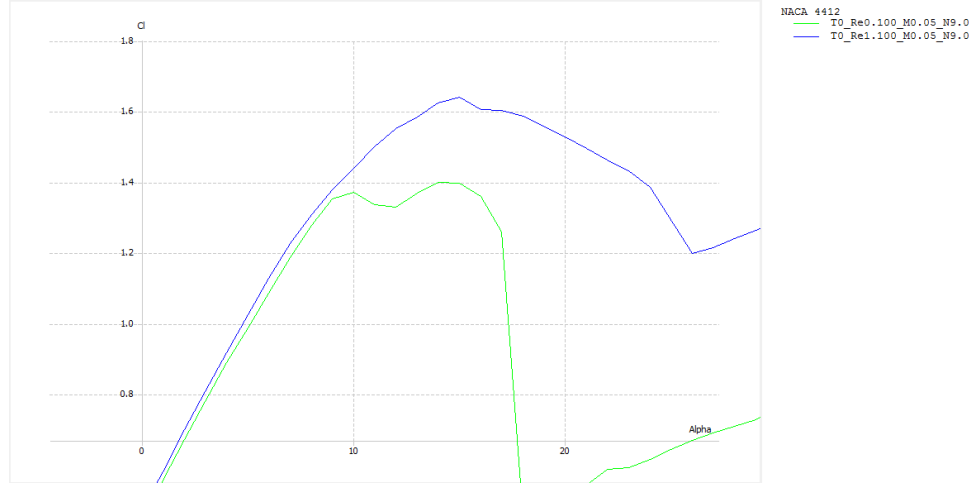


Şekil 4.27 Tasarlanan rotorun Qblade programına göre tork üretimi

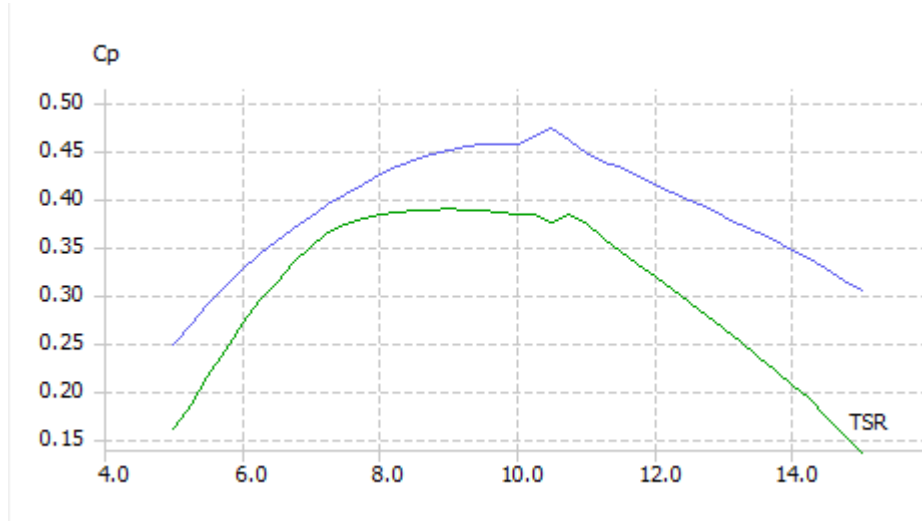
4.4. Ölçeklendirme

Bu değer Qblade tahmini olan % 39 ile son derece uyumludur ve Ayatek firmasının Almanya'dan ithal ederek Türkiye'ye getirdiği WTN 500 modeli ile kıyaslandığında daha iyidir. Bahsi geçen türbin 48 metre rotor çapına sahiptir ve rotor süpürme alanı 1810 m^2 dir. Firma 10 m/s rüzgar hızında rotorun ürettiği gücü 437 kW olarak vermektedir. Bu da % 39,4 olan bir verime tekabül etmektedir. Çünkü bu rotor süpürme alanı ve rüzgar hızı için müsait güç $1108,6 \text{ kW}$ olmaktadır. Ayrıca türbin büyüdükçe Re numaralarının arttığını ve dolayısı ile verimin de arttığını akılda tutmak gerekir. Bu çalışmada tasarlanan türbinin Re numarası $100\ 000$ dolayındadır. Tasarlanan türbin ölçeklendirilerek $23,1$ metre ebatına getirilecek olursa Re numarası da kanat uzunluğu oranında artacak ve yaklaşık olarak $1\ 100\ 000$ olacaktır. Bu Re değerinde diğer tüm koşullar aynı tutulacak olursa bir damlanın (Kaldırma Kuvveti / Sürüklenme Kuvveti) oranı artacak ve dolayısı ile de türbinin aerodinamik verimi iyileşecektir.

Örneğin XFOIL analizine göre maksimum NACA4412 profili için C_l değeri $Re = 100\ 000$ için $1,4$ iken bu değer $Re = 1\ 100\ 000$ için yaklaşık $1,65$ olmaktadır. Yine Qblade analizlerine göre aynı tasarımın $Re\ 100\ 000$ verimi $Re\ 1\ 100\ 000$ veriminden en az % 10 daha azdır. Bu da mevcut tasarımın daha büyük ölçülerde, örneğin 50 metre rotor çapında üretilmesi durumunda aerodinamik veriminin % 44-45 mertebesinde olacağını dolayısı ile ideale çok yakın olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.28 Farklı Re değerleri için NACA4412 damlasının C_l -Hücum Açısı bağlantısı



Şekil 4.29 Aynı kanadın farklı Re numaralarındaki akış koşullarında performans eğrisi(Mavi: Re 1,1 E6 Yeşil: Re 0,1 E6)

4.5. Kanat Yapısı

Web-Shell iki tane olup her biri için et kalınlığı kökte 2mm olup lineer bir şekilde uca doğru azalmaktadır. Kanat ucunda et kalınlığı 0.133 mm olmaktadır. Bu iki Web-shellin ortasında web-core bulunmakta ve onun et kalınlığı kökte ve uçta sırası ile 3mm ve 0.2 mm'dir. Spar kökte türbin merkezine vida bağlantısı yapılabilmesi için 10 mm et kalınlığına sahiptir. Bu kalınlık tüm segment boyunca sabittir. 5cm boyunca

uzanan halka biçiminde bir yapıdır. Bu ilk 5cm'lik segmenti 19 ayrı segment daha izlemektedir. Toplam segment sayısı 20'dir.

Kesit Numarası	Kesit et kalınlığı (mm)	Eğrisel Kesit eni (mm)
1	9,7	-
2	9,7	95,5
3	7,7	111,3
4	5,7	81,06
5	4,7	45,34
6	3,7	35,45
7	2,7	25,23
8	1,7	21,03
9	1,6	18,87
10	1,5	15,76
11	1,4	14,46
12	1,3	9,03
13	1,2	8,49
14	1,1	8,38
15	1,0	7,75
16	0,9	7,55
17	0,8	5,54
18	0,7	5,38

19	0,6	4,26
20	0,5	4,03
21	0,4	2,48

Çizelge 4.2 Spar(flanş) yapısı boyutları

Dış kabuk daha önce aerodinamik yönden ayrıntıları anlatılan dış geometrinin her yerde eşit olarak içeriye doğru 0.3 mm et kalınlığı verilmesiyle elde edilmiştir.

4.6. Kanat Malzeme Bilgisi

Tasarlanan kanat 4 ana parçadan oluşmaktadır. Bunlar dış kabuk, destek kirişinin flanşı(2 adet), destek kirişinin kayma(shear) gerilmesi plakası ve burulma(buckling) engelleyici köpüktür.

Bu parçalar farklı yüklere dayanım sağlamaları amacıyla kanatta bulunurlar, dolayısı ile de yüke özel olmak durumundadırlar.

	Hacim(m ³)	Yoğunluk(kg/ m ³)	Kütle(kg)
Dış kabuk	0,00011368	1670	0,190
Flanş	0,00067291	1780	1,198
Kayma(shear) gerilmesi plakası	0,00013527	1670	0,226
Burulma(buckling) köpüğü	0,00010151	200	0,020
Toplam			1,634

Çizelge 4.3 Kanat kütlesi

Properties of Outline Row 3: Core			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Density	200	kg m ⁻³ ▼
3	 Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's M... ▼	
5	Young's Modulus	2.1E+08	Pa ▼
6	Poisson's Ratio	0.2	
7	Bulk Modulus	1.1667E+08	Pa
8	Shear Modulus	8.75E+07	Pa

Çizelge 4.4 Köpük malzeme bilgisi(Gurit kompozit üreticisi verileri)

Properties of Outline Row 4: Shell			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Density	1670	kg m ⁻³ ▼
3	 Orthotropic Elasticity		
4	Young's Modulus X direction	8.33E+09	Pa ▼
5	Young's Modulus Y direction	1.92E+10	Pa ▼
6	Young's Modulus Z direction	1.92E+10	Pa ▼
7	Poisson's Ratio XY	0.13	
8	Poisson's Ratio YZ	0.13	
9	Poisson's Ratio XZ	0.13	
10	Shear Modulus XY	1.72E+09	Pa ▼
11	Shear Modulus YZ	3.95E+09	Pa ▼
12	Shear Modulus XZ	1.72E+09	Pa ▼

Çizelge 4.5 Kabuk malzeme özellikleri(Gurit kompozit üreticisi verileri)

Properties of Outline Row 6: Spar			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Density	1780	kg m ⁻³ ▼
3	 Orthotropic Elasticity		
4	Young's Modulus X direction	8.33E+09	Pa ▼
5	Young's Modulus Y direction	3.55E+10	Pa ▼
6	Young's Modulus Z direction	8.33E+09	Pa ▼
7	Poisson's Ratio XY	0.33	
8	Poisson's Ratio YZ	0.33	
9	Poisson's Ratio XZ	0.33	
10	Shear Modulus XY	4.12E+09	Pa ▼
11	Shear Modulus YZ	1.8E+09	Pa ▼
12	Shear Modulus XZ	4.12E+09	Pa ▼

Çizelge 4.6 Spar(Flanş) malzeme bilgisi(Gurit kompozit üreticisi verileri)

Kanat kütlesi değerleri internet üzerinden verilen bir türbin ile kıyaslandığında (<http://www.ayetek.com/ruzgar-turbinlerimiz/wtn-500-ruzgar-turbini/>) son derece makuldür. Ayatek firmasının Türkiye'ye getirdiği WTN 500 modeli 48 metre rotor çapına sahiptir. Herbir kanat 23,1 metre olup 2100 kg ağırlığındadır. Rüzgar türbin kanatlarında ölçekleme kurallarına göre kanat uzunluğu ve kütlesi kübü ile orantılıdır. Yani kanat uzunluğu iki katına çıkarsa kütlesi sekiz katına çıkar. Bu rakamlar aşağı yukarı değerlerdir. Ufak tefek farklılıklar görülebilir. Kanat malzeme bilgisi Gurit isimli üreticiden alınmıştır. (Anonim, 2012)

Bu durumda WTN 500 modelinden tersine ölçeklendirme yapılırsa ve bu türbine ait bir kanat 2,05 metre uzunluğuna indirgenirse kütlesinin de $(23,1/2,05)^3$ oranında düşürülmesi gerekecektir.

$$M_{ölçek} = 2100 \text{ kg} / (23,1/2,05)^3$$

$$= 1,47 \text{ kg}$$

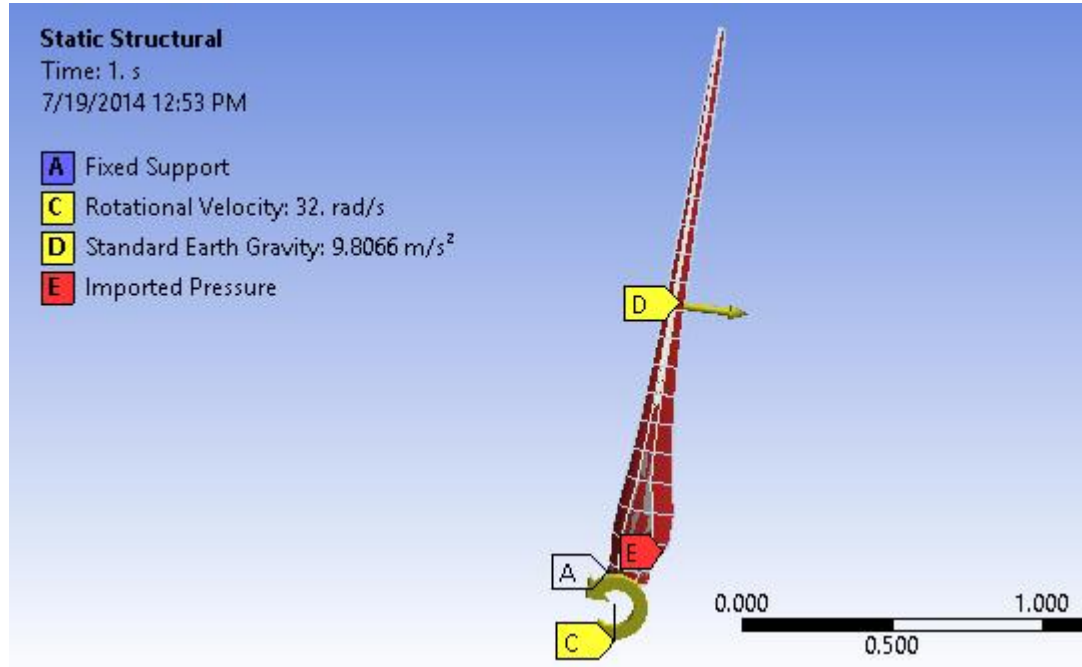
Bu değer 1,634 kg olan tasarımdan % 10,2 daha hafiftir. Tasarımlar arasındaki bu fark büyük kanatlarda kısmen karbon elyaf malzemenin kullanılmasından kaynaklanıyor da olabilir. Kanatlar büyüdükçe ağırlıklarında azaltma yapabilmek için belli oranlarda karbon elyaf kullanılmaktadır. Karbon elyafın mukavemet/kütle karakteristiği ise cam elyafından daha iyidir. Ayrıca kanat büyüdükçe dakikada yaptığı devir sayısı azalmakta bu da yorulma faktörünü daha etkisiz kılmaktadır. Dolayısı ile daha küçük güvenlik katsayıları kullanılabilir. Yine WTN 500 modelinin 4^0 olan nazel açısı vardır ki bu da türbinde maksimum kanat sehim problemi, yani sertlik(stiffness) yetersizliği olduğunu göstermektedir. Bu durumun temel nedeni az malzeme kullanılmasıdır. İdeal olan rotor düzleminin rüzgar geliş yönüne dik olmasıdır.

	WTN 500	Özgün Çalışma
Kütle	1.47 kg (Ölçeklenmiş)	1,634
Verim	% 39,4	% 44 (Ölçeklenmiş)

Çizelge 4.7 Özgün tasarımın üretilmiş bir türbin ile kıyaslanması

4.7. ANSYS Mechanical Simülasyon Sonuçları

Statik yapısal bir analiz lineer olabileceği gibi non-lineer de olabilir. Lineer bir analiz daha kolay ve az süre alırken lineer olmayan unsurları dikkate alan bir analiz daha doğru sonuçlara varmasına rağmen daha zahmetlidir ve daha çok enerji gerektirir. Bir yapıda lineer olmayan unsurlar malzemeden gelebileceği gibi(elastisite sınırının aşılması gibi...) yapının geometrisinden de kaynaklanabilir(büyük deformasyon gibi)



Şekil 4.30 Kanada etkiyen kuvvetler

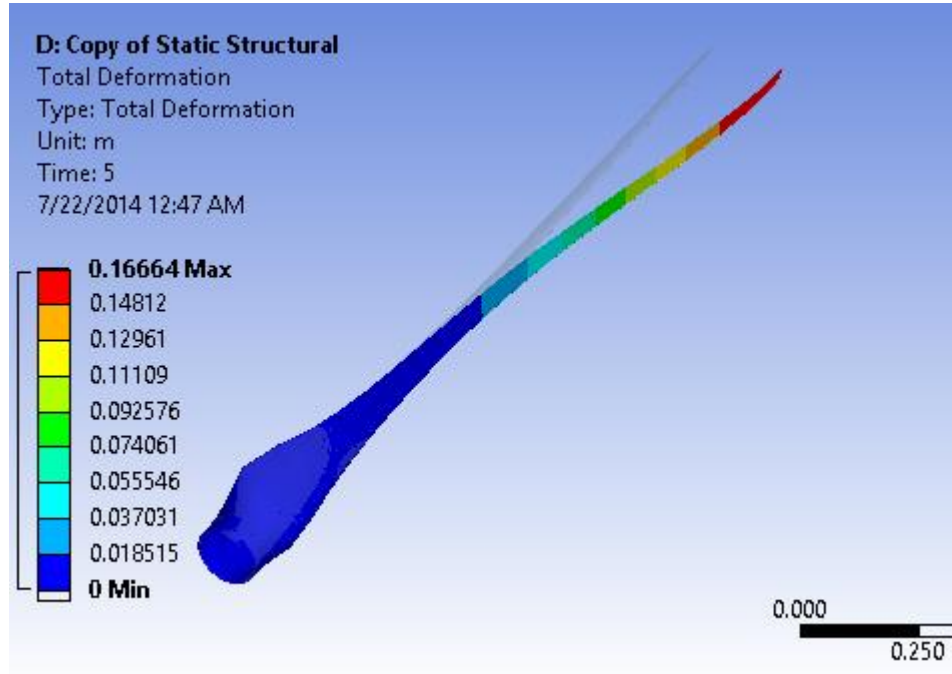
Bir yapıdaki düzlem dışı sertlik(out-of-plane stiffness) o yapıdaki düzlemsel gerilmeden(in-plane stress) etkilenir. Bu duruma gerilme sertleşmesi(stress stiffening) denir. Yani düzlemsel gerilme ile bu düzlemin dışındaki sertlik(transverse stiffness) arasında bir bağlantıdan söz etmek mümkündür. Bu olgu en çok ve belirgin olarak membran gibi yüksek gerilim altındaki ince yapılarda görülür.

ANSYS non-lineer çözüm için Newton-Raphson yönteminden yararlanır. Yükü kademe kademe uygular ve istenen yakınsama sağlanana kadar her bir yük adımında

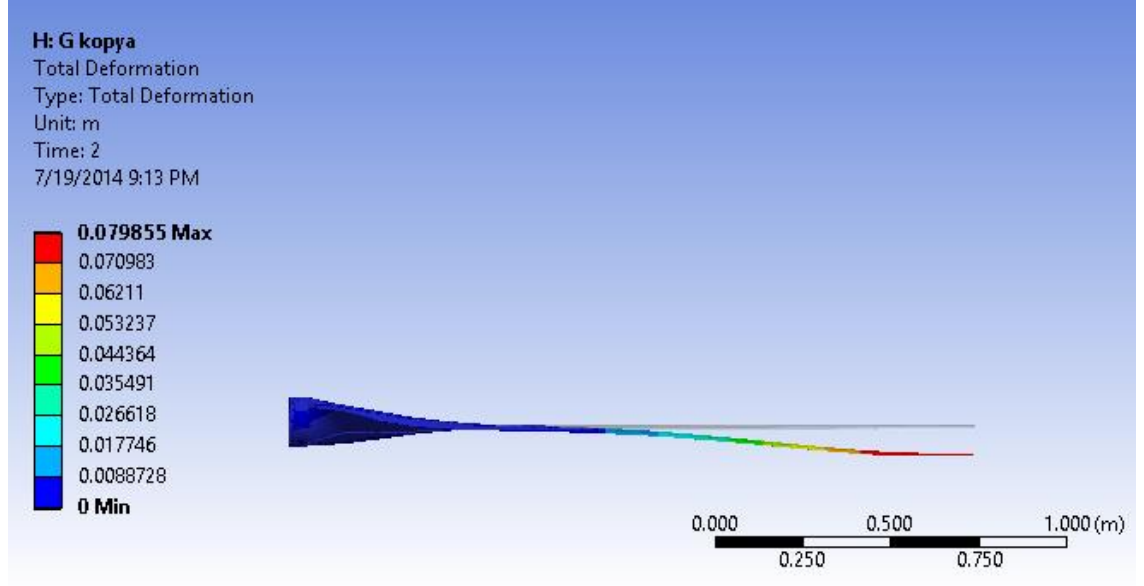
birçok alt çözüm elde eder. Bu alt çözümler lineer çözümlerdir. Ancak son çözümle varılan sonuç non-lineer çözümü ifade eder.

Bu tez çalışmasında incelenen kanat narin bir yapıdır, dolayısı ile de büyük eformasyonlar gösterir. Bu durumda analizin lineer yapılması ciddi hatalara neden olacağından analizin zahmetli olmasına rağmen non-lineer yapılması gerekir. ANSYS programında bunu sağlamanın yolu “Large deflection” algoritmasını aktive etmektir. Bu yapıldığında büyük deformasyonların yarattığı ağ elemanlarında yaşanan şekil ve oryantasyon değişimlerinin neden olduğu sertlik değişiklikleri dikkate alınır. Program sertlik matrisini sürekli güncelleyerek iteratif çözüm içinde iteratif çözüm elde eder.

Lineer ve non-lineer analiz sonuçlarındaki büyük farka dikkat çekmek için aşağıdaki şekillere bakmak yeterlidir. Görüldüğü gibi kanadın uç sehimini diğer tüm koşullar aynı tutularak yapılan lineer ve non-lineer analizlerde sırası ile 16,67 cm ve 7,99 cm olmuştur. Bu durumun gerilmelere de yansıtacağı muhakkaktır.



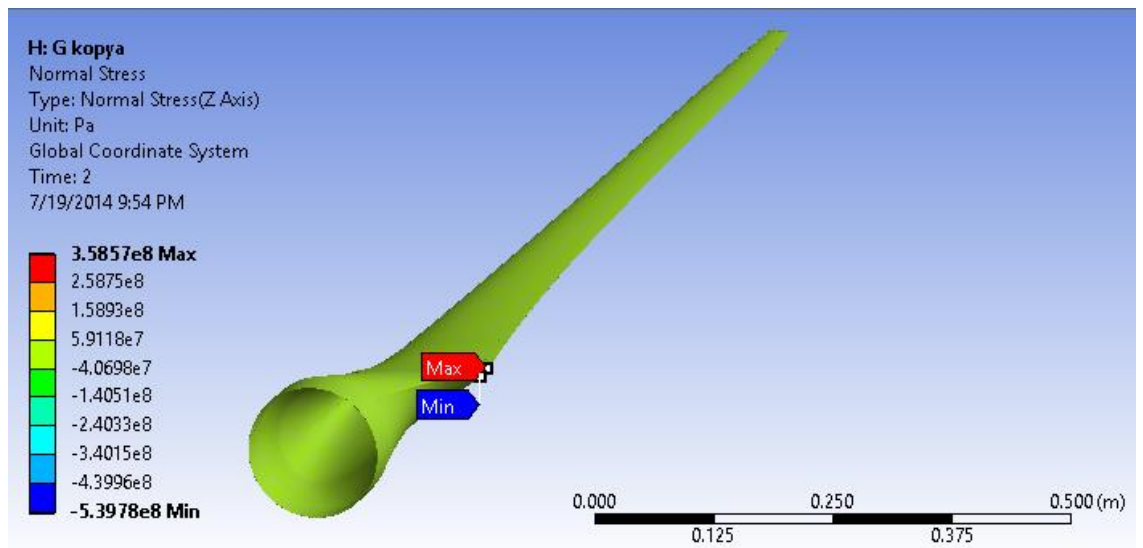
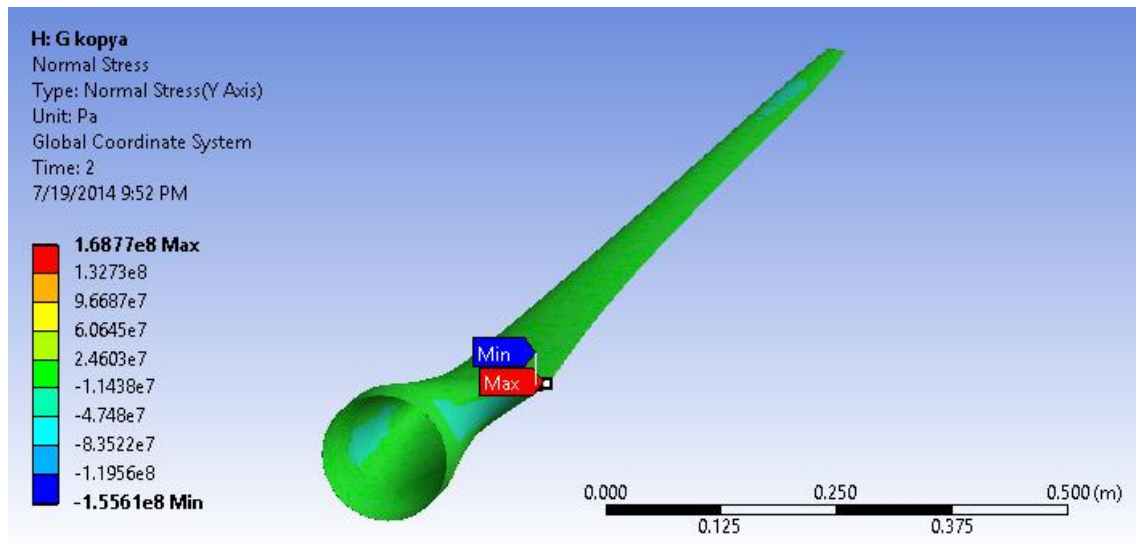
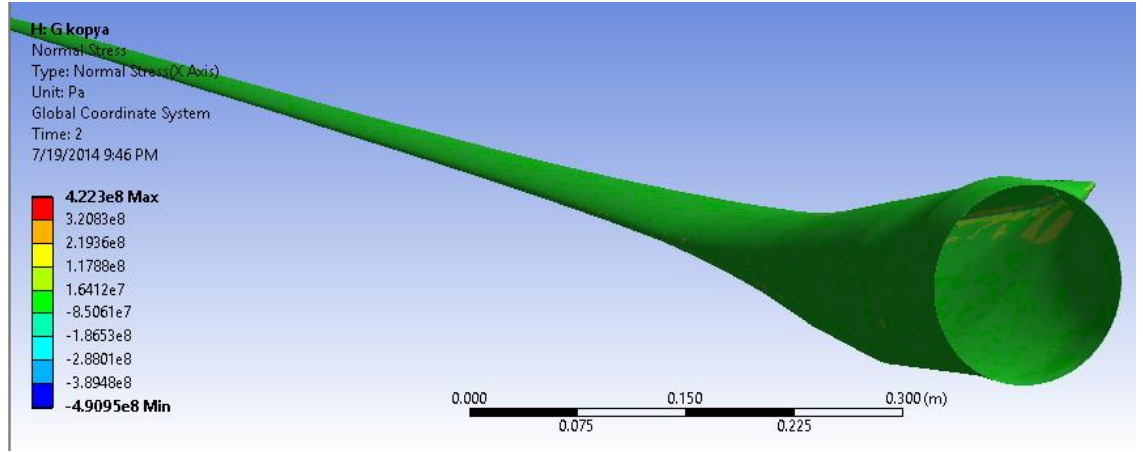
Şekil 4.31 Linner çözüm deformasyonu



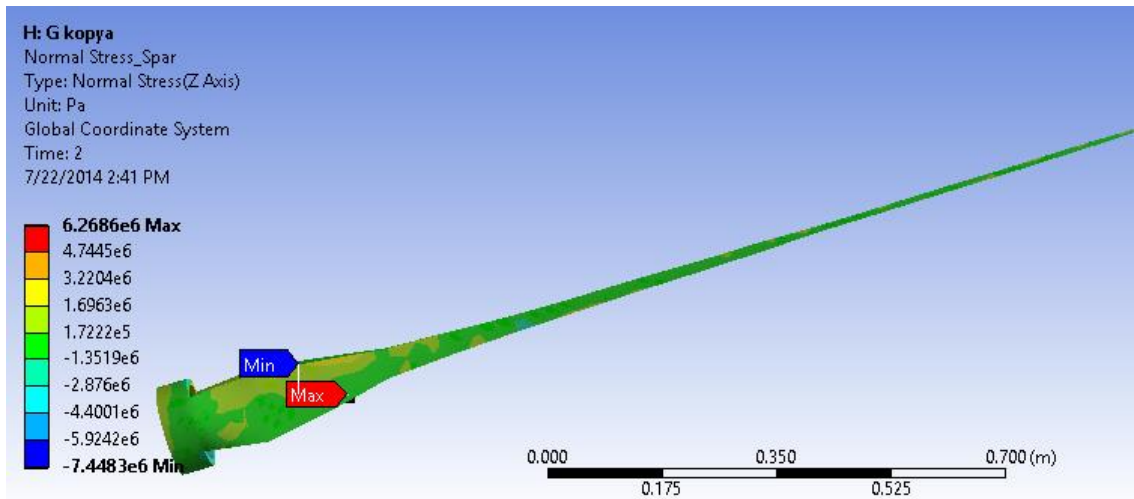
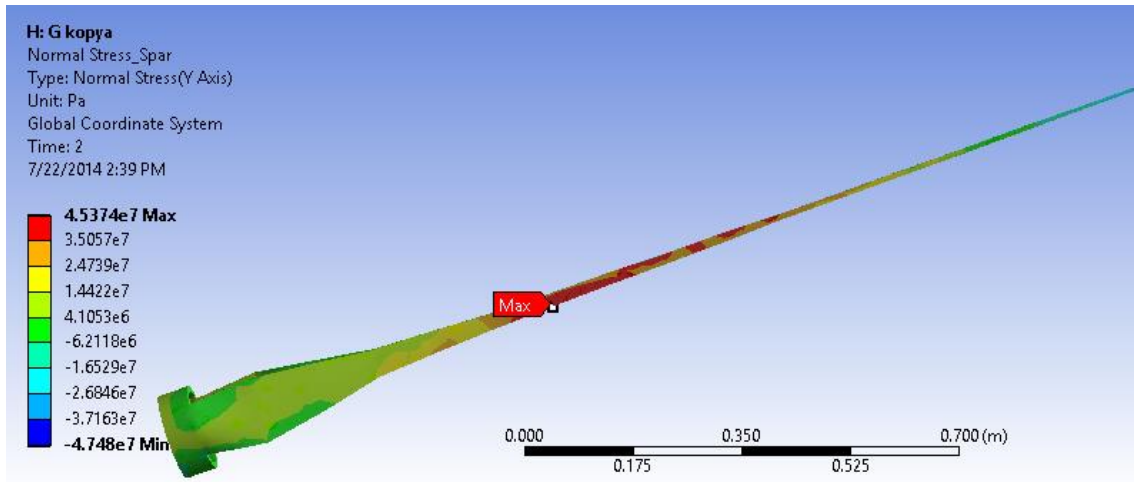
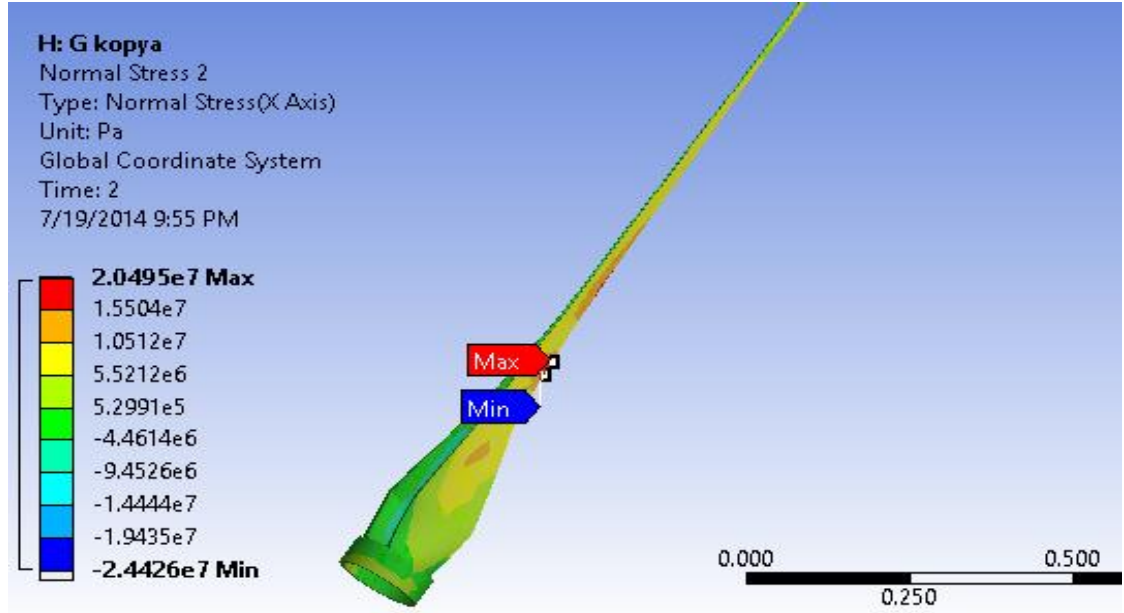
Şekil 4.32 Non-lineer çözüm deformasyonu

Aşağıda non-lineer analize ait çeşitli şekiller verilmiş sonuçlar özet olarak tablolar vasıtasıyla gösterilmiştir. Tablolarda kırmızı olarak yazılı değerler malzemenin dayanım sınırını göstermektedir. Görüldüğü gibi dış kabuktaki gerilme konsantrasyon noktaları hariç tutulacak olursa kanat mevcut yükleri rahatça taşıyabilmektedir. Yine yapılan analizlerde görülmüştür ki kanat üzerine etkiyen dominant yük basınç dağılımıdır. Kanadın hiç dönmediği durumda deplasman ve gerilmelerde hemen hiç değişim olmazken kanadın ağırlığının da etkisi oldukça sınırlıdır. Kanadın ağırlığının etkili olduğu yer çekimi yönünde kanat sehimini 0,83 cm olup bu değer basınç yükünün etkili olduğu yöndekinin yaklaşık % 10'u kadardır. Yine liner çözümler kıyaslandığında kanat dönmesinin olmadığı durumda kanat sehiminin 0,2 cm daha fazla olduğu ve 16,7 cm değerinden 16,9 cm değerine ulaştığı görülmüştür. Bu durum merkezkaç kuvvetinin deformasyon üzerindeki olumlu etkisini gösterirken aynı zamanda bu etkinin sınırlılığını da ortaya koymaktadır.

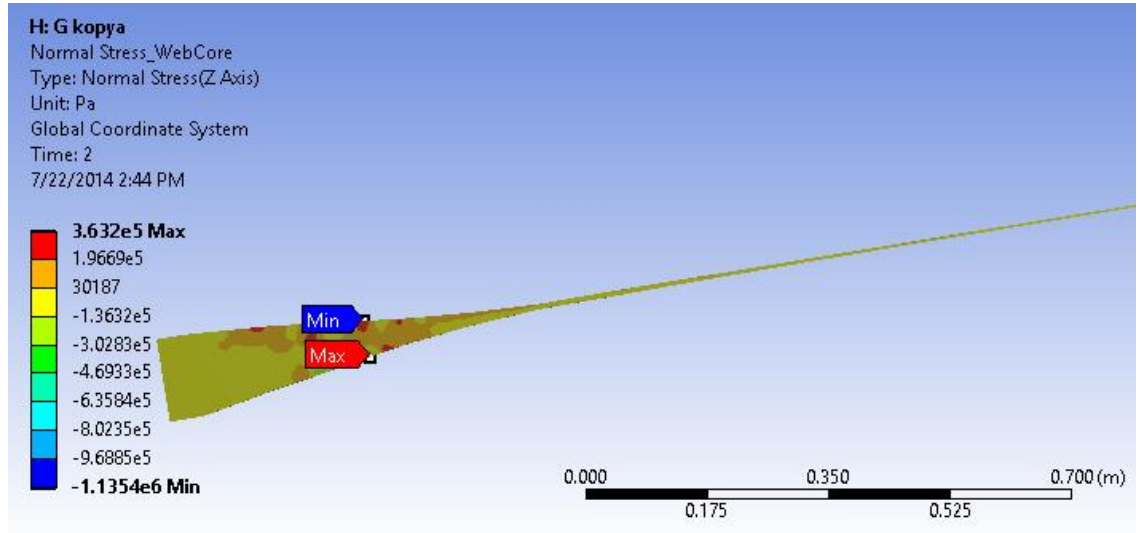
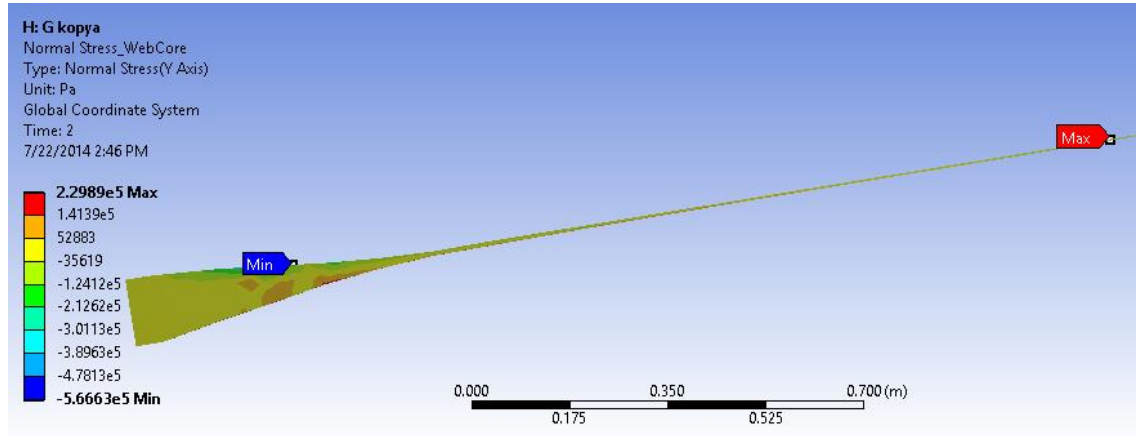
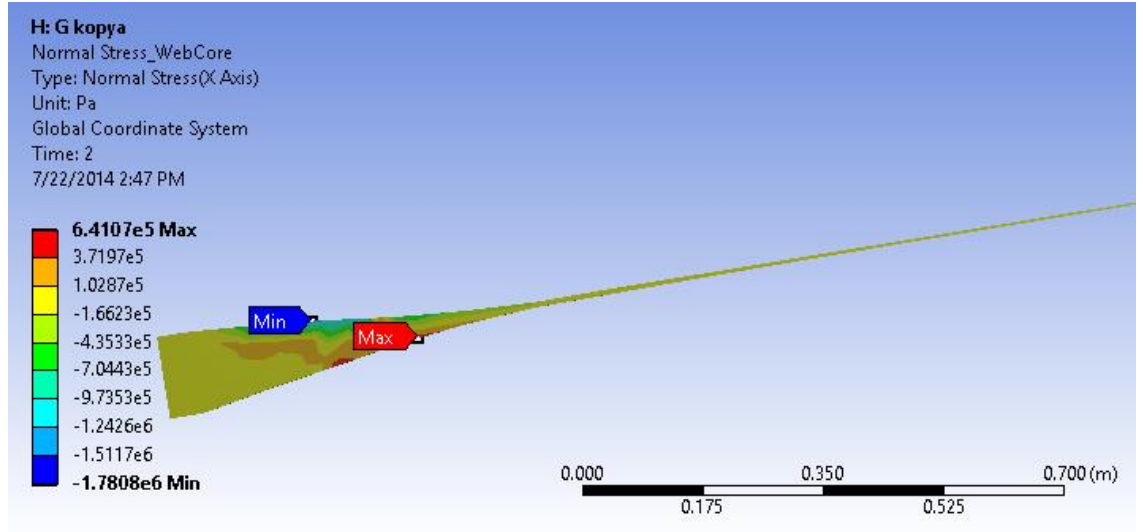
Analizin ağ yapısında 144 406 ağ elemanı toplamda 300 011 düğüm noktası ile birbirine bağlıdır. Bu sayı 2 metre uzunluğundaki bir kanat analizi için oldukça yeterlidir. Zira Cornell Üniversitesinde benzer bir çalışma için 15 000 ağ elemanı yeterli görülmüştür. (<https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/ANSYS+-+Wind+Turbine+Blade>)



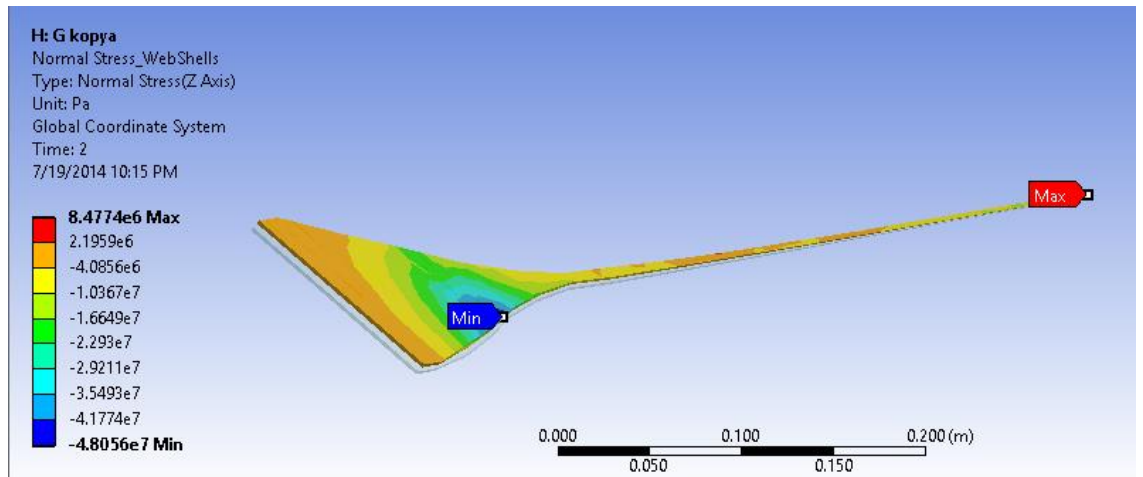
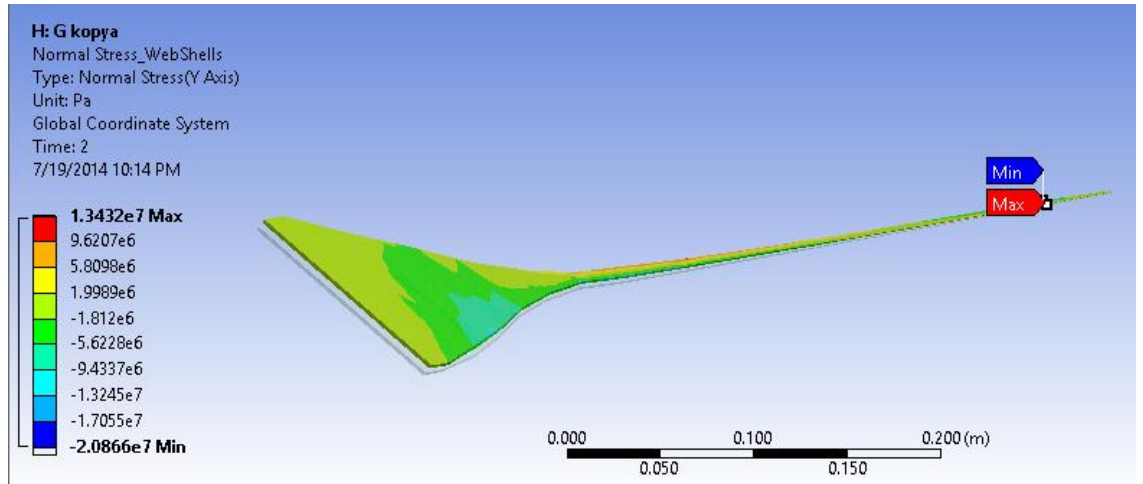
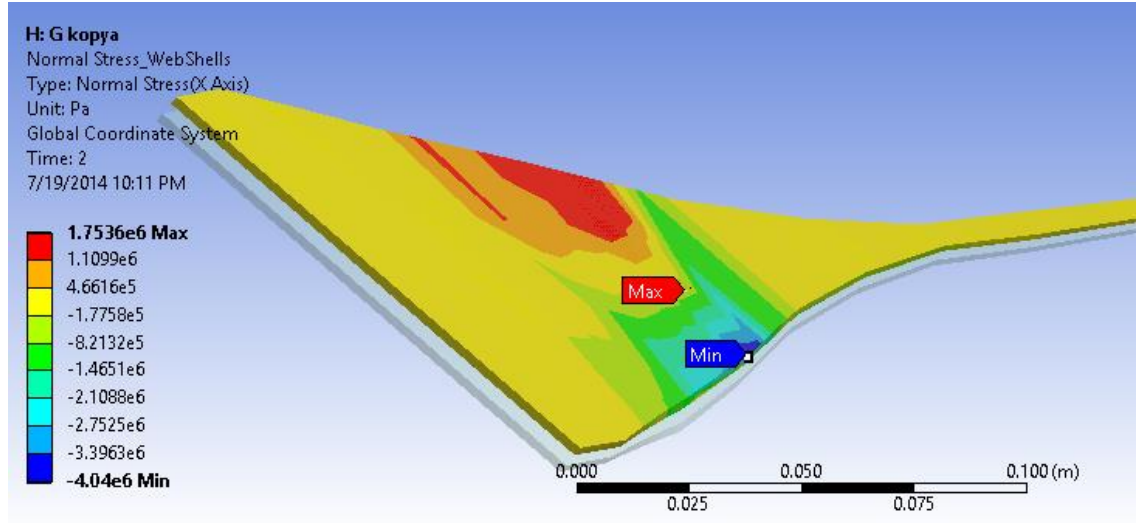
Şekil 4.33 Dış kabuk normal gerilme(X,Y,Z yönleri)



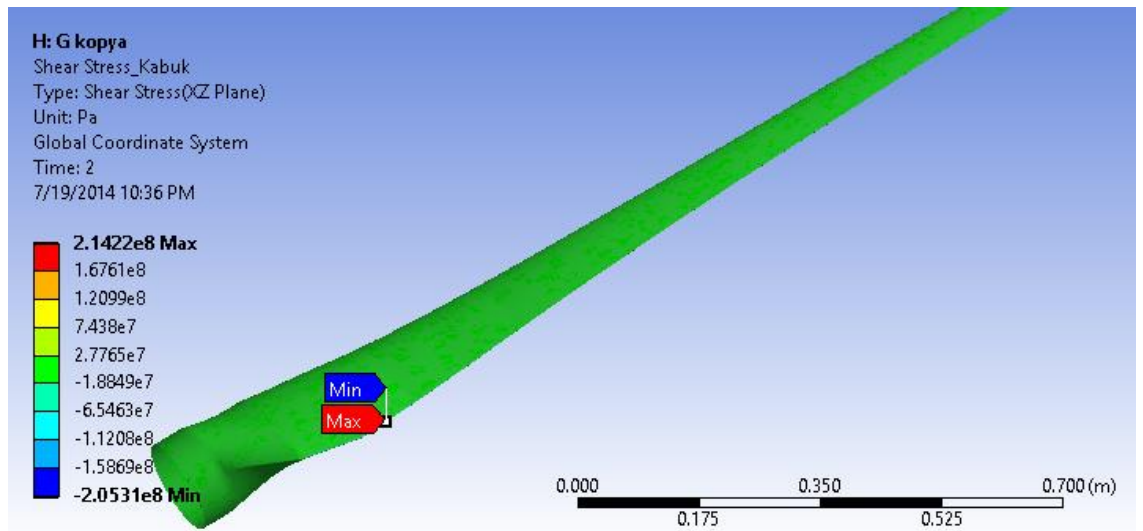
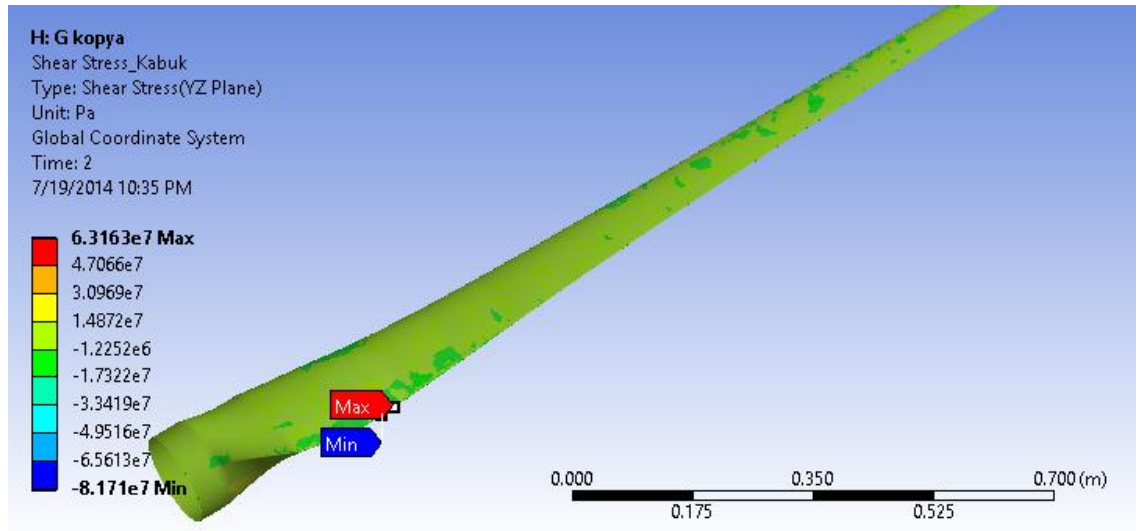
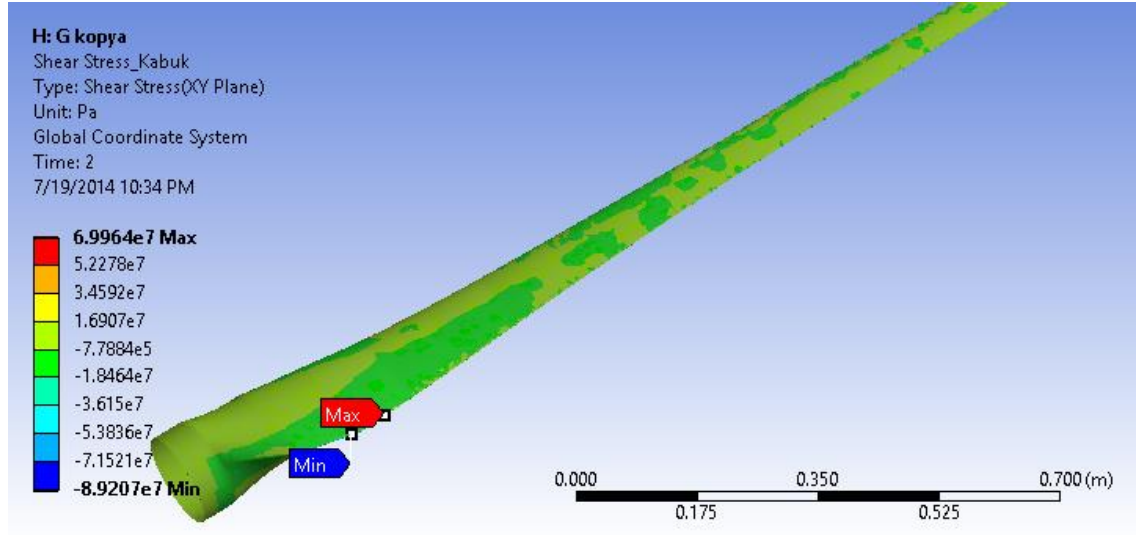
Şekil 4.34 Spar(flanş) normal gerilme(X,Y,Z yönleri)



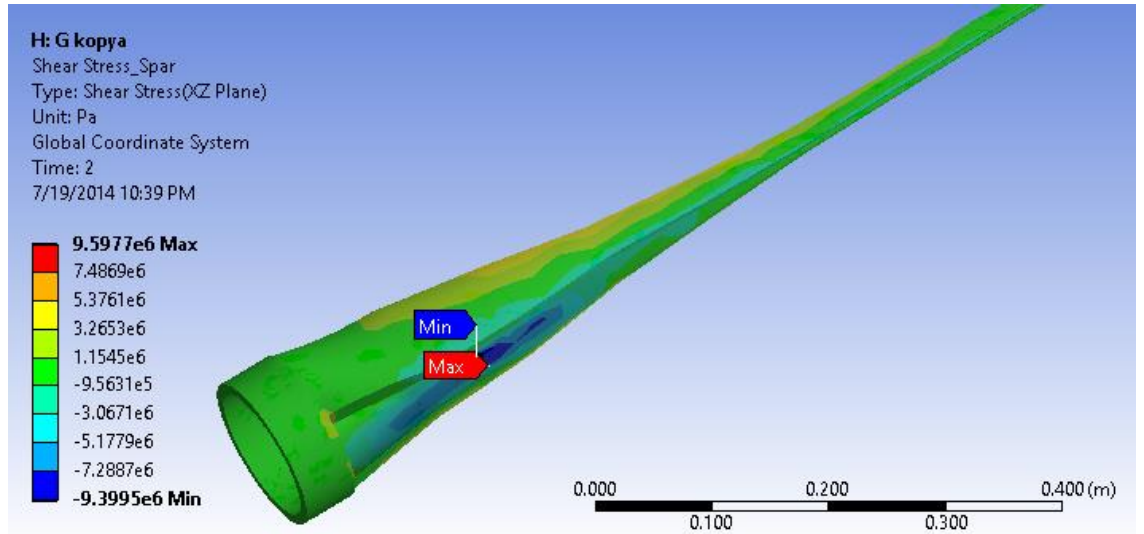
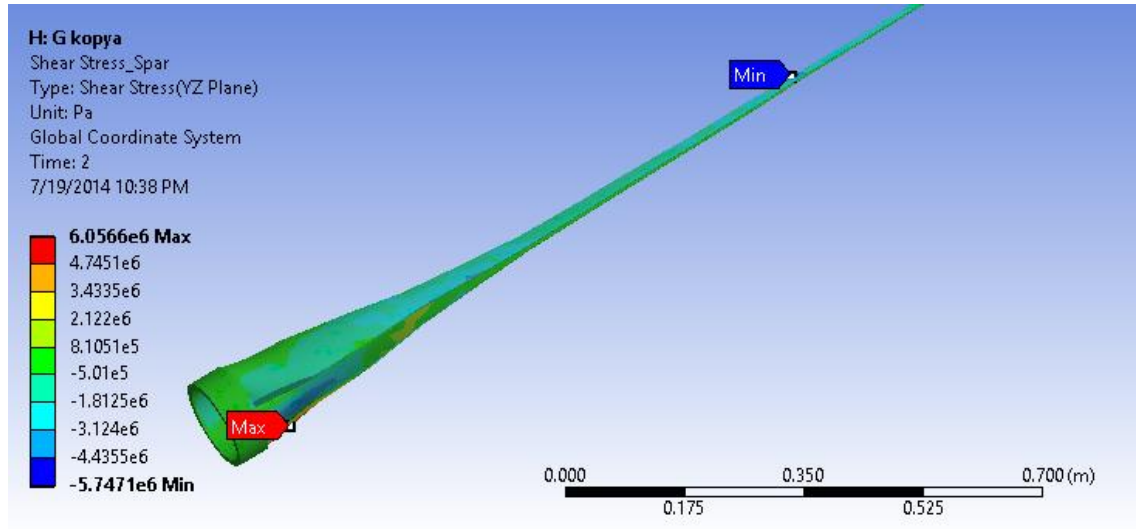
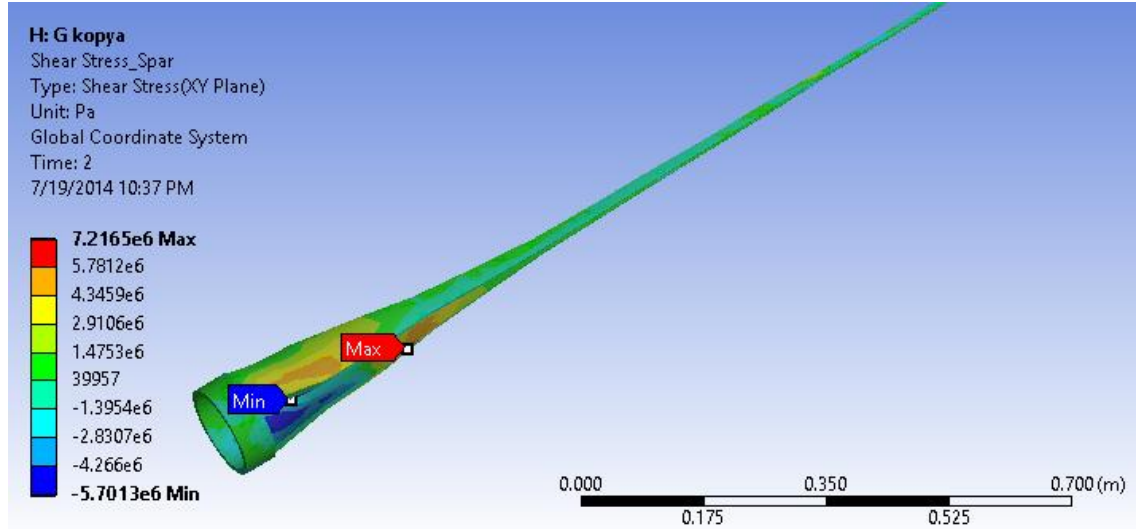
Şekil 4.35 Köpük(Webcore) normal gerilme(X,Y,Z yönleri)



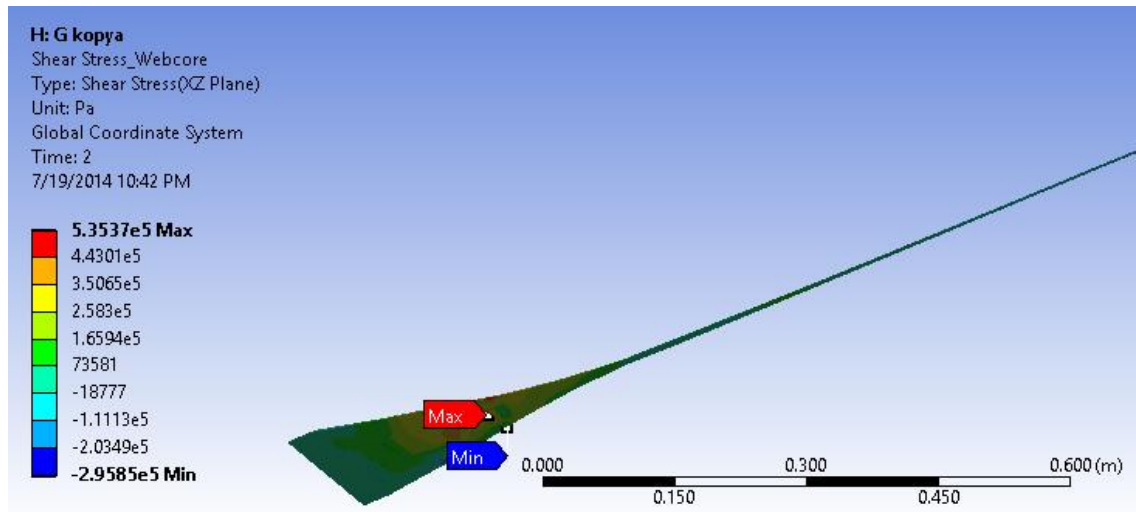
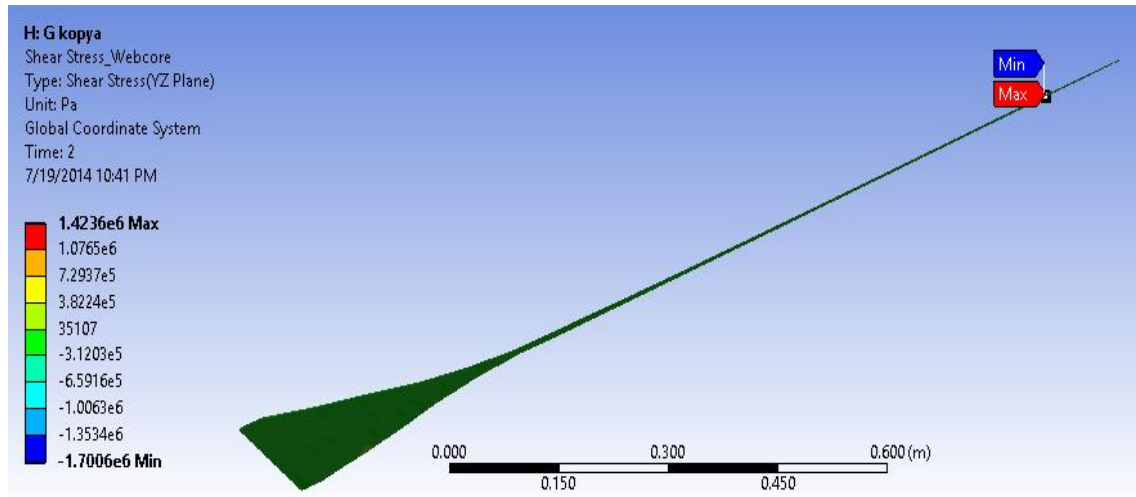
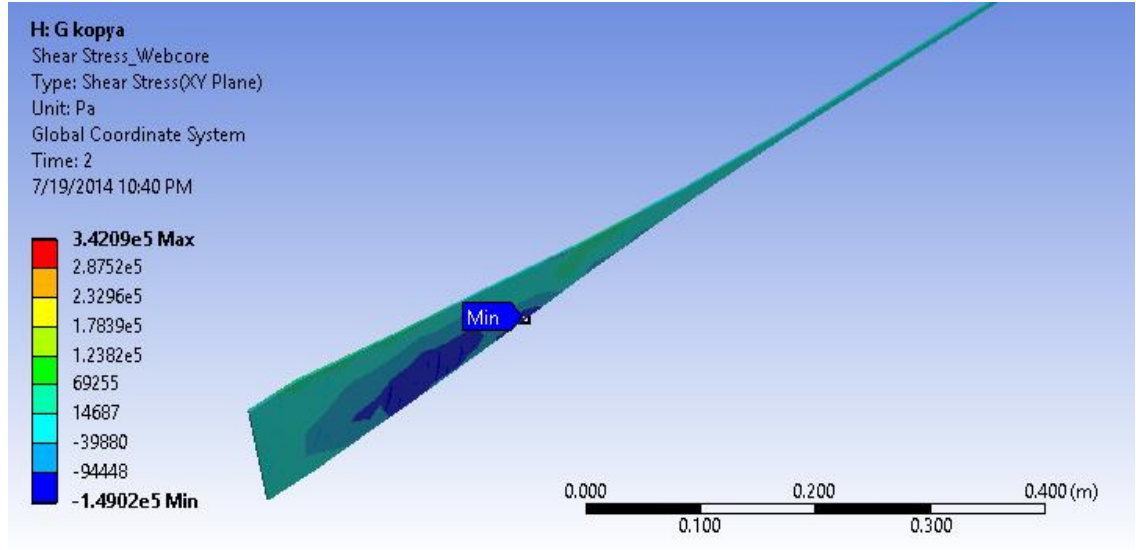
Şekil 4.36 Kesmeplakası(Webshell) normal gerilme(X,Y,Z yönleri)



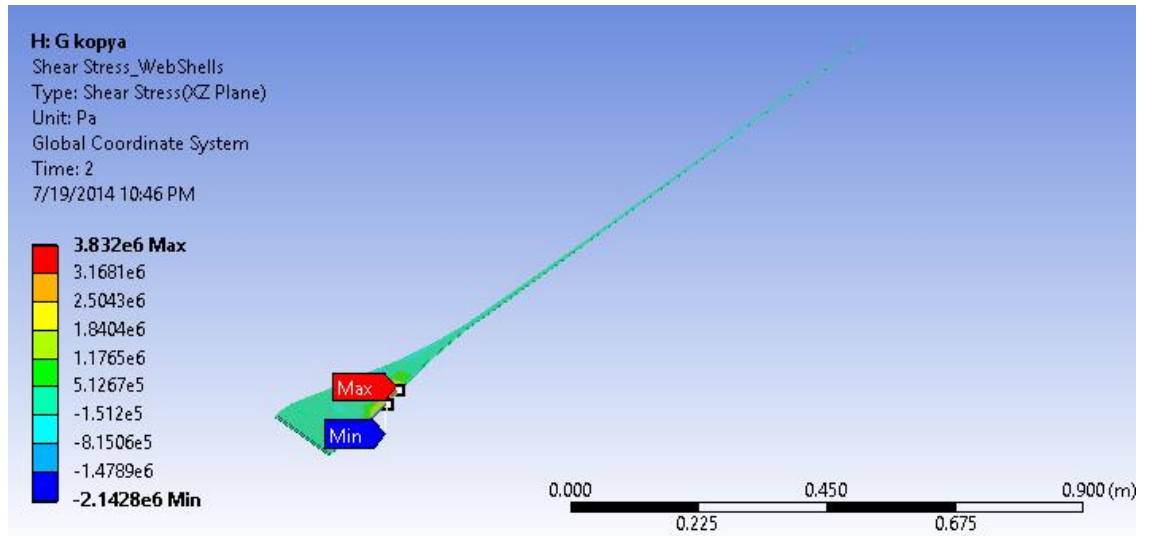
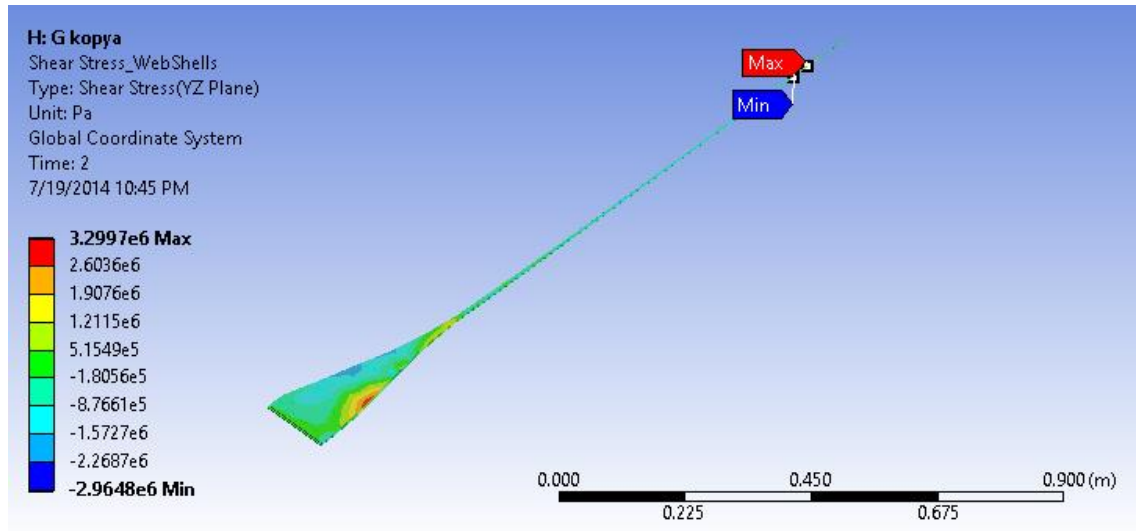
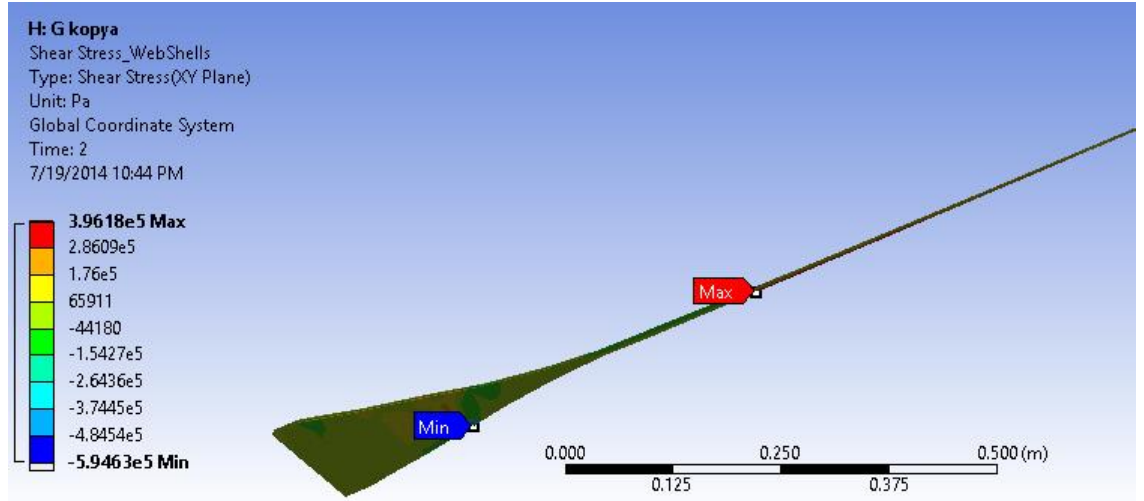
Şekil 4.37 Dışkabuk kesme(shear) gerilme(XY,YZ,XZ)



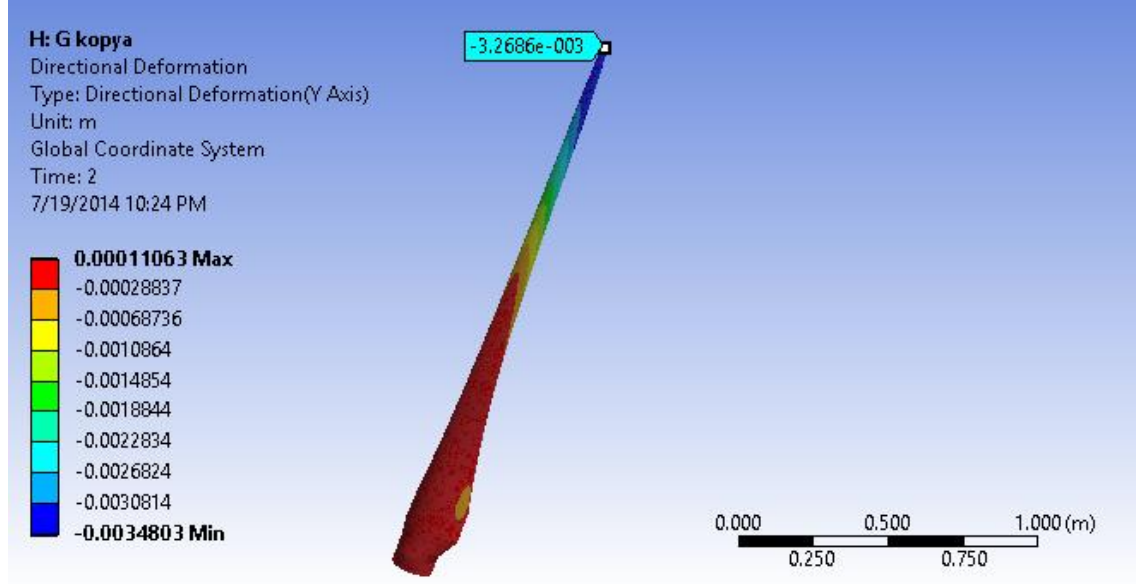
Şekil 4.38 Spar kesme(shear) gerilme(XY,YZ,XZ)



Şekil 4.39 Köpük kesme(shear) gerilme(XY,YZ,XZ)



Şekil 4.40 Kesmeplakası kesme(shear) gerilme(XY,YZ,XZ)



Şekil 4.41 Rotor yarıçap kısalması

Şekil 4.21’de görüldüğü gibi kanat Y ekseninde yalnızca 3,3 mm kısalmıştır. Kanat süpürme alanının değişmemesi ve kanat eğilmesinin çok az olması nedeniyle akışkan-yapı etkileşiminin tekrar edilmesine gerek görülmedi. Bu kararda ANSYS Mechanical çözücüsünün basınç yükünü yüzeye daima dik olarak alması da etkili oldu. Non-lineer olarak çözülen problemde çözüm birçok alt çözümün yakınsaması ile bulunmuştur. Her bir alt çözüm basamağında çözücünün ağ düğüm noktalarındaki değişimleri algılaması ve yüzey düğümlerinde basınç kuvvetini her zaman yüzeye dik alması sağlandı. Bu sayede bir nevi çoklu akışkan-yapı etkileşimi çözümü yapılmış olduğundanbulunan sonuçlar yeterli görülmüş ve prosedür burada kesilmiştir. Basınç yükündeki büyüklük ve yön değişimi deformasyonun az olması nedeniyle çok azdır, ayrıca yükün doğrultusu ANSYS Mechanical tarafından daima yüzeye dik olacak şekilde düzeltiltiğinden doğrultudaki değişim etkisi tamamen ortadan kalkmaktadır(Anonim, 2009c).

	Normal X MPa	Normal Y MPa	Normal Z MPa
Kabuk	(-85/+16) (-497/+337) (-491/+422)StrKons	(-47/+24) (-497/+337) (-156/+169)StrKons	(-40/+59) (-216/+147) (-540/+359)StrKons
WebShell	(-4,04/+1,75) (-216/+147)	(-20,9/+13,4) (-497/+337)	(-48,06/+8,48) (-497/+337)
WebCore	(-1,78/+0,65) (-4,29/+4,29)	(-0,56/+0,23) (-4,29/+4,29)	(-1,14/+0,36) (-4,29/+4,29)
Spar	(-24,4/+20,5) (-51,2/+51,2)	(-47,5/+45,4) (-788/+1005)	(-7,45/+6,27) (-51,2/+51,2)

Çizelge 4.8 Kanat kısımlarının normal gerilmeleri(siyah) ve malzemenin dayanım sınırları(kırmızı)

	Kesme XY MPa	Kesme YZ MPa	Kesme XZ MPa
Kabuk	16,9 115 89,2 StrKons	14,8 50 81,7 StrKons	27,7 50 214 StrKons
WebShell	0,6 50	3,3 115	3,8 50
WebCore	0,34 2,95	1,7 2,95	0,54 2,95
Spar	7,2 112	6,1 112	9,6 48,9

Çizelge 4.9 Kanat kısımlarının kesme gerilmeleri(siyah) ve malzemenin dayanım sınırları(kırmızı)

5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir;

- SST türbülans modelinin bir damla etrafındaki akışı akışın ayrılmasından önceki durumlar için başarılı bir biçimde simüle edebileceği doğrulanmıştır. Ayrıca akışın aşağı yukarı hangi hücum açısında ayrılacağı da tahmin edilebilmektedir.
- Basınç katsayıları aracılığı ile damlanın etrafındaki basınç ve hız dağılımı gösterilmiştir.
- Dönen bir rüzgar türbin kanadının etrafındaki akış araştırıldı. Bu yapılırken periyodiklik konsepti sayesinde tüm rotor için bilgi elde edildi. Kanat boyunca dört kesit alındı ve her biri için basınç-hız dağılımı incelendi.
- Türbinin güç üretimi hesaplandı. CFD modeli ile PEMT modelinin sonuçları kıyaslandı. Sonuçların birbirine yakın olduğu görüldü. Kanadın etrafındaki 3-boyutlu etkilerin sonucu değiştirdiği ve bu nedenle analizlerde CFD sonuçlarına muhakkak başvurulması gerektiği görüldü.
- Doğru ağ elemanı yapısının ve modelin doğru çözüm için önemi gösterildi. Linner ve non-lineer çözümlerin sonuçları ne denli etkileyebileceği doğrulandı.
- Akışkan-yapı etkileşimin kanat tasarımıdaki önemi açıklandı. Birbirleriyle olan etkileşimlerinin tasarımın kademe kademe ilerlemesindeki yeri görüldü. Yapılan tasarımda verili akış hızı için deformasyonun çok az olduğu simülasyon sonuçları ile elde edildi.
- Aerodinamik tasarımı yapılan bir kanadın yapısal tasarımı yapıldı. Kanatta yük kaynakları ve bu yükleri karşılayacak elemanların neler oldukları, hangi özelliklere sahip olmaları gerektiği açıklandı.

- Kompozit malzemelerin tasarımdaki önemi gösterildi. Bu malzemelerin kanat tasarımındaki hayati rolleri açıklandı.
- Merkezkaç kuvveti ile kanat kütlesinin yapısal tasarımdaki sınırlı önemi görüldü. Kanat üzerindeki asıl yükün basınç dağılımı olduğu görüldü. Merkezkaç kuvvetinin kanat sehimindeki olumlu rolü gösterildi.
- Kanatta elde edilen gerilme sonuçlarına bakıldığında tasarımın bir stress konsantrasyon noktası haricinde başarılı olduğu görüldü. Bu sorun kolaylıkla aşılabilecek bir sorun olduğundan analizlerin yinelenmesine gerek görülmedi.
- Tasarım aerodinamik verim ve kütle yönünden Almanya üretimi gerçek bir türbin ile kıyaslandı. Buna göre tasarımın aerodinamik yönden daha iyi olduğu görüldü. Ancak bu tez çalışmasında yapılan tasarımın ağırlık yönünden daha geride olduğu(daha ağır olduğu) da görüldü. Bu durumun tasarımın tüm akış koşullarında simüle edilememesinden dolayı güvenli tarafta kalmak adına kök kısmında fazla malzeme kullanılmasından ileri geliyor olabileceği tahmini yapıldı.

Daha ileride yapılacak bir çalışmada kanadın fonksiyon göstereceği rüzgar hızlarının tamamı için akışkan-yapı etkileşiminin yapılması ve güç eğrisinin oluşturulması, kanadın fonksiyon dahi göstermediği fırtına gibi en kötü senaryolarda yapısal sağlamlığının doğrulanması gerekmektedir. Ayrıca farklı malzemeler kullanılarak yapılan tasarımlar da denenmeli ve malzeme, aerodinamik verim ile yapısal sağlamlık parametrelerinde tüm rüzgar hızları ve güvenlik kriterleri düşünülerek optimizasyona gidilmelidir.

KAYNAKLAR

Anonim, 2013a. BP Energy Outlook 2013

Anonim, 2013b. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı,Mavi Kitap, Ankara, 2013

Anonim, 2013c. Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, Sektör Değerlendirme Raporu, Ankara, 2013

Anonim, 2013d. Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, Sektör Değerlendirme Raporu, Ankara, 2013

Anonim,2014. Web sitesi (<http://www.limitsizenerji.com/haberler/makaleler/933-bir-ruzgar-turbininin-anatomisi>)

Anonim, 2009a. ANSYS CFX, Solver Manual V13

Anonim, 2012. Gurit Materials for Wind Turbine Blades

Anonim, 2009b. ANSYS CFX, Theory Booklet, V13

Anonim, 2009c. ANSYS Mechanical Teory Manual, V13

Anonim, 2013e. QBlade Guidelines

Akgün, M., 2012. “Static Aeroelastic analysis of a Generic Slender Missile Using a Loosly Coupled Fluid Structure Interaction Method”

Anderson, John D., 2004. Introduction to Flight, McGraw-Hill Series

Bai, 2013. Advanced FRP Composites for Structural Applications ,Syf 74

Betz, A., 1926. Windenergie und Ihre Ausnutzung durch Windmüllen

EWEA (2009) The Economics of Wind Energy. European Wind Energy Association, Brussels.

Glauert,H.,1935. Airplane Propellers, Springer Berlin Heidelberg Verlag

Hansen M. O. L.,2008. Aerodynamics of Wind Turbines, Earthscan Publications

Hau, E.,2000. Large Wind Turbines: Design and Economics. John Wiley & Sons, Ltd,Chichester

Hibbeler, R.C., 2011. Mechanics of Materials, 8th Edition

Ladson, C. L., Hill, A. S., and Johnson, Jr., W. G., 1987. "Pressure Distributions from High Reynolds Number Transonic Tests of an NACA 0012 Airfoil in the Langley 0.3-Meter Transonic Cryogenic Tunnel," NASA TM 100526

Lutum,E., 2009. “Aerothermal predictions on a highly loaded turbine blade including effects of flow separation”

Maier-Staude, R.,2006. Wind Turbine Modeling using ANSYS

Mallick, 2008. Fiberreinforced Composites Materials, Manufacturing, and Design, CRC Press Book.

Manwell, J.F.,2010. Wind Energy Explained:Theory, Design and Application, Wiley Press

Miley, S. J. (1982). A Catalog of Low Reynolds Number Airfoil Data for Wind Turbine Applications. Rockwell Int.Rocky Flats Plant RFP-3387, NTIS.

Prandtl, L., 1952. Essentials of Fluid Dynamics, Hafner Publications, New York

Salman, H. E., 2012. “Investigation of Fluid Structure Interaction in Cardiovascular System from Diagnostic and Pathological Perspective”

Schilling, R.,2012. “Wind Energy Course”, Lecture notes, International Hellenic University, Greece

Tennekes, H., 1972. A First Course in Turbulence, MIT Press

Yaşaroğlu, B., 2014. <http://busrayasaroglu.wordpress.com/2012/11/07/kuresel-isinma-co2-salinimi/>

EK 1 NAVIER-STOKES DENKLEMLERİ

Bu tez çalışmasında kullanılan CFX programı daha önce de belirtildiği üzere Navier-Stokes denklemlerini sayısal olarak çözen bir yazılımdır. Zaten en temel akış problemleri dışında(düz bir plakanın üstündeki akış gibi) bu denklemlerin analitik çözümleri de mevcut değildir. Ancak aydınlatıcı olması için bu denklemler kısaca açıklanacaktır.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x$$

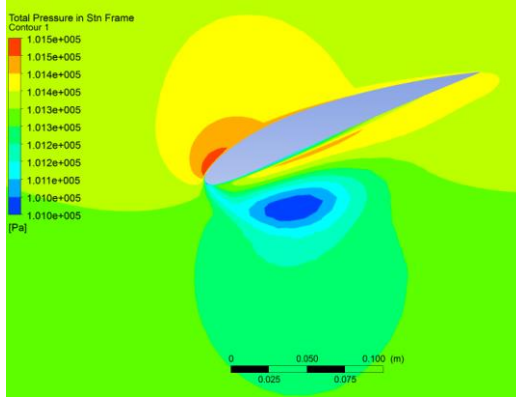
$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z$$

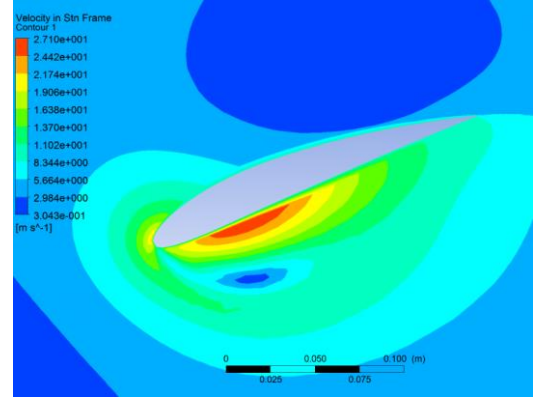
Bu dörtlü denklem seti beraberce Navier-Stokes denklemleri olarak anılırlar. İlk denklem süreklilik denklemi, diğer üç denklem ise momentum denklemleridirler. Bu denklem seti sıkıştırılamaz akışlar için geçerlidirler.

Süreklilik denklemi dx,dy ve dz ebatlarındaki sonsuz küçük bir kutuda net kütle akışının sıfır olduğunu belirtir. Momentum denklemleri ise Newton'un ikinci kanununun akışkan içindeki sonsuz küçük bir hacme sırası ile x, y ve z doğrultularında uygulanmasından doğarlar. Momentum denklemlerinin sol yanı atalet(inertial) kuvvetlerini sağ yanı ise basınç, sürtünme(viskos) ve diğer kuvvetleri(ağırlık gibi) belirtir.

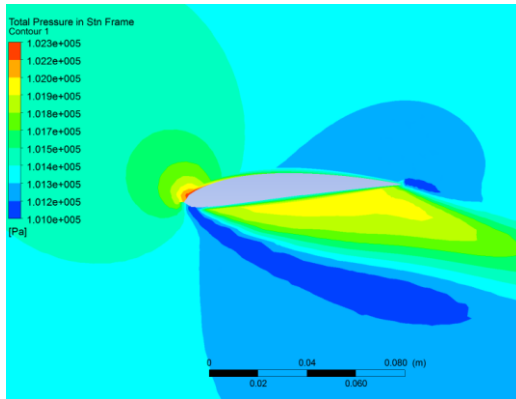
EK 2 BAZI KANAT KESİTLERİNDE BASINÇ VE HIZ DAĞILIMI İLE C_p EĞRİLERİ



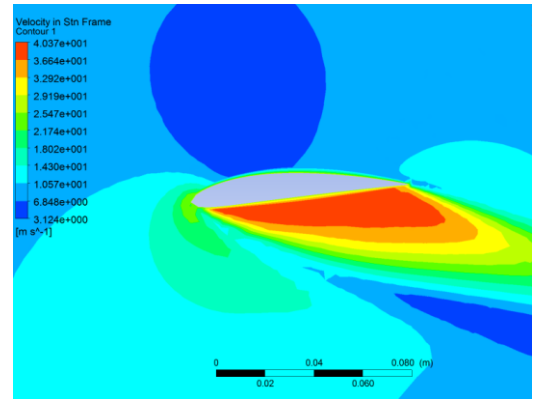
Şekil Ek2.1 Kesit 0,3m (Basınç Dağılımı)



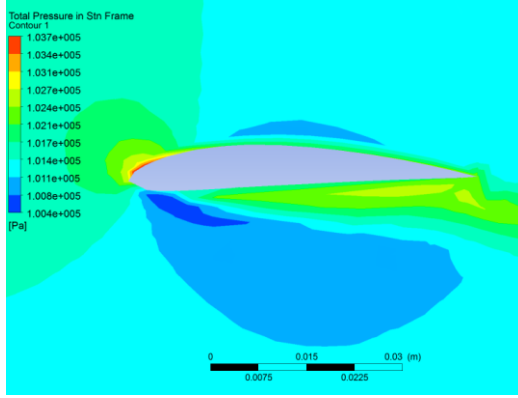
Şekil Ek2.2 Kesit 0,3m (Hız Dağılımı)



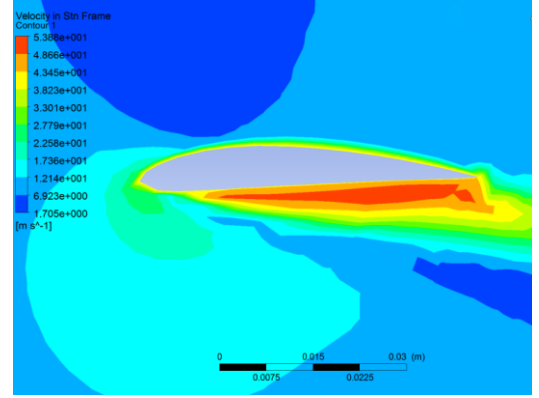
Şekil Ek2.3 Kesit 0,8m (Basınç Dağılımı)



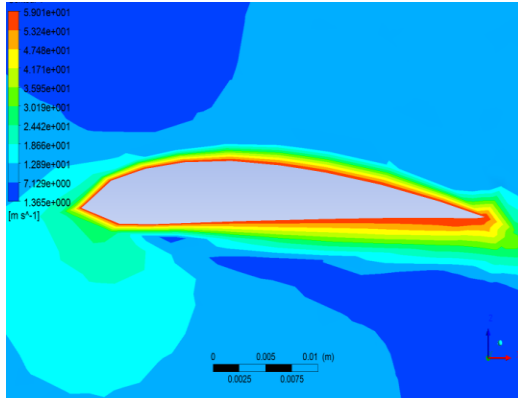
Şekil Ek2.4 Kesit 0,8m (Hız Dağılımı)



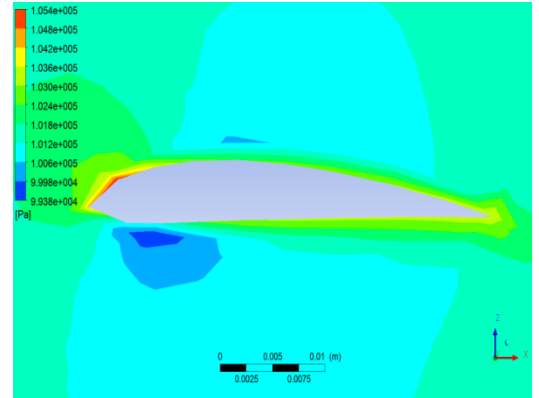
Şekil Ek2.5 Kesit 1,3m (Basınç Dağılımı)



Şekil Ek2.6 Kesit 1,3m (Hız Dağılımı)



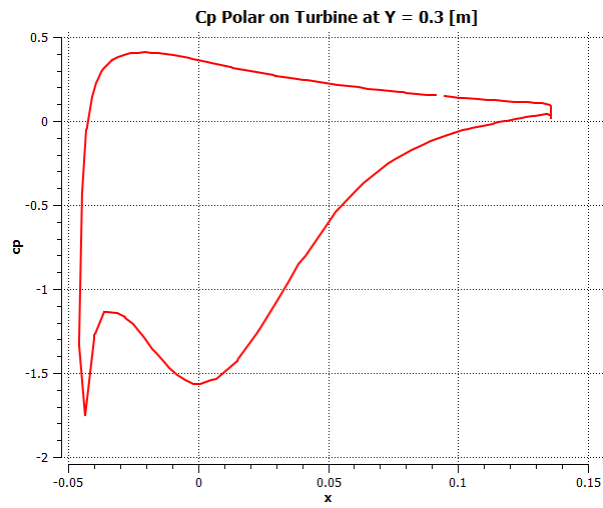
Şekil Ek2.7 Kesit 1,8m (Basınç Dağılımı)



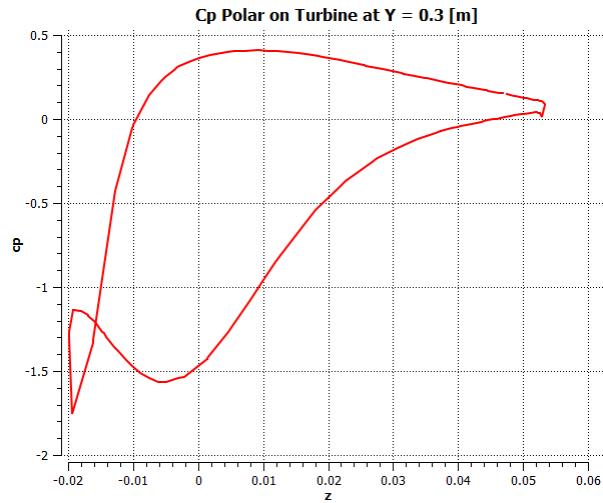
Şekil Ek2.8 Kesit 1,8m (Hız Dağılımı)

C_p yani basınç katsayısı, basınç alanı içinde lokal bir noktadaki statik basıncın serbest akışın statik basıncı ile olan farkının serbest akışın dinamik basıncına bölünerek elde edilen birimsiz bir parametredir.

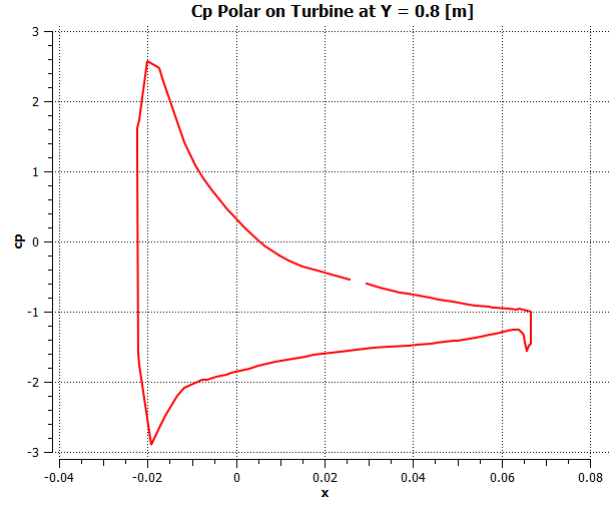
Çoğu aerodinamik durum için yapıya yakın bir noktadaki basınç katsayısı yapının büyüklüğünden bağımsızdır. Bu nedenle prototipler rüzgar tüneinde test edilirken bu katsayılar da not edilir. Bu sayede asıl yapının kritik noktalarındaki basınç dağılımı bilindiğinden tasarım daha güvenli bir hale getirilebilir.



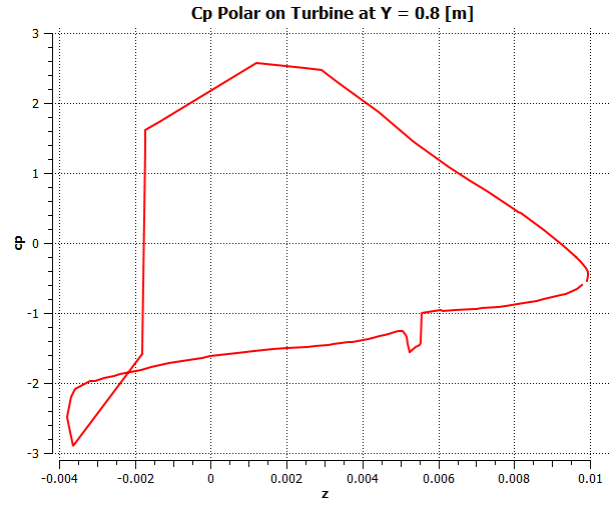
Şekil Ek2.8 C_p - X eksen



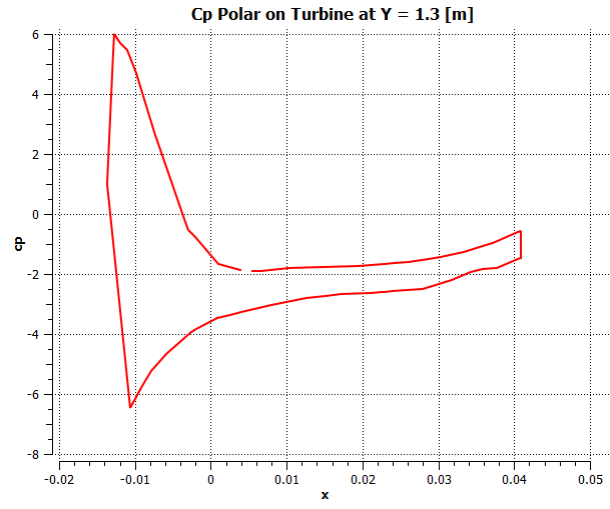
Şekil Ek2.9 C_p - Z eksen



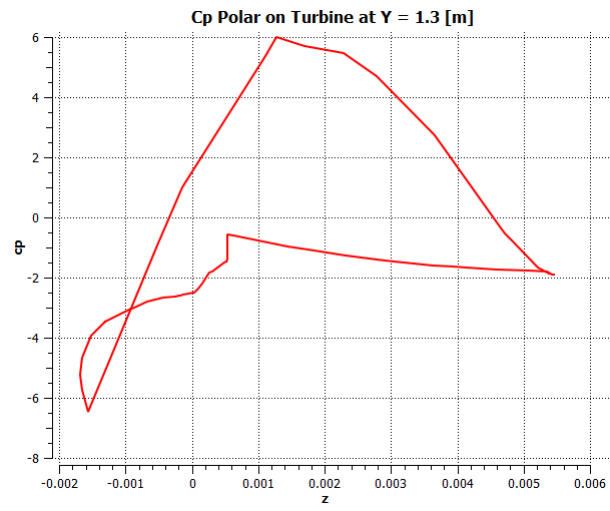
Şekil Ek2.10 C_p - X eksen



Şekil Ek2.11 C_p - Z eksen



Şekil Ek2.12 C_p - X eksen



Şekil Ek2.13 C_p - Z eksen

ÖZGEÇMİŞ

Kamer DOĞAN 1984 yılında Erzincan’da doğdu. İlköğrenim ve lise eğitimini Bursa’da tamamladı. Lise eğitimini Bursa Anadolu Lisesi’nde tamamladıktan sonra ODTÜ Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği bölümünü bitirdi. Lisans eğitiminin ardından kısa bir süre FİAT Grup bünyesinde AR&GE departmanında tasarım mühendisi olarak çalıştı. AB Bakanlığı Jean Monnet bursiyeri olarak Yunanistan’da yenilenebilir enerji konusunda Mastır derecesi aldı. 2011 yılından bu yana İller Bankası’nda Teknik Uzman Yardımcısı olarak çalışmakta ve Boğaziçi Üniversitesi’nde Biyomedikal Enstitüsü’nde doktora eğitimine devam etmektedir.