

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EĞİLME-BURULMA BAĞLAŞIMLI RÜZGÂR
TÜRBİNİ PALA TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Uçak Müh. Serhat YILMAZ**

Anabilim Dalı : UÇAK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ

Programı : UÇAK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

**EĞİLME-BURULMA BAĞLAŞIMLI RÜZGÂR TÜRBİNİ
PALA TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Uçak Müh. Serhat YILMAZ
(511041040)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Haziran 2008**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Süleyman TOLUN
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Metin Orhan KAYA (İ.T.Ü.)
Doç.Dr. Erol ŞENOCAK (İ.T.Ü.)**

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Çok severek ve ilgi duyarak rüzgâr enerjisi üzerine çalışmayı seçmiş olmama rağmen, çalışmalarım süresince yaşamış olduğum zaman ve sonuçlarla ilgili sıkıntılı durumlarda benden umudunu kesmeyen ve yol gösteren sayın danışmanım Prof. Dr. Süleyman TOLUN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yaptığım tüm çalışmalar boyunca yanımda yer alan ve bu konu hakkında oluşan bilgi birikimimde büyük pay sahibi olan Utku TÜRKYILMAZ'a, bu tezin hazırlanmasında büyük emeği olan ve bana her zaman destek ve moral veren Saliha Banu YÜCEL'e, yine yardımlarını unutamayacağım Mehmet Suat KAY'a, rüzgâr enerjisine olan ilgimi ve sevgimi her zaman dinç tutmamı ve daha da artırmamı sağlayan RESTEK proje grubu üyelerine ve bana rahat bir çalışma ortamı sağlayan 211 numaralı oda mensubu mesai arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, benden hayatım boyunca hiçbir desteği esirgemeyen, her koşulda yanımda olan çok sevgili aileme sonsuz teşekkür ve minnettarlığımı sunarım.

Bizim olan bu güzel dünyanın değerini bilip, ondan her zaman daha temiz ve daha bilinçli bir şekilde yararlanabilmemiz dileklerimle...

Aralık 2007, İstanbul

Serhat YILMAZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa Numarası</u>
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1 GİRİŞ	1
1.1 Rüzgâr Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi	2
1.2 Esnek Yapılı Pala Çalışmalarının Tarihsel Gelişimi	3
1.3 Çalışma Kapsamı	5
2 RÜZGÂR ENERJİSİ ÇEVİRİMİ	7
2.1 Enerji Kaynağı Olarak Rüzgârın Özellikleri	7
2.2 Rüzgâr Türbinine Etki Eden Kuvvetler	7
2.3 Rüzgâr Gücünün Değişkenleri	9
3 PALA ELEMANI MOMENTUM KURAMI (PEMK)	14
3.1 Momentum Kuramı	15
3.2 Pala Elemanı Kuramı	17
3.3 Pala Elemanı Momentum Kuramı (PEMK)	19
3.3.1 Uç Etkileri (Prandtl Uç Kaybı Düzeltmesi)	20
3.3.2 Kök Etkileri (Prandtl Göbek Kaybı Düzeltmesi)	21
3.3.3 Çalkantılı İz Durumu (Glauert Düzeltmesi)	21
3.3.4 Uç Hız Oranının Belirlenmesi	23
3.3.5 Genel PEMK Algoritması	23
4 ESNEK YAPILI PALA KAVRAMI	25
4.1 Esnek Yapılı Pala Özellikleri	25
4.1.1 Elastik Bağlaşım	26
4.1.1.1 Sadece Kabuk Malzemesinin Çapraz Yönelimli Malzemelerden Oluşması	27
4.1.1.2 Sadece Pala Kirişi Malzemesinin Çapraz Yönelimli Malzemelerden Oluşması	27
4.1.1.3 Sadece Pala Kirişi Malzemesinin Çapraz Yönelimli Malzemelerden Oluşması	27
4.1.1.4 İndüklenmiş Burulmanın Aerodinamik Başarım Üzerine Etkileri	27
4.2 Esnek Yapılı Pala Çeşitleri	28
4.3 Esnek Yapılı Pala Kullanımının Yarar ve Sakıncaları	29
4.3.1 Yararları	29
4.3.2 Sakıncaları ve Önlemleri	29
5 BAĞLAŞIMLI PALA GEOMETRİK VE YAPISAL TASARIMI	31
5.1 Pala Geometrisi	31

5.2	Pala Kesidi	33
5.3	Yapılan Çalışma	34
5.3.1	Kullanılan Yöntem	35
5.3.2	Tasarım Girdileri	35
5.3.3	Kesit Aerodinamik Özellikleri	37
5.3.4	PEMK Modeli Oluşturulması	38
5.3.5	En İyi Pala Geometrisinin Belirlenmesi	39
5.3.6	Tasarım Yükleri	39
5.3.7	Malzeme Belirlemesi	40
5.4	Yapısal Analiz	45
5.4.1	Modal Analiz	46
5.4.2	Statik Analiz	47
5.4.2.1	Aerodinamik Kuvvetler Etkisi Altındaki Analiz	47
5.4.2.2	Merkezkaç Kuvveti Etkisi Altındaki Analiz	49
6	SONUÇLAR	53
	KAYNAKLAR	61
	ÖZGEÇMİŞ	63

KISALTMALAR

DTU	: Danimarka Teknik Üniversitesi
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
PEM	: Pala Elemanı Momentumu
PEMK	: Pala Elemanı Momentum Kuramı
YERT	: Yatak Eksenli Rüzgâr Türbini
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa Numarası</u>
Tablo 5.1: IEC standartları ortalama rüzgâr hız sınıfları [20]	36
Tablo 5.2: Tasarım Girdileri	36
Tablo 5.3: Palalarda Kullanılan Genel Malzeme Özellikleri [2]	42
Tablo 5.4: Çeşitli Yönelim Açılarında 20° Karbon/Elyaf-Cam/Elyaf Birleşimi [19]43	
Tablo 5.5: Katman Mekanik Özellikleri ve Dayanım Verileri [19]	44

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa Numarası

Şekil 1.1: Yıllara Göre Rüzgâr Türbini Teknolojisi Gelişimi	3
Şekil 2.1: Rüzgâr Türbinine Etkiyen Kuvvetler [2].....	8
Şekil 2.2: Rüzgâr Türbini Çeşitlerine Göre $C_p - \lambda$ Grafiği [2]	11
Şekil 2.3: Rüzgâr Hızı-Güç-Verimlilik Eğrileri [9].....	12
Şekil 2.4: Rüzgâr Hızı ve Pala Açısına Göre Eş-Güç Eğrileri (26,8 rpm için) [9]....	12
Şekil 3.1: Eyleyici Disk Modeli Akış Tüpü	16
Şekil 3.2: Rüzgâr Türbini Kontrol Hacmi [10].....	17
Şekil 3.3: Dönen Pala Elemanı [1]	17
Şekil 3.4: Pala Kesidi Kuvvet ve Açılış Bileşenleri [1]	18
Şekil 3.5: Çalkantılı İz Durumu (Glauert Düzeltmesi) [12]	22
Şekil 4.1: Elastik Bağlaşım [5]	26
Şekil 4.2: Pala Kesidi Üzerinde Gelen Akım ve Burulma Açılışları [15].....	28
Şekil 5.1: Rüzgâr Türbini Pala Kesit Dizilişi [8].....	32
Şekil 5.2: Rüzgâr Türbini Pala Biçimlenimleri [8].....	33
Şekil 5.3: $C_p - \lambda - B$ Grafiği (Schmitz Şeması) [2]	34
Şekil 5.4: Tasarım Döngüsü	35
Şekil 5.5: Kesit Aerodinamik Özellikleri	37
Şekil 5.6: Pala Kesitleri	38
Şekil 5.7: Çapraz Karbon - Cam/Elyaf Kabuk [17].....	40
Şekil 5.8: (a) Geleneksel Paladaki Elyaf Yönelimi; (b) Eğilme-Burulma Yönelimli Paladaki Elyaf Yönelimi [18].....	41
Şekil 5.9: Kesit Biçimlenmesi [23].....	43
Şekil 5.10: Pala Örgü Modeli	45
Şekil 5.11: Modal Analiz Sonuçları.....	46
Şekil 5.12: Aerodinamik Kuvvetler Etkisi Altındaki Von Mises Gerilmeleri	47
Şekil 5.13: Aerodinamik Kuvvetler Etkisi Altındaki S_{11} Gerilmeleri	48
Şekil 5.14: Aerodinamik Kuvvetler Etkisi Altındaki Yer Değiştirmeler	49
Şekil 5.15: Merkezkaç Kuvveti Etkisi Altındaki Von Mises Gerilmeleri	50
Şekil 5.16: Merkezkaç Kuvveti Etkisi Altındaki S_{11} Gerilmeleri.....	51
Şekil 5.17: Merkezkaç Kuvveti Etkisi Altındaki Yer Değiştirmeler	52
Şekil 6.1: Boyutsuz Viter Uzunluğunun Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi .	53
Şekil 6.2: Burulma açısının Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi.....	54
Şekil 6.3: Prandtl Uç Kaybı Çarpanının Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi ..	54
Şekil 6.4: Prandtl Göbek Kaybı Çarpanının Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi	55
Şekil 6.5: Etkin Kayıp Çarpanının Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi	55
Şekil 6.6: FFA-W3-211 için C_l ve C_d 'nin α ile değişimi, ($Re=5.0E06$).....	56
Şekil 6.7: Eksenel İndükleme Çarpanının Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi	56
Şekil 6.8: Taşıma Kuvvetinin Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi	57
Şekil 6.9: Sürüklenme Kuvvetinin Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi.....	57

Şekil 6.10: Normal Kuvvetin Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi	58
Şekil 6.11: Teğetsel Kuvvetin Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi.....	58
Şekil 6.12: Pala Geometrisi	59
Şekil 6.13: Pala Geometrisi, Yandan Görünüş	59
Şekil 6.14: 3 Boyutlu Pala Geometrisi Kabuk.....	60
Şekil 6.15: 3 Boyutlu Pala Geometrisi Kesitleri.....	60

SEMBOL LİSTESİ

A	: Döneç disk alanı [m^2]
a	: Eksenel indüklemeye çarpanı
a_c	: Eksenel indüklemeye düzeltme sınırı
a'	: Dönel indüklemeye çarpanı
B	: Pala sayısı
c	: Viter uzunluğu [m]
C_d	: Sürüklemeye katsayısı
C_l	: Taşıma katsayısı
C_{l,tasarım}	: Tasarım taşıma katsayısı
C_{l/C_d}	: Taşıma katsayısının sürüklemeye katsayısına oranı
C_p	: Güç katsayısı
C_n	: Dönme düzlemine dik kuvvet katsayısı
C_{p,enyüksek}	: En yüksek güç katsayısı
C_T	: İtke katsayısı
C_t	: Dönme düzlemine teğet kuvvet katsayısı
D	: Sürüklemeye kuvveti[N]
E	: Kinetik enerji [joule]
F_N	: Normal kuvvet[N]
F_T	: Çizgisel kuvvet[N]
F_{kayıp}	: Etkin kayıp çarpanı
F_{kök}	: Kök kayıp çarpanı
F_{uç}	: Uç kayıp çarpanı
L	: Taşıma kuvveti [N]
L/D	: Taşımanın sürüklemeye oranı
M	: Döneç torku [Nm]
m	: Kütle [kg]
P_{anma}	: Anma gücü [W]
P_{kullanılabilir}	: Kullanılabilir güç [W]
P_{rüzgâr}	: Rüzgâr gücü [W]
R	: Döneç yarıçapı [m]
r	: Yerel yarıçap [m]
Q	: Döneç itkisi [N]
V_{alt akım}	: Dönece gelen rüzgâr hızı [m/s]
V_{bağlı}	: Döneç üzerindeki bağlı hız [m/s]
V_{döneç}	: Döneç üzerindeki rüzgâr hızı [m/s]
V_{göbek}	: Göbek seviyesindeki rüzgâr hızı [m/s]
V_{ortalama}	: Ortalama rüzgâr hızı [m/s]
V_{rüzgâr}	: Rüzgâr hızı [m/s]
V_{tasarım}	: Tasarım rüzgâr hızı [m/s]
V_{uç}	: Pala ucu hız [m/s]
V_{alt akım}	: Dönece gelen rüzgâr hızı [m/s]
V_{üst akım}	: Döneçten giden rüzgâr hızı [m/s]

α	: Hücüm açısı [derece]
$\alpha_{tasarım}$	: Tasarım hücüm açısı [derece]
β	: İndüklenmiş burulma açısı [derece]
β	: Ön burulma açısı [derece]
θ	: Burulma açısı [derece]
λ	: Uç hız oranı
λ_r	: Yerel uç hız oranı
$\lambda_{tasarım}$	: Tasarım yerel uç hız oranı
ν	: Kinematik ağdalık
ρ	: Yoğunluk [kg/m ³]
σ_r	: Yerel katılık
ϕ	: Etkin bağıl açısı [derece]
Ω	: Döneç açısal hızı [rad/s]
ω	: İndüklenmiş açısal hız [rad/s]

EĞİLME-BURULMA BAĞLAŞIMLI RÜZGÂR TÜRBİNİ PALA TASARIMI

ÖZET

Bu çalışmada, en iyi burulma ve veter dağılımı elde edilecek şekilde ideal pala tasarımı yapabilmek amacıyla pala elemanı momentum kuramından (PEMK) faydalanılarak MATLAB ile bir tasarım kodu hazırlanmıştır. Bu kod yardımıyla, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) Standartları göz önünde bulundurularak 7,5 m/s'lik ortalama rüzgâr hızına sahip çalışma koşulu için çalkantılı iz durumu altında ideal bir pala tasarlanmış ve bu pala üzerinde oluşan tasarım yükleri hesaplanmıştır. Palanın 100 elemandan oluştuğu kabul edilmiştir. Girdi olarak, anma gücü, uç hız oranı, pala sayısı ve pala boyu kullanılmış; yazılım sonucunda pala geometrisine ait veter boyu ve burulma açısı dağılımı ile her bir elemana ait taşıma ve sürüklenme kuvvetleri bulunmuştur. Bu kuvvetlerden de dönme düzlemine dik ve teğet yükler hesaplanmıştır. Daha sonra bu aerodinamik tasarım için uygun kompozit kabuk ve pala kirişi malzemesi seçimi yapıp geleneksel ve bağlaşımlı olmak üzere iki ayrı pala modeli, yapısal olarak tasarlanmıştır. Pala kabuğu ve kirişinde kullanılan gerekli malzeme özellikleri sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapan ABAQUS yazılımında tanımlanmış, doğrusal iki boyutlu çarpılma elemanları kullanılarak kesit özellikleri çıkartılmış ve bu özellikler daha sonra kabuk elemanları özellikleri olarak atanıp modal ve statik analiz gerçekleştirilmiştir. Böylelikle geleneksel ve bağlaşımlı yapıdaki, aynı geometrik özelliklere sahip iki tasarımın analiz sonuçları kullanılarak, uygun malzeme tanımlamasıyla geleneksel bir palaya istenilen güç çıktısını sağlayabilecek esnek bir yapı kazandırılması amaçlanmıştır.

DESIGN OF A BEND-TWIST COUPLED WIND TURBINE BLADE

SUMMARY

In this study, to make an ideal blade design so as to gain the optimum twist and chord distribution, a design code is developed by using MATLAB and utilizing the Blade Element Momentum Theory (BEMT). Using the code developed, considering International Electrotechnical Commission (IEC) Standards, under the operating condition of 7.5 m/s average wind speed, an ideal blade with wake rotation is designed and the blade design loads are calculated. The blade is considered as to be consisted of 100 elements. Rated power, tip speed ratio, the number of blades and the blade length are used as the inputs of the design code, and then the chord length and the twist angle distribution of the blade and lift and the drag forces of each element are found. By these two forces forces, the normal and the tangent loads to the rotating plane are calculated. Afterwards, by selecting appropriate composite shell and spar materials for this aerodynamic design, two structural models are designed as conventional blade and bend-twist coupled blade. The required material properties of blade skin and spar are defined in ABAQUS, finite element analysis software and the cross-section properties are derived by using two-dimensional linear warping elements and these properties are then assigned as elements to perform modal and static analysis. Thus, by analysis results of conventional and coupled structured designs having the same geometrical specifications, and with an appropriate material definition it is aimed to design the conventional blade as a flexible structure which would provide the desired power output.

1 GİRİŞ

Nüfusu hızla artan dünyamızda her geçen gün daha büyük önem kazanan enerji sorunu, dünyadaki dengeleri ve yaşam koşullarını belirleyen en önemli etken olmuştur. Öyle ki; enerji nedeniyle insanoğlunu tarih boyunca sıkıntıya düşüren savaşlar, günümüzde bile kabuk değiştirip sürmektedir. Gün geçtikçe azalmaya başlayan alışlagelmiş enerji kaynakları, insanlığı yeni arayışlara itmiş; böylece yenilebilir enerji kavramı ortaya çıkmıştır. Herhangi bir birikim ve sınır sorunu olmayan yenilenebilir enerji, sürekli önem kazanmakta, dünyanın önde gelen ülkeleri geleceklerini tasarlarken yenilenebilir enerjiyi de hedeflerine yön veren bir konuma koymaktadır.

Elektrik üretiminde rüzgâr enerjisinin kullanımı, büyük sanayi üretimi ve her yıl güçlerinin artmasıyla oldukça kabul gören bir alan olmuştur. Bu alanda, özellikle de çok büyük rüzgâr türbinlerinde heyecan verici gelişmeler olmasına karşın, birçok zorlukla da karşılaşmaktadır. Bilim ve teknolojiye rüzgâr türbini, tasarım, üretim ve işletimiyle ilgili, özellikle yatay eksenli kara türbinleri hakkında geniş bir bilgi birikimi bulunmaktadır.

Rüzgâr türbini tasarımında pala, kule, dişli kutusu, üreteç gibi birçok bileşenin dikkate alınması gerekmektedir. Özellikle pala, gerek aerodinamik gerekse yapısal açıdan türbin tasarımının en önemli bileşeni olarak öne çıkmaktadır.

Başarılı bir pala tasarımında sağlanması gereken hedefler özetle;

- Belirlenen rüzgâr dağılımında, yıllık enerji verimini en yükseğe çıkarma,
- En yüksek enerji çıktısını düzenli bir şekilde elde etme,
- Aşırı yükleme ve yorulma yüklerine dayanma,
- Pala/kule çarpışmasından sakınmak için uç sehimini engelleme (üst akım türbinlerinde),
- Rezonanstan kaçınma,

- Ağırlık ve maliyeti düşürme

olarak sıralanabilir [1].

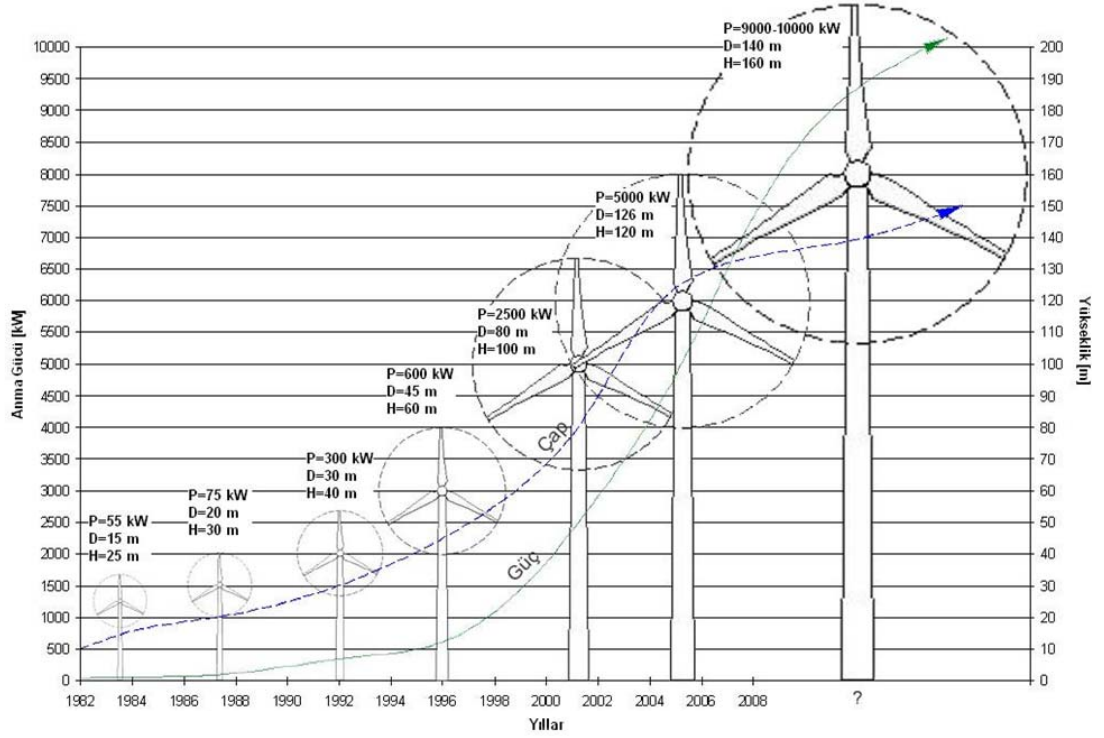
Bu çalışmada günümüzde kullanımı henüz yaygınlaşmamış yeni bir teknik sayılabilecek bağlaşımlı pala tasarımı, istenilen bir güç eldesi ve pasif yunuslama kontrolü hedefleriyle yapısal ve geometrik açıdan ele alınmıştır.

1.1 Rüzgâr Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi

Yel değirmenleri hakkında ilk bilgiler, İran -Afganistan sınırındaki bölgede M.Ö. 644 tarihlerine aittir. Tahıl öğütmek amacıyla kullanılan bu değirmenlere, 945 yılında, dikey dönüş eksenli bir yeldeğirmeni çizimlerini de içeren bulgulara rastlanmaktadır [2].

Modern sanayileşmenin başlarında rüzgâr enejisisnin yerine, daha tutarlı kaynaklar olan, fosil yakıt kullanan motorlar, elektrik ağırları kullanılmaktaydı. 1970'lerin başlarında yakıt fiyatlarında yaşanan yükseliş elektirik üretiminde, rüzgâr enerjisi kullanımını gündeme taşımıştır. 1891'de Dane Poul LaCour, elektrik üretme amaçlı ilk rüzgâr türbinini üretmiştir. 1990'ların sonu itibarı ile rüzgâr enerjisi en hızlı büyüyen, önemli enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir. Gerek Avrupa'da gerekse Amerika'da özel kesit kullanan modern türbin üreteçleri geliştirilmeye başlanmıştır. 21. yüzyılın başlarında ise dünyada üretilen rüzgâr enerjisi %75'i Avrupa'da, %18'i Kuzey Amerika'da ve %8'i Asya ve Pasifik'te olacak şekilde dağılmıştır [3].

Yakın zamandaki teknolojik gelişmeler ve başarımlar iyileştirmeleri, rüzgâr türbinlerinin giderek daha verimli, uygun maliyetli ve güvenilir olmalarını sağlamıştır. 50-100kW'lık küçük-orta ölçekli sistemleri yerini 200 kW ila 1MW'lık daha büyük sistemlere geçilmiştir. Hızla gelişen teknoloji, rüzgâr türbini güç ve boyutlarını Şekil 1.1'de gösterildiği gibi son derece yüksek seviyelere getirmiştir [4].



Şekil 1.1: Yıllara Göre Rüzgâr Türbini Teknolojisi Gelişimi

1.2 Esnek Yapılı Pala Çalışmalarının Tarihsel Gelişimi

Yatay eksenli rüzgâr türbini (YERT) teknolojisinin gelişimiyle birlikte, daha fazla enerji eldesi sağlayabilmek için yeni çalışmalar yapılması ihtiyacı doğmuş ve bu doğrultuda dönecin kontrolü ve yüklerin azaltılması gerekmiştir. Bu ihtiyaç, rüzgâr hızına ve dönel hıza bağlı olarak aerodinamik biçimlenimi değiştiren esnek yapıdaki bağlaşımlı pala kullanımını ortaya çıkarmıştır. Bu amaçla aktif ve pasif yöntemler olarak adlandırılan çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak Karaolis ve diğerleri (1988, 1989) tarafından kullanılan akıllı palalar üzerinde dayanımı ve kanat kesidi şeklinde burulma bağlaşımlı sağlamak amacıyla yapılan çalışmada pala yüzeyindeki elyaf serilimi iki yönlü birleşimler şeklinde bulunmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar, en iyi bağlaşımlı eksen dışı elyafların pala açıklık eksenine yaklaşık 20° 'lik yönlenimiyle gerçekleştiğini göstermiştir.

Koojiman (1996), yaptığı parametrik çalışmayla eğilme-burulma bağlaşımlı palaların kullanımı kavramını gündeme getirmiştir. Bu çalışmada bağlaşımlı en başarılı olduğu durumun çapraz-katman yönünde melez karbon/cam güçlendirmeye

olduğunu, eğilme-burulma esnekliğinin standart yapıya kıyasla %10 azaldığını, 20° güçlendirmeye ve 45°'lik serilmeden kaçınmayla elastik bağlaşımın en yüksek seviyeye geldiğini belirtmiştir. Ayrıca eğilme-burulma bağlaşımı yöntemi sayesinde sabit hızlı, yunuslama kontrollü türbinler için elde edilen enerji yüzdesini ve başlangıç torkunu da %10'a kadar iyileştirmiştir [5].

Lobitz and Veers (1996), 26 metre çaplı tutunma kaybı düzenlemeli bir YERT'in yıllık enerji üretimi üzerindeki genel bağlaşım etkilerini incelemiştir. Palaların yönde burularak tutunma kaybına girmesiyle en yüksek gücü azalttığı kabul edilerek, döneç çapı, en yüksek gücün başlangıç değerine ulaşabilmek için arttırılmıştır. Yıllık enerji miktarındaki artışı, yıllık ortalama rüzgâr hızının fonksiyonu olarak inceleyen araştırmalar sonucunda, en yüksek burulma açısındaki bir derecelik artışın yıllık enerji çıktısını %5, iki derecelik bir artışın ise %10 civarında artırdığı gözlenmiştir [6].

Eisler ve Veers (1998), uzama-burulma bağlaşımlı pala kullanımının faydalarını değişik hızlardaki döneçler için denemiş ve yıllık ortalama enerjinin eldesinin iyileştirilmesi için parametrik eniyileme çalışması yapmıştır. Bunun için döneç hızı ve palanın etkin yunuslama açısını iki karar değişkeni olarak kullanmış ve eğilme momentinin, pala yunuslama fonksiyonuna etkisinin olmadığını görmüştür.

Lobitz ve Veers (1998) farklı seviyelerdeki elastik bağlaşımınla, eğilme-burulma bağlaşımlı dönecin klasik flater ve ayrılmasını (diverjansını) sayısal olarak incelemişlerdir.

Middleton ve diğerleri (1998) ve Infield ve diğerleri (1999) tarafından döneç hızını kontrol etmek üzere uzama-burulma bağlaşımlı palanın tasarım, üretim ve testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre pala burulması, planlanan elastik bağlaşımına uyum sağlasa da döneç hızı beklenenden düşük olmuştur.

Ong ve Tsai (1999), olası en yüksek eğilme-burulma bağlaşımını ve aynı zamanda esneme ve dönme rijitliklerini bulmak için melez cam/karbon elyaflı ve tamamen karbon elyaflı olmak üzere iki adet eğilme-burulmalı D-kiriş tasarlayıp üreterek test etmişlerdir. Ayrıca tasarım sırasında malzeme, kabuk planı, kalınlık ve iç rib gibi çeşitli değişkenler incelenmiştir.

Lobitz ve diğerleri (2001), yükleme altındaki tutunma kaybı yönünde burulmuş

palaların yararlarını inceleyen parametrik bir araştırma yapmışlardır. Buna göre indüklenmiş burulma; radyal dağılım, en yüksek uç genliği ve bu uç genliğinin karakterinin rüzgâr hızı ve döneç gücü ile değişimi olmak üzere üç değişken ile açıklanmaktadır.

Locke ve Hidalgo (2002), kompozit kutu yapıların, gerekli katılık özellikleri ve yüksek seviyede elastik bağlaşım ile tasarlanabileceğini göstermişlerdir. Geometrik model tanımlamak ve birincil yük taşıyıcı kutu kirişi yanısıra pala iç hacmi yapısını kurmak için SEN-8 rüzgâr türbini palası kullanılmıştır. Kutu kiriş on iki parçadan oluşacak şekilde tasarlanmıştır ve pala açıklığı boyunca farklı kesit alanlarının yükseklik, genişlik ve çevre gibi temel boyutlarıyla tanımlanmıştır. Olası tasarımları parametrik olarak elde etmek içinse bir kompozit kiriş kuramı modeli kullanılmıştır. Kısıt olarak SERI-8 palasının eğilme katılığı, değişken olarak ise duvar kalınlığı ve burulma açısı sonuçları kullanılmıştır.

Locke ve Valencia (2004), eğilme-burulma karbon/melez tasarımlarla, temel Northern Power Systems'in NPS-100 prototip rüzgâr türbini döneç palasının temel e-cam tasarımını karşılaştırmışlardır. Burulma-bağlaşımlı karbon tasarımlar yapılırken pala kirişi kapaklarındaki tek yönlü elyaf, eksen dışı karbon elyaflarla değiştirilmiştir. Bunu yaparken, birim yükleme durumunda, temel tasarım ile aynı miktarda yer değiştirme koşulu kullanılmıştır [5].

1.3 Çalışma Kapsamı

Bu çalışma kapsamında, kullanım alanı henüz yaygınlaşmamasına rağmen üzerinde çalışmalar yürütülen esnek yapılı pala kavramı üzerine, PEMK kullanılarak pasif kontrolü sağlayabilecek geometri esaslı yapısal bir tasarım yapılması amaçlanmıştır.

Öncelikle sıradan bir palanın geometrisini ve pala üzerindeki yük dağılımını belirleyebilmek için MATLAB yazılımı kullanılarak PEMK temeline dayanan bilgisayar kodu yazılmıştır. Bu kod sayesinde girdi olarak verilen bir rüzgâr hızı, pala adedi ve pala kesidi özellikleri için ideal bir pala geometrisi tasarlanıp bu palanın üzerine etkiyen moment bileşenleri hesaplanmıştır.

Daha sonra seçilen rüzgâr hızındaki yüklemeler altında, pasif kontrolü sağlayıp gerekli tepkiyi vererek aynı burulma değerlerini kendisi oluşturabilecek bir

bağlaşımli pala tasarımı için önceden tanımlı kompozit malzemeler kullanılmıştır. Pala yüzeyinde kullanılan kabuk malzemesi için uygun elyaf yönelimleri ve pala kirişi için gerekli malzeme özellikleri sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapan ABAQUS yazılımında tanımlanarak yeni bir tasarım oluşturulmuştur.

Aynı başarımı sağlama temeline dayanan bu yeni pala ile ilk pala, ABAQUS yazılımında modellenip analizleri yapılmıştır. Böylelikle geleneksel yapıdaki ve bağlaşımli yapıdaki aynı geometrik özelliklere sahip iki tasarımın analiz sonuçları kullanılarak, uygun malzeme tanımlamasıyla sıradan bir palaya istenilen güç çıktısını sağlayabilecek esnek bir yapı kazandırılması amaçlanmıştır.

2 RÜZGÂR ENERJİSİ ÇEVİRİMİ

2.1 Enerji Kaynağı Olarak Rüzgârın Özellikleri

Rüzgârdan elde edilen enerji, rüzgâr hızının küpüyle orantılıdır. Bu sebeple, rüzgâr enerjisi kullanımı, rüzgâr enerjisi çiftliği kurulumu için gerekli sahanın belirlenmesi ve ekonomik açıdan uygunluğunun saptanmasında, ayrıca rüzgâr türbini tasarımında rüzgâr özelliklerini anlamak büyük önem taşımaktadır.

Rüzgâr enerjisi açısından bakıldığında, rüzgârın en önemli özelliği, hem coğrafi hem de zamana bağlı olarak değişkenlik göstermesidir [1].

Rüzgâr kaynaklarının özelliklerini, türbinlerin kurulacağı yerde incelemek çok önemlidir. Gerçekleşebilir bir kurulum için çok sayıda gözlem, inceleme ve hesaplamalar yapılmalıdır. Bir sahanın rüzgâr düzenini, iklimsel ve coğrafi özellikler; küresel rüzgârlar, yerel rüzgârlar ve Coriolis etkisi şekillendirmektedir. Rüzgâr düzenini etkileyen etkenlerden bazıları ise,

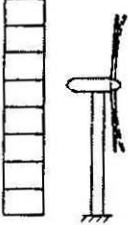
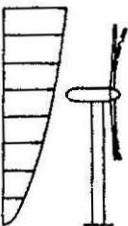
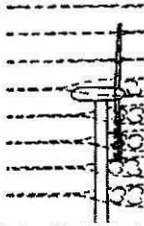
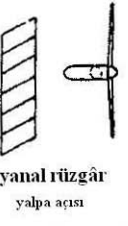
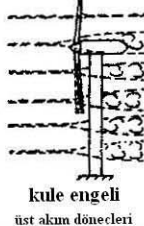
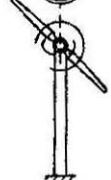
- Sapma oranı (sıcaklık, yoğunluk, yüksekliğe bağlı basınç değişimleri)
- Çalkantı
- Dikey rüzgâr kayması (yükseklikle rüzgâr hızının değişimi)
- Sürekli rüzgârlar için, yüksekliğe bağlı hız değişimi
- Arazi etkisi
- Yüzey pürüzlülüğü

olarak sıralanabilir.

Rüzgârın gerek coğrafi ve gerekse zamana bağlı değişken yapısı, kısa dönemli rüzgârlar (çalkantı ve sağnak) ve de uzun dönemli rüzgârlar türbini tasarımında önemli rol oynamaktadır [7].

2.2 Rüzgâr Türbinine Etki Eden Kuvvetler

Rüzgâr türbinleri, havayla etkileşimli ve dönen bir yapıya sahip olduklarından çeşitli yüklere maruz kalırlar. Ayrıca büyük yapılarından dolayı yerçekimi ve atalet kaynaklı yükler de türbinler üzerinde büyük etkiye sahiptir.

		Aerodinamik kuvvetler	Atalet ve yerçekimi kuvvetleri
daimî yükler		 daimî ortalama rüzgâr hızı	 merkezkaç kuvvetleri
daimî olmayan yükler	döngüsel yükleme	 dikey rüzgâr kayması  kule gölgelemesi alt akım döneçleri  yanal rüzgâr yalpa açısı  kule engeli üst akım döneçleri	 yerçekimi kuvvetleri  jiroskopik kuvvetler
	döngüsel olmayan yükleme	 rüzgâr çalkantısı	

Şekil 2.1: Rüzgâr Türbinine Etkiyen Kuvvetler [2]

Türbinlere etkiyen yükler şu şekilde sıralanabilir:

- Aerodinamik pala yükleri
- Döneç palalarındaki yerçekimi yükleri
- Merkezkaç kuvvetleri ve dönmeden kaynaklanan Coriolis kuvvetleri

- Yalpalanmadan kaynaklanan jiroskobik yükler
- Kule ve gövde üzerindeki aerodinamik sürüklenme kuvvetleri
- Kule ve gövde üzerindeki yerçekimi yükleri
- Çalkantı ve sağanaklardan kaynaklanan yükler

Bu yükleri Şekil 2.1'deki gibi sınıflandırmak mümkündür.

2.3 Rüzgâr Gücünün Değişkenleri

Rüzgâr sahip olduğu hız nedeniyle bir kinetik enerjiye sahiptir. İçinde barındırdığı güç; rüzgârın hızı, yoğunluğu ve geçtiği kesit alanın genişliğine bağlıdır. Kuramsal olarak, $V_{\text{rüzgâr}}$ hızındaki, A alanından geçen rüzgârın sahip olduğu güç:

$$P_{\text{rüzgâr}} = \frac{1}{2} \rho A V_{\text{rüzgâr}}^3 \quad (2.1)$$

Bu denklemden gücün yoğunluk ve süpürülen alanın birinci kuvveti ve hızın üçüncü kuvvetiyle orantılı olduğu görülmektedir. Rüzgâr hızının üçüncü kuvvetini daha iyi kavramak için; rüzgâr enerjisi, belli bir sürede A alanından geçen hava kütlesinin kinetik enerjisi gibi düşünülebilir.

$$E = \frac{1}{2} m V_{\text{rüzgâr}}^2 \quad (2.2)$$

Kütle debisi:

$$\dot{m} = \rho A \frac{dx}{dt} = \rho A V_{\text{rüzgâr}} \quad (2.3)$$

Buna göre rüzgâr gücü:

$$P_{\text{rüzgâr}} = \dot{E} = \frac{1}{2} \dot{m} = \frac{1}{2} \rho A V_{\text{rüzgâr}}^3 \quad (2.4)$$

Hava kütlesinin hızının azalmasıyla, rüzgâr gücü dönecin mekanik enerjisine dönüşmektedir. Bununla birlikte, rüzgâr gücü tamamen rüzgâr türbininden elde edilmemektedir, yani rüzgâr döneç alanına geldiğinde, tamamen durmalıdır. Akış hızında azalma olmadığı takdirde, rüzgârdan güç elde edilemeyecektir [8].

Rüzgâr türbini tarafından üretilen enerji ise:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_{\text{rüzgâr}}^3 C_p \quad (2.5)$$

Bu denklemdeki C_p verimlilik veya güç katsayısı, mekanik, elektrik ve aerodinamik verimlilikleri içermektedir.

Tüm rüzgâr türbininin başarımını belirleyen C_p katsayısı:

$$C_p = \frac{2P_{\text{kullanılabilir}}}{\rho A V_{\text{rüzgâr}}^3} = \frac{2P_{\text{kullanılabilir}}}{\rho \pi R^2 V_{\text{rüzgâr}}^3} \quad (2.6)$$

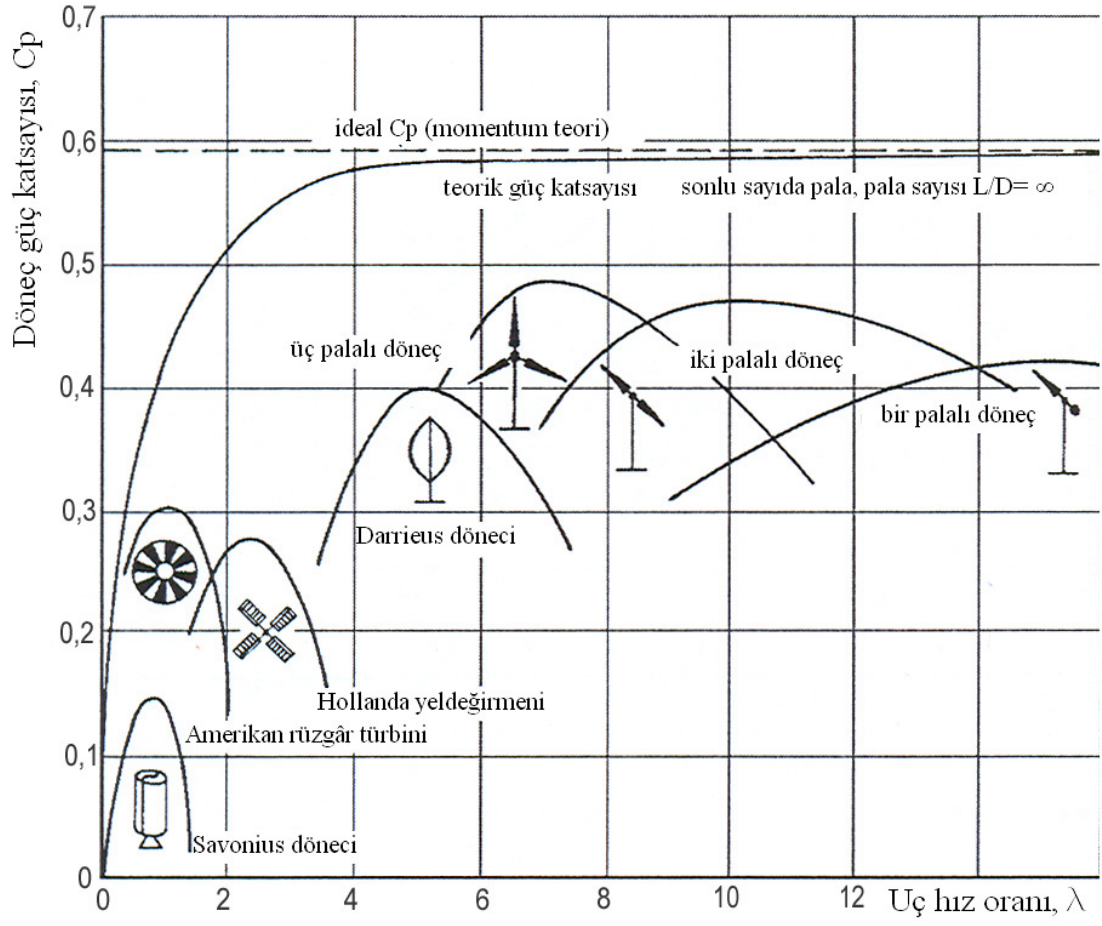
Betz-Lanchester tarafından tanımlanan ve Betz sınırı olarak anılan kuramsal üst sınırın değeri ise:

$$C_{p,\text{enyüksek}} = \frac{16}{27} \cong 0,59 \quad (2.7)$$

olarak verilmiştir.

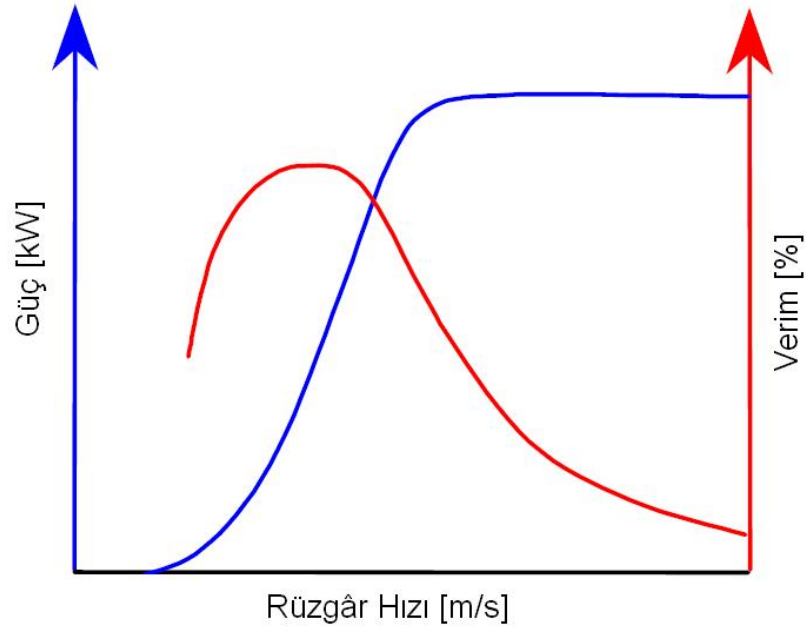
Diğer bir önemli tasarım değişkeni ise döneç ucu çizgisel hızının ve serbest akım hızına oranını ifade eden λ uç hız oranıdır:

$$\lambda = \frac{V_{\text{uç}}}{V_{\text{rüzgâr}}} = \frac{\Omega R}{V_{\text{rüzgâr}}} \quad (2.8)$$



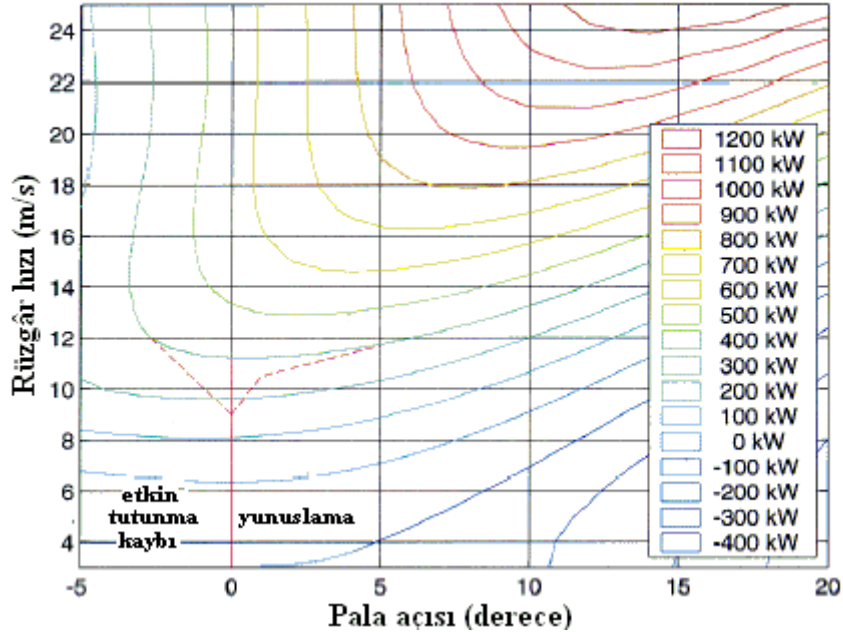
Şekil 2.2: Rüzgâr Türbini Çeşitlerine Göre $C_p - \lambda$ Grafiği [2]

Şekil 2.2’de rüzgâr türbini çeşitleri için uç hız oranı ve güç kat sayısı ilişkisi gösterilmiştir. Ayrıca bu şekle bakılarak, pala sayısı ve uç hız oranı arasında ters bir ilişki olduğu da söylenebilir.



Şekil 2.3: Rüzgâr Hızı-Güç-Verimlilik Eğrileri [9]

Türbinde üretilen güç, Şekil 2.3'te görüldüğü gibi rüzgâr hızı ile değişmektedir. Sabit verim (sabit uç hız oranı) kabulü yapıldığında, anma gücüne ulaşılan artan rüzgâr hızında grafiğin üçüncü dereceden bir polinom olduğu görülmektedir. Bu durumda, güç düzenlemesi için, pala açısı değişimi yapılmaktadır.



Şekil 2.4: Rüzgâr Hızı ve Pala Açısına Göre Eş-Güç Eğrileri (26,8 rpm için) [9]

Pala açısı ve ortalama rüzgâr hızının fonksiyonu olan eş-güç eğrileri, Şekil 2.4'te görülebilmektedir. Etkin tutunma kaybı ve yunuslama kontrolü 0° pala açısında ayrılmışlardır. Düşük rüzgâr hızlarında ise rüzgâr türbininin çalışması için pala açısının en uygun değeri 0° 'dir. Daha yüksek rüzgâr hızlarında ise pala açısı doğru ayarlanmadığı takdirde aşırı bir üretim gerçekleşmektedir. Yunuslama kontrolüyle rüzgâra karşı pala hücum kenarı pozitif yönde, etkin tutunma kaybı kontrolünde ise firar kenarı rüzgâra karşı gelecek şekilde eksi yönde hareket ettirilmektedir. Yüksek rüzgâr hızlarında ise güç sınırları Şekil dekesikli çizgilerle gösterilmiştir. Örnek olarak anma gücü 400 kW, rüzgâr hızı 12 m/s olan üç palalı döneç için, düşük hızda 0° pala açısı ile yüksek hızda, eş güç eğrisi boyunca güç sınırlama işlemi arasındaki geçiş kesikli çizgiyle belirtilmiştir [9].

3 PALA ELEMANI MOMENTUM KURAMI (PEMK)

Rankine-Froude Eyleyici Disk Kuramı ile başlayan aerodinamik çalışmalar, Glauert'in Pala Elemanı Momentum (PEM) Kuramı ile genişletilmiştir. Bu kuram, rüzgâr türbini aerodinamik tasarım kodları ile hâlâ kullanılmakta ve geliştirilmekte olan rüzgâr türbini döneç tasarımında önemli rol oynamakla birlikte deneysel veriler ve mevcut rüzgâr türbini verileriyle uyumluluk göstermektedir [7].

Pala elemanı kuramı ve PEMK, Rankine-Froude disk kuramının genişletilmiş şeklidir. PEMK modeli ile daha hassas sonuçlar elde edebilmek için yarı deneysel bağıntılar kullanılarak PEMK'te düzeltmeler yapılmıştır. Bunlar;

- Uç etkileri (Prandtl Uç Kaybı Düzeltmesi)
- Kök etkileri (Prandtl Göbek Kaybı Düzeltmesi)
- Çalkantılı İz Durumu (Glauert)
- Dinamik iç akış
- Dinamik tutunma kaybı
- Üç boyutluluk düzenlemesi

olarak sıralanabilir.

Hesaplamalar yapılırken kesit özellikleri belirlenmelidir. Kesit seçiminde önemli rolü olan Reynolds sayısı, aerodinamik özelliklerle ilgili önemli bir etkidir. Viter uzunluğu “c” olan bir kesidin Reynolds sayısı aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

$$Re = \frac{\rho_{hava} V_{bağ} c}{\mu_{hava}} \quad (3.1)$$

$V_{bağ}$ pala üzerindeki bağıl hızdır. Seçilen pala geometrisi üzerinde uygun kesitleri kullanmak kesidin davranışlarını öngörmede önemli rol oynamaktadır.

Bu çalışmada döneç başarımlı hesaplamaları yapılırken PEM kuramı kullanılmıştır. Yapılan genel kabuller ise;

- iz dönmesi etkisini
- sürüklenme etkisini
- uç etkilerini (Prandtl Uç Kaybı Düzeltmesi)
- kök etkilerini (Prandtl Göbek Kaybı Düzeltmesi)
- çalkantılı iz durumunu (Glauert Düzeltmesi)

içermektedir [7].

3.1 Momentum Kuramı

Önemli bir tasarım değişkeni olan C_p aynı zamanda Rankine-Froude eyleyici disk modeli ile tanımlanmaktadır. Bu model şu şartlar altında tanımlanmıştır:

- Düzgün, homojen rüzgâr
- Üst akım veya alt akım yönünde engelsiz rüzgâr akışı
- Disk üzerinde düzgün akış hızı
- İyi tanımlanmış bir akış tüpüyle (Şekil 3.1), disk ardında kalan akımdan ayrılabilen rüzgâr akışı
- Sıkıştırılamaz rüzgâr akışı
- Disk tarafından üretilen dönmeyen akış

Akış tüpü üzerindeki hız dağılımı şu denklemlerle verilir:

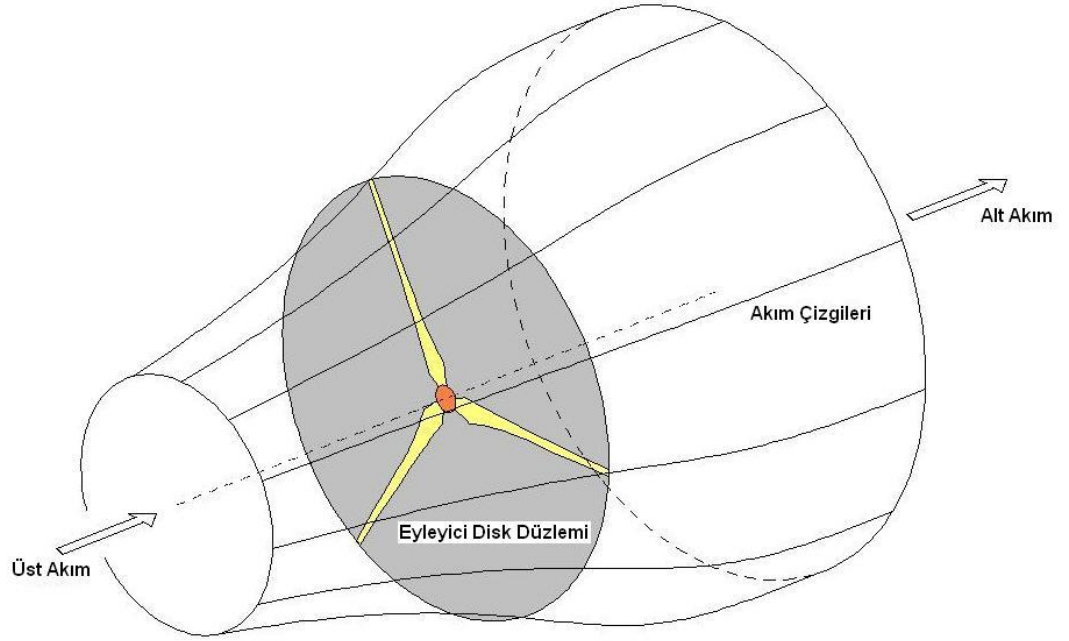
$$V_{döneç} = V_{üst akım} (1 - a) \quad (3.2)$$

$$V_{alt akım} = V_{üst akım} (1 - 2a) \quad (3.3)$$

Burada a , aksel indüklemeye çarpanını temsil etmektedir. Ayrıca hesaplamalarda kullanılan bir önemli etken de dönel indüklemeye çarpanıdır (a') ve şu denklemle tanımlanır.

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (3.4)$$

Bu denklemedeki ω , indüklenmiş açısal hız ve Ω , göbeğin açısal hızıdır.



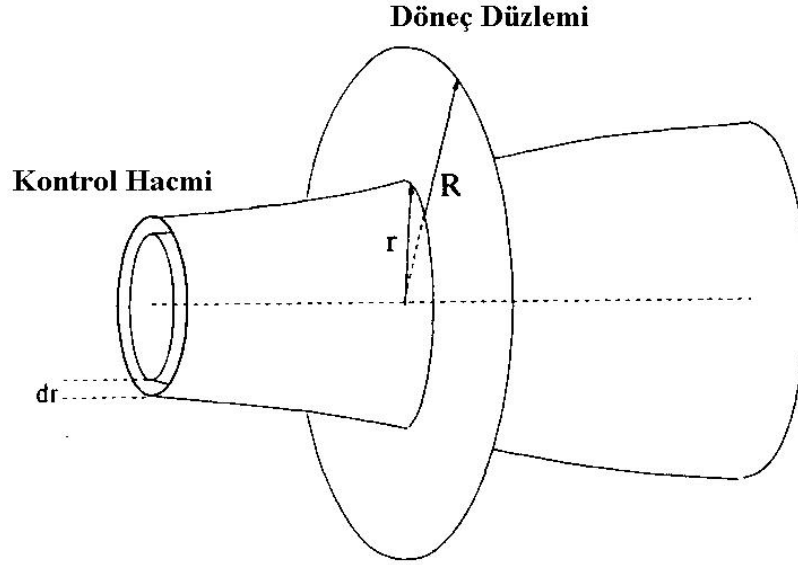
Şekil 3.1: Eyleyici Disk Modeli Akış Tüpü

Kuvvet, momentum değişiminden faydalanılarak hesaplandığından, momentum korunumu kullanılarak bir rüzgâr türbini palası üzerine gelen kuvvetler belirlenebilmektedir. Şekil 3.2'deki silindirik kontrol hacmine integral momentum denklemi uygulandığında itki ve tork:

$$dT = 4\pi r \rho V_{\text{rüzgâr}}^2 a(1-a) dr \quad (3.5)$$

$$dQ = 4\pi r^3 \rho V_{\text{rüzgâr}} \omega(1-a)a' dr \quad (3.6)$$

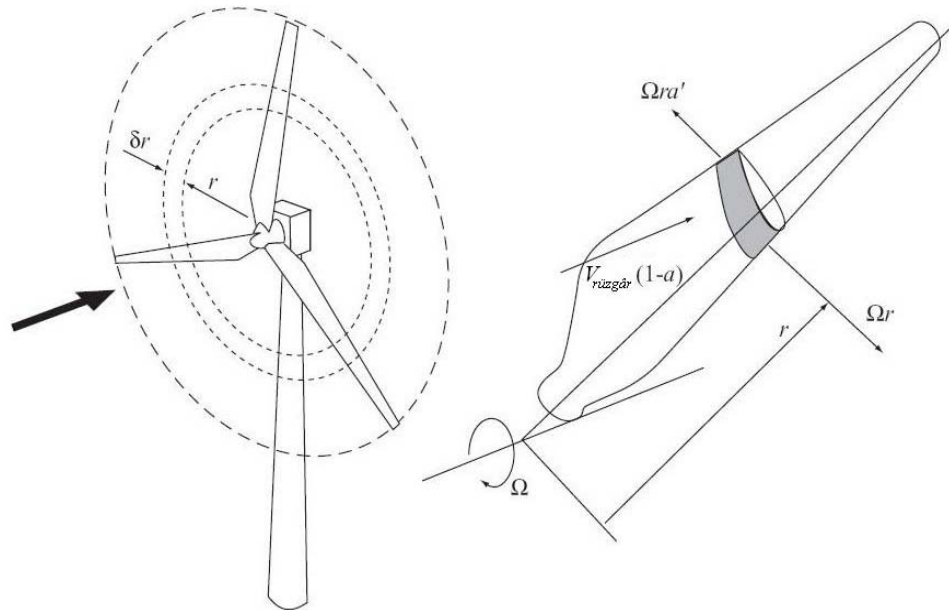
olarak verilmektedir.



Şekil 3.2: Rüzgâr Türbini Kontrol Hacmi [10]

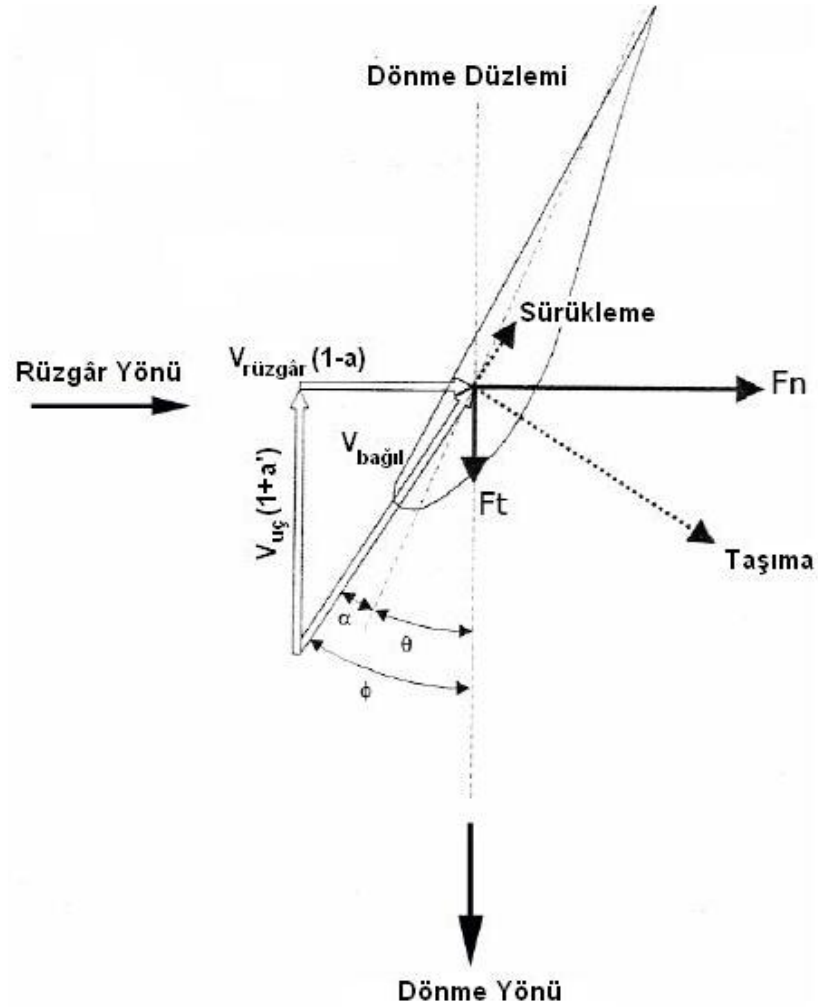
3.2 Pala Elemanı Kuramı

Pala elemanı kuramıyla pala kesitlerindeki taşıma ve sürüklenme kuvvetleri belirlenmektedir. Her bir pala kesidinde aerodinamik hesaplamalar yapılmaktadır. Pala elemanı üzerine gelen kuvvetler, pala elemanının kesit düzlemindeki bileşke hızın hücum açısı kullanılarak iki boyutlu pala kesidi özellikleri cinsinden tanımlanmaktadır. Şekil 3.3'te de görüldüğü gibi pala açıklığı yönündeki hız bileşeni ihmal edilir.



Şekil 3.3: Dönen Pala Elemanı [1]

a ve a' , tasarım çarpanları olarak tanımlanmaktadır. En uygun pala başarımının bulunması için bu parametrelerin iteratif olarak çözülmesi gerekmektedir. Bunun sonucunda da döneç başarımı, güç, itki, tork, pala yükleri ve uygun pala geometrisi bulunabilir.



Şekil 3.4: Pala Kesidi Kuvvet ve Açılar Bileşenleri [1]

Şekil 3.4'te bir pala kesidi görülmektedir. Etkin bağıl akım açısı (ϕ), hücum açısı (α) ve pala yerel burulma açısının (θ) toplamına eşittir.

$$\phi = \alpha + \theta \quad (3.7)$$

Bağıl açısı:

$$\phi = \arctan \frac{V_{rüzgâr} (1-a)}{V_{uç} (1+a')} \quad (3.8)$$

Uç hız:

$$V_{uç} = \Omega R \quad (3.9)$$

Yerel uç hız oranına göre hızlar:

$$\tan \phi = \frac{1}{\lambda_r} \left(\frac{1-a}{1+a'} \right) \quad (3.10)$$

Yerel (radyal yöndeki) uç hız oranı:

$$\lambda_r = \lambda \frac{r}{R} \quad (3.11)$$

Kesit üzerindeki taşıma ve sürüklenme kuvvetleri:

$$Taşıma = L = \frac{1}{2} \rho V_{bağıl}^2 c C_l \quad (3.12)$$

$$Sürüklenme = D = \frac{1}{2} \rho V_{bağıl}^2 c C_d \quad (3.13)$$

Bağıl rüzgâr hızı ise:

$$V_{bağıl} = \sqrt{V_{rüzgâr}^2 + V_{uç}^2} = \sqrt{V_{rüzgâr}^2 + (\Omega R)^2} \quad (3.14)$$

Pala üzerindeki çizgisel ve bağıl kuvvetler:

$$F_N = L \cos \phi + D \sin \phi \quad (3.15)$$

$$F_T = L \sin \phi - D \cos \phi \quad (3.16)$$

olarak verilir.

3.3 Pala Elemanı Momentum Kuramı (PEMK)

Momentum kuramı kullanılarak her bir pala elemanı için bulunan kuvvet ve tork katsayıları

$$dF_N = BF_N dr \quad (3.17)$$

$$dQ = rBF_T dr \quad (3.18)$$

Buradaki $F_{uç}$ ise uç kayıp çarpanıdır.

$$dF_n = F_{uç} \rho 4a(1-a) \pi r dr \quad (3.19)$$

$$dQ = 4F_{uç} a'(1-a) \rho V_{rüzgâr} \pi r^3 \Omega dr \quad (3.20)$$

Katılık:

$$\sigma_r = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (3.21)$$

Boyutsuz kuvvet katsayıları:

$$C_n = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \quad (3.22)$$

$$C_t = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi \quad (3.23)$$

Eksenel indükleme çarpanı (a) ve çizgisel indükleme çarpanı (a'):

$$a = \frac{1}{1 + \frac{4F_{uç} \sin^2 \phi}{\sigma_r C_n}} \quad (3.24)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4F_{uç} \sin \phi \cos \phi}{\sigma_r C_t} - 1} \quad (3.25)$$

olarak verilir.

3.3.1 Uç Etkileri (Prandtl Uç Kaybı Düzeltmesi)

Uç girdaplarından kaynaklanan kayıpları öngörmek için Prandtl'ın getirmiş olduğu yöntem kullanılmıştır. Buna göre;

Prandtl uç kayıp çarpanı:

$$F_{uç} = \frac{2}{\pi} \arccos e^{-f_{uç}} \quad (3.26)$$

burada

$$f_{uç} = \frac{B}{2} \frac{R-r}{r \sin \phi} \quad (3.27)$$

olarak tanımlanmaktadır [7].

3.3.2 Kök Etkileri (Prandtl Göbek Kaybı Düzeltmesi)

Uç etkilerinde olduğu gibi, türbin göbeğinden kaynaklanan kayıpları öngörmek için Prandtl'ın getirmiş olduğu yöntem kullanılmıştır. Buna göre;

Prandtl uç kayıp çarpanı:

$$F_{kök} = \frac{2}{\pi} \arccos e^{-f_{kök}} \quad (3.28)$$

burada

$$f_{kök} = \frac{B}{2} \frac{r - r_{göbek}}{r_{göbek} \sin \phi} \quad (3.29)$$

olarak tanımlanmaktadır. Herhangi bir pala kesidindeki etkin kayıp çarpanı ise, Egglestone ve Stoddard'a göre,

$$F_{kayıp} = F_{uç} F_{kök} \quad (3.30)$$

olarak verilir [11].

3.3.3 Çalkantılı İz Durumu (Glauert Düzeltmesi)

Yaklaşık olarak $a > 0,5$ olduğu durumlarda basit momentum kuramı uygulanabilir değildir [12]. Bu durum, yüksek uç hız oranlarında çalışan türbinlerin çalkantılı iz durumuna girmesiyle gerçekleşir. Bazı kaynaklara göre ise çalkantılı iz durumu $a > 0,3$ koşulunda gözlemlenir [9]. $a_c \approx 0,2$ (a_c ; aksenal indükleme düzeltme sınırı)

olmak üzere, $a > a_c$ olduğu durumlarda Glauert düzeltmesi kullanılarak a değeri aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$a = \frac{1}{2} \left(K(1-2a_c) + 2 - \sqrt{(K(1-2a_c) + 2)^2 + 4(Ka_c^2 - 1)} \right) \quad (3.31)$$

Burada,

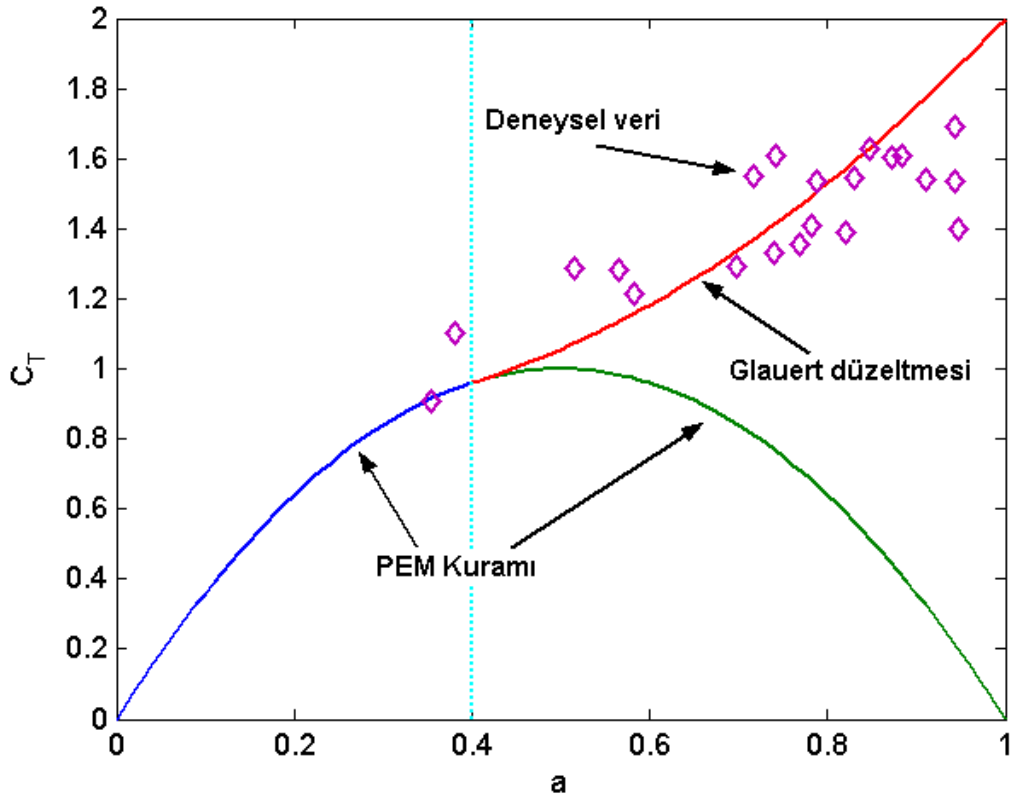
$$K = \frac{4F_{uç} \sin^2 \phi}{\sigma_r C_n} \quad (3.32)$$

olarak verilir [10].

Bir başka yaklaşımla; $a > 0,4$ ya da eş olarak $C_T > 0,96$ olduğunda aşağıdaki Glauert deneysel formülüyle düzeltme yapılabilir [11,13]:

$$a = \frac{1}{F_{uç}} \left(0,143 + \sqrt{0,0203 - 0,6427(0,889 - C_T)} \right) \quad (3.33)$$

Çalkantılı iz durumunun grafik gösterimi Şkil 3.5'te verilmiştir:



Şekil 3.5: Çalkantılı İz Durumu (Glauert Düzeltmesi) [12]

Aynı durumlar için itki katsayısı, C_T ;

$$C_T = \frac{\sigma_r (1-a)^2 C_n}{\sin^2 \phi} \quad (3.34)$$

olarak tanımlanmaktadır [7].

3.3.4 Uç Hız Oranının Belirlenmesi

Tasarım için en uygun uç hız oranı aşağıdaki $C_p - \lambda$ ilişkisini veren deneysel bağıntıdan en yüksek C_p değerine karşı gelen λ değerinin bulunmasıyla elde edilir:

$$C_p = \frac{16}{27} \frac{\lambda}{1.32 + \left(\frac{\lambda-8}{20} \right)^2} - 0.57 \frac{\lambda^2}{L/D \left(\lambda + \frac{1}{2B} \right)} \quad (3.35)$$

3.3.5 Genel PEMK Algoritması

Belirli bir pala sayısı, döneç yarıçapı ve göbek yüksekliğinde önceden tanımlı bir pala kesidi özellikleri kullanılarak, hemen hemen genel bir kullanıma sahip aşağıdaki algoritma ile a ve a' aşağıdaki adımlar izlenerek hesaplanabilmektedir:

1. Adım a ve a' ($a=0$ ve $a'=0$) için ilk tahminleri yap.
2. Adım ϕ açısının hesapla.
3. Adım $\lambda_{tasarım}$ 'ı belirle.
4. Adım En yüksek $\frac{C_l}{C_d}$ oranına karşılık gelen yerel α açısını bul.
5. Adım C_l ve C_d katsatılarını hesapla.
6. Adım Etkin kayıp hesabı yap.
7. Adım Eğer $a > 4$ ise (çalkantılı iz durumunu) 8. adıma git; değilse 9. adıma git.
8. Adım Glauert düzeltmesini yap.
9. Adım a ve a' istenilen oranda yakınsıyorsa bitir; değilse 2. adıma git.
10. Adım İstasyondaki yerel kuvvet bileşenlerini (F_N ve F_T) hesapla.

Güç katsayısı (döneç başarımı), hesaplanması için verilen bağıntı;

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_0}^{\lambda} F \sin^2 \phi (\cos \phi - \lambda_r \sin \phi) (\sin \phi + \lambda_r \cos \phi) \left[1 - \left(\frac{C_d}{C_l} \right) \cot \phi \right] \lambda_r d\lambda_r \quad (3.36)$$

şeklinde tanımlanır.

Döneç merkezinden itibaren toplam pala uzunluğunu N tane eşit uzunluktaki pala elemanına bölersek;

$$\Delta \lambda_r = \lambda_{r,i} - \lambda_{r,(i-1)} = \frac{\lambda}{N} \quad (3.37)$$

güç katsayısı, a and a' 'nün yeni değerleriyle 3.41'den sayısal olarak hesaplanabilir:

$$C_P = \frac{8}{\lambda N} \sum_{i=k}^N F \sin^2 \phi_i (\cos \phi_i - \lambda_{r,i} \sin \phi_i) (\sin \phi_i + \lambda_{r,i} \cos \phi_i) \left[1 - \left(\frac{C_d}{C_l} \right) \cot \phi_i \right] \lambda_{r,i}^2 \quad (3.38)$$

Burada k , asıl pala kesidinin kullanıldığı ilk istasyon sayısına karşılık gelmektedir.

4 ESNEK YAPILI PALA KAVRAMI

4.1 Esnek Yapılı Pala Özellikleri

Rüzgâr türbinlerinde, rüzgâr hızının yüksek olması, daha yüksek enerji çıktısı sağlamasına rağmen belirli seviyelerden sonra istenmeyen bir özelliktir. Çünkü rüzgâr hızının artmasıyla birlikte uç hız oranı da artar ve bunun sonucunda aerodinamik ve yapısal açıdan çeşitli olumsuzluklar ortaya çıkar. Anma gücüne ulaşıldığı anma rüzgâr hızından daha büyük hızlarda; güç çıktısının sabit tutulabilmesi için uç hız oranı sabit tutulmaya çalışılır.

Uç hız oranını sabitlemek amacıyla geleneksel olarak pala köklerine yerleştirilmiş yunuslama düzenekleri kullanılır. Anma hızına gelindiği andan durma hızına ulaşılan kadar palalara bu düzenekler sayesinde yaklaşık 20° seviyelerine ulaşan burulmalar verilerek uç hızın, dolayısıyla da uç hız oranının artması engellenir ve böylece güç sabit tutulur.

Son yıllarda yapılan yenilikçi çalışmalarda ise herhangi bir yardımcı düzeneğe ihtiyaç duymadan bu değişimleri kendisi gerçekleştirebilecek pasif kontrollü palalar üzerinde durulmaktadır.

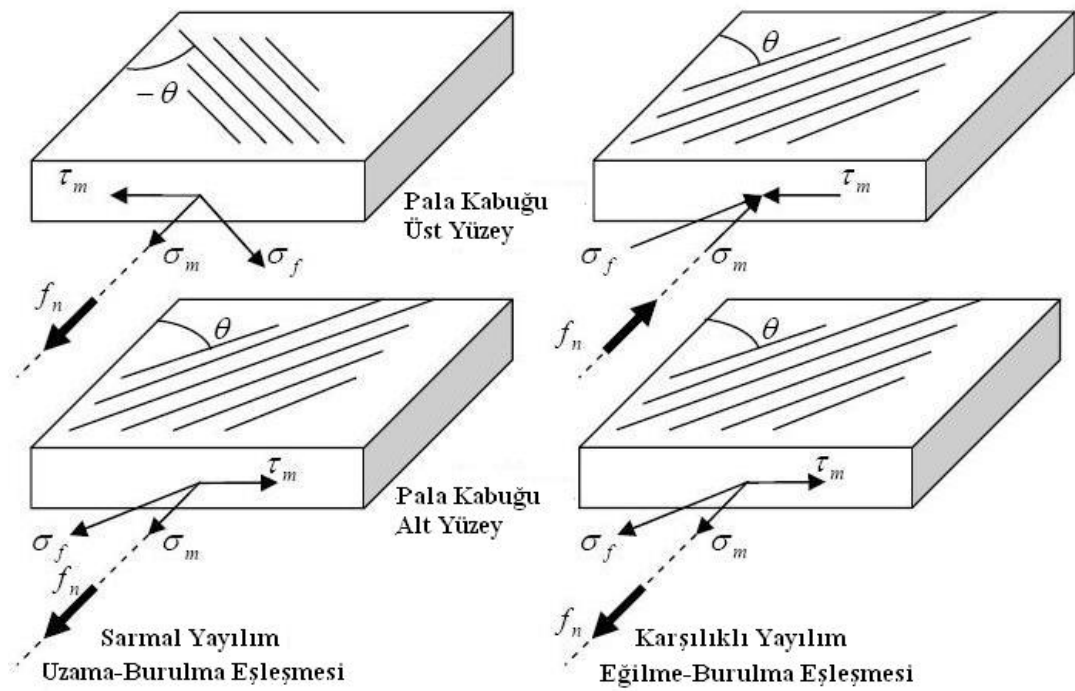
Pasif kontrol, rüzgâr türbin sanayisinde geleneksel mekanik yöntemlere ihtiyaç duymayan bir yöntemdir. Bağlısımlı ya da akıllı palalar olarak bilinen bu yöntemde esnek bir yapıda olan pala, rüzgâr hızını veya döneç dönел hızındaki değişiklikleri algılayarak kendi aerodinamik özelliklerini bunun sonucunda da türbin başarımını ayarlamaktadır [14].

Pasif kontrolü sağlamak amacıyla, genelde aeroelastik uydurma yöntemi kullanılır. Aeroelastik uydurma, aerodinamik yüzeyler üzerinde yapısal bağlaşımların planlanmasına denir. Esnek yapılı palalar için bu planlamada yüksek dayanım-ağırlık ve rijitlik-ağırlık oranı ile uygun yorulma özellikleri gibi çok iyi mekanik özelliklere sahip kompozit malzemeler kullanılır. Kompozit malzeme kullanımının diğer bir faydası da, çeşitli elyaf yönelimleri ve özgül yayılımları bulunan elastik

bağlaşımların sağlanabilmesidir. Bu yapısal bağlaşımlar, döneç palalarının aeroelastik davranışlarını önemli oranda etkilemektedir.

4.1.1 Elastik Bağlaşım

Pala kabuğunda ya da kirişinde dengelenmemiş kompozit katmanları kullanarak iç yüklerin elastik bağlaşımlı hale gelmesi sağlanmaktadır. Şekil 4.1'deki gibi farklı türlerde bağlaşımlar elde etmek için farklı bağlaşımlar kullanılmaktadır. Karşılıklı yayılımla, eğilme momentinin aynı zamanda burulma momenti ürettiği, eğilme-burulma bağlaşımı elde edilmektedir. Sarmal lay-up, palayı eksenel yükün burulma momenti ürettiği, uzama-burulma bağlaşımlı yapıya sahip hale getirmektedir. Dengelenmemiş kompozit katmanlarından meydana gelen pala, eksenel moment ve eğilme momenti altında indüklenmiş burulma adı verilen burulma şekil değiştirmesine maruz kalmaktadır.



Şekil 4.1: Elastik Bağlaşım [5]

Elastik bağlaşım, özellikle eğilme-burulma bağlaşımlı palalarda genelde üç yolla sağlanır:

1. Sadece kabuk malzemesinin,

2. Sadece pala kirişinin,
3. Hem kabuk hem de pala kirişinin çapraz yönelimli malzemelerden oluşturulmasıyla.

4.1.1.1 Sadece Kabuk Malzemesinin Çapraz Yönelimli Malzemelerden Oluşması

Bu biçimlendirmede, eğilme-burulma bağlaşımını çapraz yönelimli malzemedan oluşturulmuş kabuk sağlar. Çaprazlaşmasız pala kirişi başlıkları, pala boyunca oluşan eğilme dayanımının büyük bölümünü sağlar; fakat burulmaya da uyumlu olmaları beklenir.

4.1.1.2 Sadece Pala Kirişi Malzemesinin Çapraz Yönelimli Malzemelerden Oluşması

Bu biçimlendirmede, hem pala boyunca oluşan eğilme dayanımını hem de burulma-eğilme bağlaşımını, diğer biçimlendirmelere göre daha kalın olan pala kirişi başlıkları sağlar. Kabuk ise çaprazlaşmasız kompozit malzemelerden oluşturulur.

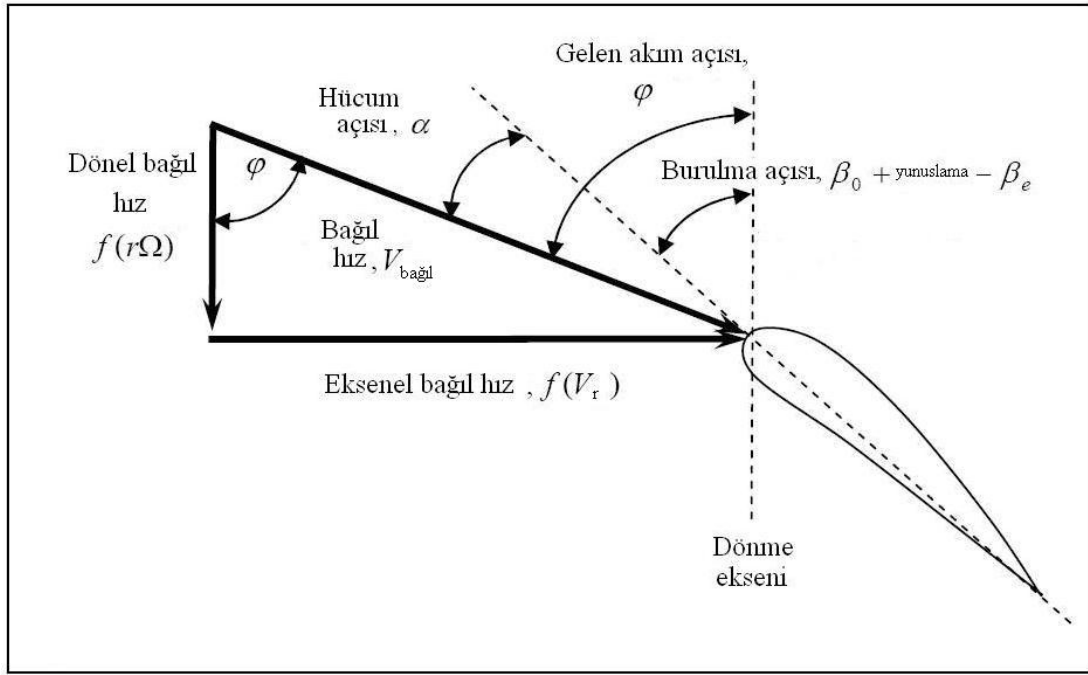
4.1.1.3 Sadece Pala Kirişi Malzemesinin Çapraz Yönelimli Malzemelerden Oluşması

Bu tasarım, üstteki iki biçimlendirmenin bir bileşimidir. Çapraz yönelimli malzemelerden oluşturulan kabuk ve pala kirişi başlıkları, eğilme-burulma bileşimini birlikte sağlarlar [19].

4.1.1.4 İndüklenmiş Burulmanın Aerodinamik Başarım Üzerine Etkileri

Pala üzerine gelen aerodinamik kuvvetlerin büyüklüğü ve yönü, bunun sonucunda da pala ve türbin performansı büyük ölçüde pala hücum açısına bağlıdır. Hücum açısı ise gelen akım açısı ve pala burulma açısına bağlıdır. Pala burulma açısı Şekil 4.2’de görüldüğü üzere üç açının birleşimi şeklinde ifade edilebilir: ön-burulma, yunuslama açısı ve elastik bağlaşımından kaynaklanan indüklenmiş burulmadır. Denklemda hücum açısının diğer açılar cinsinden ifadesi yer almaktadır:

$$\alpha = \theta + \beta - \beta_0 - \text{yunuslama} \quad (3.39)$$



Şekil 4.2: Pala Kesidi Üzerinde Gelen Akım ve Burulma Açıları [15]

4.2 Esnek Yapılı Pala Çeşitleri

Bu palaları yapısal açıdan olarak iki sınıfa ayırabiliriz:

1. **Etkiyle Akıllı Palalar (Aktif kontrol) :** Malzeme içine gömülü piezoelectric eyleyiciler sayesinde elastik şekil değiştirme üretilmekte ve kontrol edilebilmektedir.
2. **Kendinden Akıllı Palalar (Pasif kontrol):** Sadece kompozit elyaf katmanlarının simetri ve dengesi sayesinde elastik şekil değiştirme üretilmekte ve kontrol edilebilmektedir. Kullanılan anizotropik kompozit malzemelerin yönlülük özelliklerinden faydalanılarak palanın kontrollü bir biçimde burulması sağlanabilir. Eğilme-burulma bağlaşımlı pala ve uzama-burulma bağlaşımlı pala olmak üzere iki kavram vardır.

Eğilme-burulma bağlaşımlı bir palanın tasarımında pala aerodinamik kuvvetlere ve atalet kuvvetlerine maruz kalarak eğildiği sırada aerodinamik başarımını değiştirecek şekilde burulacaktır. Ayrıca bu başarım değişiklikleri, aeroelastik kararsızlık gibi aeroelastik etkilere de bağlıdır.

4.3 Esnek Yapılı Pala Kullanımının Yarar ve Sakıncaları

Uygulamaları tam anlamda başlanmamış olmasına rağmen, yapılan çalışmalar, esnek yapılı palaların maliyet, sistem ağırlığı, yapısal özellikler ile dinamik ve statik kararlılık bakımından geleneksel palalardan farklı niteliklere sahip olduğunu göstermiştir. Maliyet ve tüm türbin sistemi ağırlığı açısından daha olumlu etkilere sahip olan esnek yapılı palalarda, özellikle yorulma açısından büyük kazanımlar gözlenmiştir. Bunun yanında yapısal kararlılık sorunları olabilmekle birlikte, flater ve ayrılma olasılıklarına karşı gerekli analizler yapıp önlemler alınmalıdır.

4.3.1. Yararları

Esnek yapılı palaların, ortalama enerji eldesinin arttırılmasında, çıkış gücünün ayarlanmasında, yorulma yüklerinin azaltılmasında ve başlatma hızını azaltıcı gücün iyileştirilmesi gibi birçok alanda kullanılması mümkündür.

Rüzgâr türbinlerinde, kulenin ağırlığı ve rüzgâr türbininin altyapısı, dönecin boyut ve ağırlığına bağlıdır. Dönecin ağırlığı toplam ağırlığının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu sebeple toplam maliyetin azaltılmasında palaların ağırlıklarının indirgenmesi çok fazla önem kazanmaktadır.

Tutunma kaybı limitinin altındaki pozitif hücum açılarında, bir kanat kesidi üzerindeki aerodinamik yük, hücum açısıyla orantılıdır. Yunuslama veya feather yönünde burulmayla palanın hücum açısının azaltılması döneç üzerindeki dinamik yüklemenin azaltılmasını sağlamaktadır. Böylece yorulma hasarında önemli oranda azalmalar mümkün kılınabilmektedir. Lobitz and Laino (1999) ile Lobitz ve diğerleri (2000) tarafından yapılan çalışmalarda, düşük hızlar için tutunma kaybı kontrollü tasarımlarda (%20 ila %70), yüksek hızlar içinse yunuslama kontrollü tasarımlarda (%20 ila %80) önemli oranda yorulma hasarı azalımı gözlenmiştir.

4.3.2 Sakıncaları ve Önlemleri

Esnek rüzgâr türbini palalarının tasarımda kullanılan bağlaşım yöntemlerinin iki temel zorluğu bulunmaktadır. Bu zorluklardan ilki, ana yapının üretiminde eksen dışı yönelimli elyafların kullanılmasıdır. Her ne kadar, birincil elyaf açısı eksenle 20° olan malzemeler uygun görülse de, kullanımının yaygın olmayışı ve taşıma oluşumu esnasında boylamasına maruz kaldığı gerilmeler oldukça maliyetli kararlılık

sorunlarına sebep olmaktadır. İkinci zorluk ise elyafların bitim ve büküm noktalarının yorulma sınırları ile ilgilidir. Açılı elyaflara sahip pala kirişi kapaklarının elyaf bitimleri ya kenarda olmalı ya da perde türü yapıların etrafından taşıtılmalıdırlar. Bu iki yönetemle, reçine sistemine elyafları sıkıştıran ilave bir gerilmeye ve tasarımda daha düşük yorulma sınırlarına ulaşılabilir [16].

Feather yönündeki burulma, toplam enerji eldesini azaltmaktadır. Bu sebeple yeni bir döneç tasarlanırken, burulma bağlaşımlı palalar, bu azalmayı en aza indirmek için dikkatli bir şekilde tasarlanmalıdır.

Diğer tüm hava yapıları gibi bağlaşımlı palalar da flater ve de ayrılmadan kaçınmak için, dinamik ve statik olarak kararlı koşullarda çalışacak şekilde tasarlanmalıdır. Bağlaşımlı bir palanın statik ve dinamik kararlılık sınırları sıradan bir palanınkinden farklıdır. Pala malzemesinin dinamik bir biçimlenmeye sahip olması (biçim değiştirebilmesi) ve tek biçimli olmayan anizotropinin varlığı, bağlaşımlı palanın statik ve dinamik kararlılık sınırlarını etkileyerek sıradan palalardan ayrılmasını sağlar.

Ayrıma, pala göreceli hızının yeteri derecede büyük olduğu statik bir olaydır. Bu hız değeri, pala burulması sebebiyle artan hücum açısı değişimi için üretilen aerodinamik yükün, elastik geri dönüş kuvvetleri tarafından üretilen tepki yükünden daha büyük olduğu duruma karşılık gelir. Sonucunda ise yıkıcı hasarların olduğu aşırı burulmaya neden olan ekin bir katılık kaybı meydana gelmektedir.

Klasik flater pala eğilme ve burulma salınımlarının etkileşimi ile tanımlanam dinamik bir olaydır. Akış hızı arttıkça, aerodinamik yük bu iki hareketin titreşim fazının değişmesine hatta eksi sönümleme oluşturarak yıkıcı hasarların meydana gelmesine sebep olmaktadır. Rüzgâr türbinleri için flater sınırı, flaterin olduğu dönel hızda (tipik olarak durgun havada) tanımlanmaktadır. Kararlılık aralığı ise flater hızı ve normal çalışma hızı arasındaki farktır.

Diğer bir kararlılık koşulu, tutunma kaybı-flater konusunda ise eğilme-burulma uyumu pala için hâlâ araştırılmaktadır. Tutunma kaybı-flater, burulma hâkim pala salınımlarıyla tanımlanmakta ve tutunma kaybına yakın, yüksek hücum açılarında meydana gelmektedir.

5 BAĞLAŞIMLI PALA GEOMETRİK VE YAPISAL TASARIMI

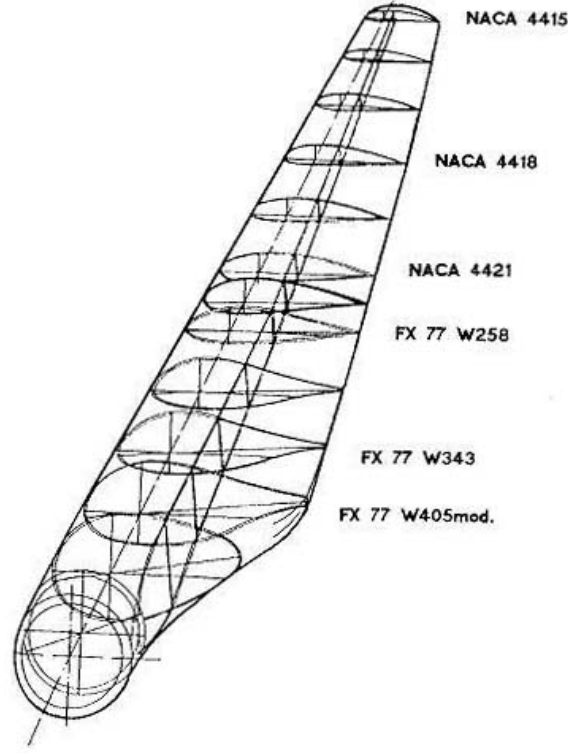
Bir pala tasarımında en iyi tasarımı yapabilmek için göz önünde bulması gerekenler şöyle sıralanabilir:

- Düşük katılık oranına ($\sigma < \%10$) ve uç hız oranına ($\lambda = 5-7$ civarı) sahip olmalıdır.
- Yüksek λ değeri, düşük yunuslama açısı anlamına gelir (Uç veteri, dönüş düzlemine paraleldir.).
- Düşük λ değeri, yüksek yunuslama açısı anlamına gelir (“Feather” durumu).
- Yunuslama açısı, bütün palalar için aynı olmalıdır.
- En iyi pala, uzun vetere, göbek yakınında yüksek bir burulmaya ve uç yakınında incelen bir yapıya sahiptir.
- En iyi pala, sadece tek λ değeri için en iyi olarak tanımlanır.
- En iyi pala, düz akım çizgili kesitlere sahip olacaktır.

5.1 Pala Geometrisi

Palaların aerodinamik ve yapısal eniyilemesi, küresel eğrilerden oluşan karışık bir geometri ortaya çıkarır. Bu geometriden dolayı üretimde kompozit malzeme kullanımı büyük bir gerektir; çünkü diğer malzemelerle üretim oldukça yüksek maliyetli olmakla birlikte uygulama açısından da çeşitli zorluklar içermektedir.

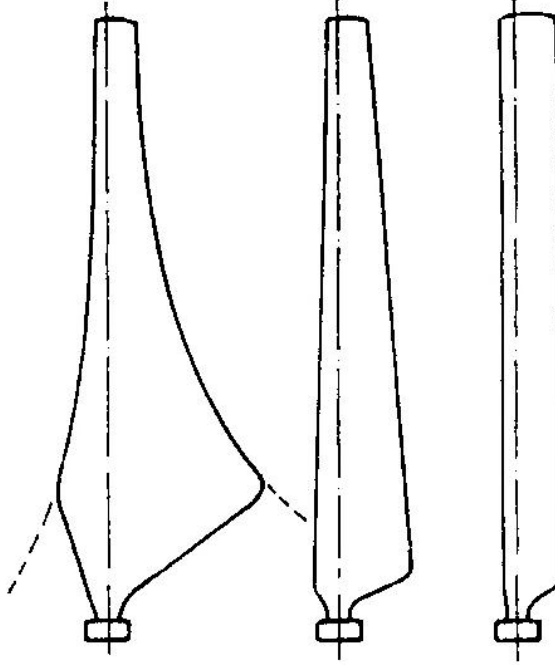
Palanın göbek flanşına bağlanması için gerekli olan inceliğin sağlanması amacıyla, Şekil5.1’deki örnekte olduğu gibi açıklık boyunca değişik kanat kesitleri kullanılır.



Şekil 5.1: Rüzgâr Türbini Pala Kesit Dizilişi [8]

Pala geometrisinin hesaplamalarda kullanılacak özellikleri önceden tanımlanmalıdır. Bu amaca yönelik olarak tasarımcı tarafından yapılır.

Üretim maliyetlerini düşük tutmak amacıyla en iyi pala biçimlenmesinden çeşitli ödünler verilmektedir. Genel bir seçenek olarak, Betz ve Schmitz'e göre en iyi veter hattından uzaklaşarak daha basit kesit dağılımları kullanılır. İdeal dağılımı veren Betz ve Schmitz yöntemi, üretim zorluğu nedeniyle, birebir olarak çok az sayıda üreticinin tercih ettiği bir yoldur. Bunun yerine birinci yöntem olarak, genelde uygulanan, firar kenarı doğru olan sivrilmiş palalar kullanılır. İkinci bir yöntemde ise, özellikle burulmasız yapıldığında, ekonomik açıdan daha verimli ve uygulama açısından ise daha basit bir üretim tekniği içeren dikdörtgen palalar kullanılır. Bu üçüncü çeşit pala tasarımı, genellikle birçok Darrieus türbininde kullanılmaktadır (Şekil 5.2).

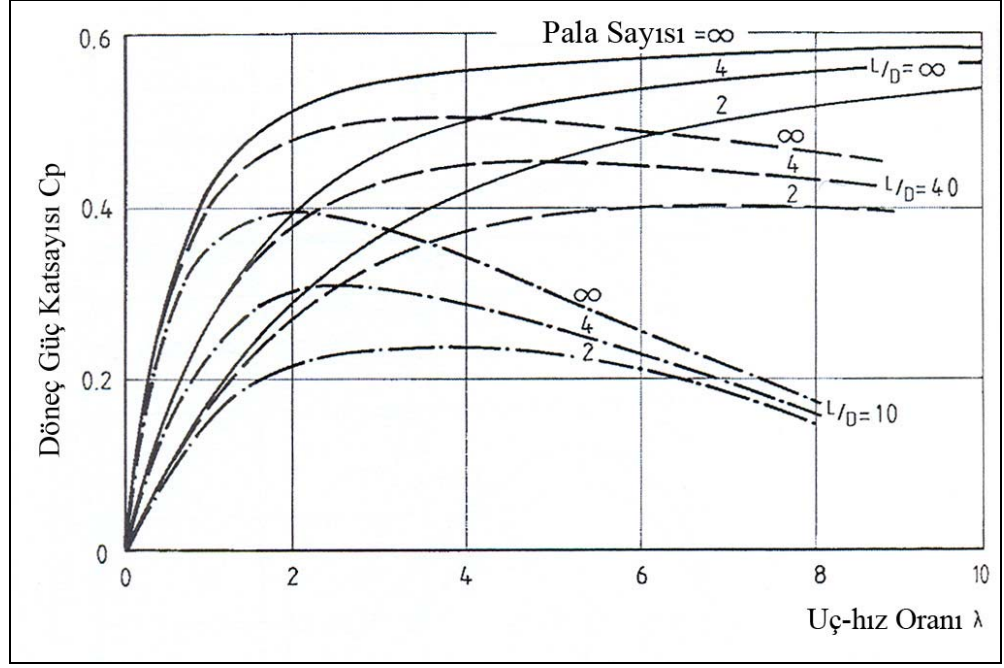


Şekil 5.2: Rüzgâr Türbini Pala Biçimlenimleri [8]

5.2 Pala Kesidi

Kullanılması gereken pala kesidi niteliği, üretim yöntemi ve malzemeyi belirler. Bunun yanında verim ve kontrol özelliklerini de yine pala kesidinin aerodinamik özellikleri etkiler. Kesidin en önemli değişkeni taşımanın sürüklemeye oranıdır (L/D). Bu oran katsayıların oranı olarak da ifade edilir ($L/D = c_L/c_D$). Türbin gücünü temsil eden güç katsayısı, c_p , değişik c_L/c_D değerlerinde farklı değerler alır.

Şekil 5.3'te de görüldüğü gibi güç katsayısı için en iyi değerler, düşük uç hız oranlarında elde edilmektedir. Ayrıca pala sayının güç katsayısına etkisi, yüksek L/D oranı ve uç hız oranı değerlerinde düşük oranlardakine göre daha azdır. Buradan şu sonuç çıkarılabilir: Düşük hızlı döneçlerde kesit özellikleri önemli değildir; fakat çok sayıda palaya ihtiyaç vardır. Yüksek hızlılarda ise az pala sayısı da başarılı sonuçlar alınır; fakat kesit özelliklerinin önemli derecede etkisi vardır.



Şekil 5.3: C_p - λ -B Grafiği (Schmitz Şeması) [2]

5.3 Yapılan Çalışma

Bu çalışmada, en iyi burulma ve veter dağılımı elde edilecek şekilde ideal pala tasarımı yapabilmek amacıyla pala elemanı momentum kuramından (PEMK) faydalanılarak MATLAB ile bir tasarım kodu hazırlanmıştır. Bu kod yardımıyla, IEC (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) Standartları göz önünde bulundurularak 7,5 m/s'lik ortalama rüzgâr hızına sahip çalışma koşulu için çalkantılı iz durumu altında ideal bir pala tasarlanmış ve bu pala üzerinde oluşan tasarım yükleri hesaplanmıştır. Daha sonra bu aerodinamik tasarım için uygun kompozit kabuk ve pala kirişi malzemesi seçimi yapıp geleneksel ve bağlaşımlı olmak üzere iki ayrı pala modeli, yapısal olarak tasarlanmıştır. Pala kabuğu ve kirişinde kullanılan gerekli malzeme özellikleri sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapan ABAQUS yazılımında tanımlanmış, doğrusal iki boyutlu çarpılma elemanları kullanılarak kesit özellikleri çıkartılmış ve bu özellikler daha sonra kabuk elemanları özellikleri olarak atanıp modal ve statik analiz gerçekleştirilmiştir. Böylelikle geleneksel ve bağlaşımlı yapıdaki, aynı geometrik özelliklere sahip iki tasarımın analiz sonuçları kullanılarak, uygun malzeme tanımlamasıyla geleneksel bir palaya istenilen güç çıktısını sağlayabilecek esnek bir yapı kazandırılması amaçlanmıştır.

$$R = \frac{1}{2} \left(\frac{P_{anma}}{0,2857} \right)^{\left(\frac{1}{2,0149} \right)} \quad (5.1)$$

Buna göre;

R=35,1 m olarak bulunmuş; fakat tasarım kolaylığı açısından R=35 m alınmıştır. Ortalama hız ($V_{ortalama}$), tasarım hızı ($V_{tasarım}$), hava yoğunluğu (ρ_{hava}) ve kinematik ağdalık (n) gibi girdilerin değerleri ise IEC standartlarına göre belirlenmiştir.

Tasarımı yapılan palanın Tablo 5.1’de verilen IEC standartlarına göre 3. hız sınıfında olması düşünülüp $V_{ortalama}=7,5$ m/s alınmıştır [20].

Tablo 5.1: IEC standartları ortalama rüzgâr hız sınıfları [20]

	Sınıflar			
	I	II	III	S (Üretici Tanımlı)
<u>Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı $V_{ortalama}$ [m/s]</u> <u>(Göbek Yüksekliğinde)</u>	10	8,5	7,5	

Yine, IEC standartlarına göre tasarım hızı ise [21]:

$$V_{tasarım} = 1,4 V_{ortalama} \quad (5.2)$$

denkleminde $V_{tasarım}=10,5$ m/s alınmıştır.

Böylece tasarım girdileri Tablo 5.2’deki gibi olmuştur:

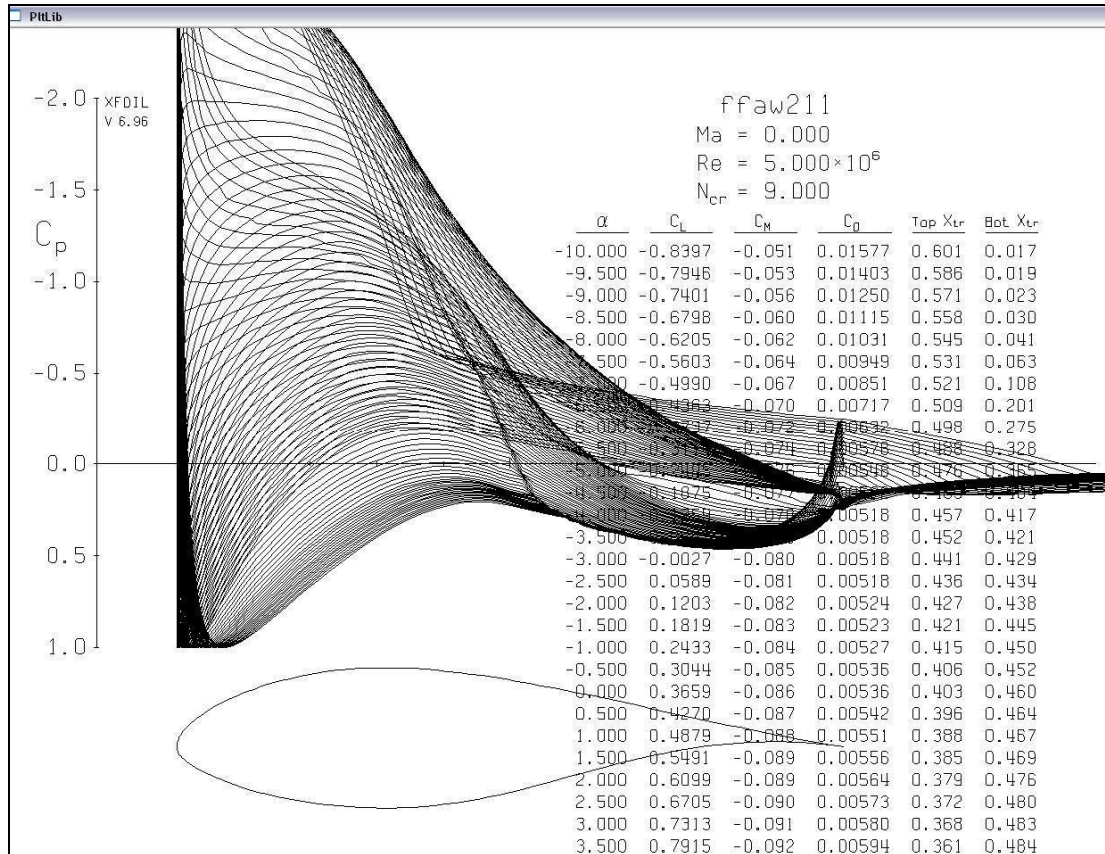
Tablo 5.2: Tasarım Girdileri

Anma gücü	$P_{anma}=1500$ kW
Pala sayısı	B=3
Uç hız oranı	$\lambda=7$
Pala boyu	R=35 m
Ortalama hız	$V_{ortalama}=7,5$ m/s
Tasarım hızı	$V_{tasarım}=10,5$ m/s
Açısal hız	$\Omega=20,05$ rpm
Hava yoğunluğu	$\rho_{hava}=1,2285$ kg/m ³
Kinematik ağdalık	$\nu=15,69 \times 10^{-6}$ m ² /s

5.3.3 Kesit Aerodinamik Özellikleri

Pala kesidi belirlemede rüzgâr türbinlerinde kullanımı uygun ve yaygın olan kesitler dikkate alınmıştır. Bunun sonucunda gerçekte uygulaması olan ve rüzgâr enerjisi alanında birçok önemli çalışmalar yapan “Risøe Danimarka Teknik Üniversitesi (DTU) Sürdürülebilir Enerji Laboratuvarları” tarafından geliştirilen FFA-W3-211 kesidi seçilmiştir.

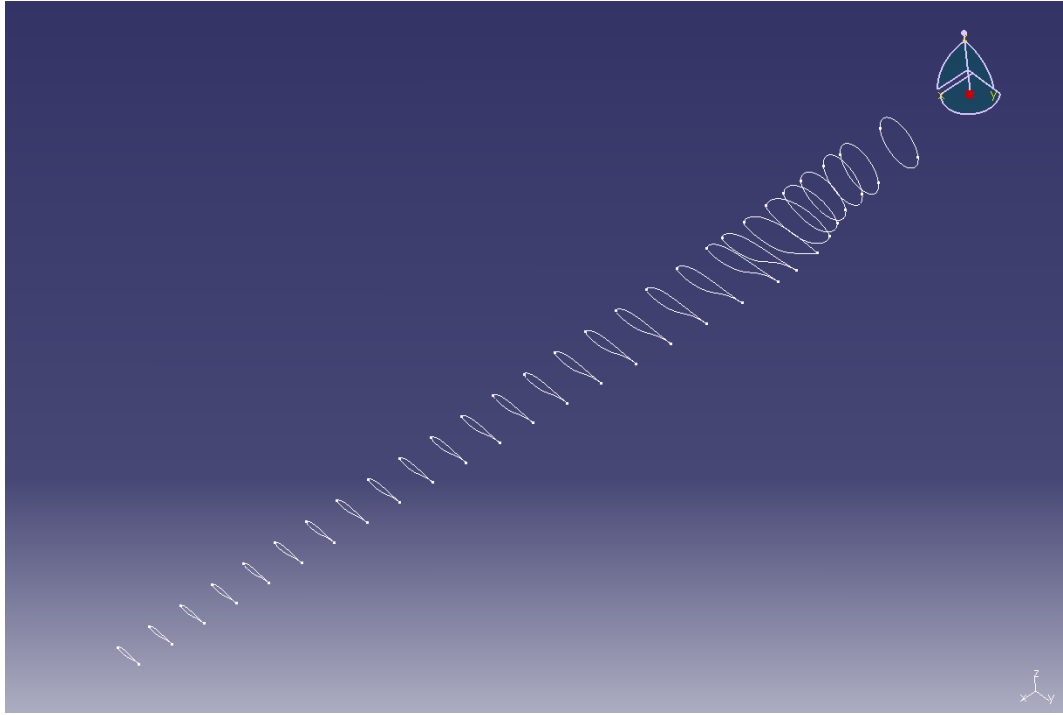
İlk hesaplamalardan sonra tasarım Reynolds (Re) sayısının 5 milyon civarlarında olduğu görülmüş ve seçilen FFA-W3-211 kesidinin aerodinamik özellikleri, $Re=5000000$ için, XFOIL 6.96 yazılımı kullanılarak saptanmıştır. Bu yazılım yardımıyla, hesaplanan Reynolds sayısı için, kesidin değişik hücum açılarına karşılık gelen taşıma ve sürüklenme katsayıları hesaplanabilmektedir. Tasarım hücum açısını ($\alpha_{tasarım}$) belirlemek için C_l/C_d oranının en yüksek olduğu değere sahip olan açı seçilmiştir. Elde edilen özellikler Şekil 5.5’te verilmiştir.



Şekil 5.5: Kesit Aerodinamik Özellikleri

PEMK modelinin yapıldığı MATLAB ortamında kullanılabilmesi için keside ait $c_l - \alpha$ ve $c_d - \alpha$ grafikleri, en küçük kareler yöntemiyle 6. dereceden denklemler halinde tanımlanmıştır.

PEMK hesaplamalarında esas alınan %20-%100 pala açıklığı boyunca Şekil 5.6’da gösterildiği gibi tek cins kesit kullanılmıştır. Pala kökünden %5 pala boyuna kadar olan kısımda göbek bağlantısı için çembersel kesit; %5-%20 pala boyu aralığında ise geçiş kesitleri tanımlanmıştır.



Şekil 5.6: Pala Kesitleri

5.3.4 PEMK Modeli Oluşturulması

Bölüm 3.2’de verilen PEMK kullanılıp Bölüm 3.3.5’teki genel PEMK algoritması esas alınarak, en iyi pala geometrisini ve tasarımın yapıldığı çalışma koşulundaki tasarım yüklerini veren PEMK modeli oluşturulmuştur.

Tüm pala 100 istasyona bölünerek, %20’ye kadar olan kısmın taşımaya ve güce etkisi çok düşük olduğu için ihmal edilerek, diğer her bir istasyona ait geometrik ve aerodinamik veriler hesaplanmıştır.

Bu modelde çalkantılı iz durumu göz önüne alınıp $a > 0,4$ durumu için Glauert düzeltmesi uygulanmıştır. Ayrıca etkin kayıp düzeltme çarpanı da Prandtl göbek ve uç kayıp çarpanlarının çarpıyla ifade edilmiştir.

5.3.5 En İyi Pala Geometrisinin Belirlenmesi

Bu çalışmada; en iyi pala geometrisi, belirli istasyonlardaki veter ve burulma dağılımlarıyla aşağıdaki kabuller altında belirtilmiştir:

- Uç kayıpları ihmal edilerek ($F_{uç} = 1$)
- İndüklenmiş hız en iyi değeri alınarak ($a = \frac{1}{3}$) ve
- Sürüklenme etkisi ihmal edilerek.

Sırasıyla en iyi veter ve burulma dağılımını veren aşağıdaki formüller kullanılmıştır:

En iyi veter dağılımı:

$$c = \frac{8\pi r(1 - \cos \phi)}{BC_{tasarım}} \quad (3.40)$$

En iyi burulma dağılımı:

$$\theta = \phi - \alpha_{tasarım} \quad (3.41)$$

5.3.6 Tasarım Yükleri

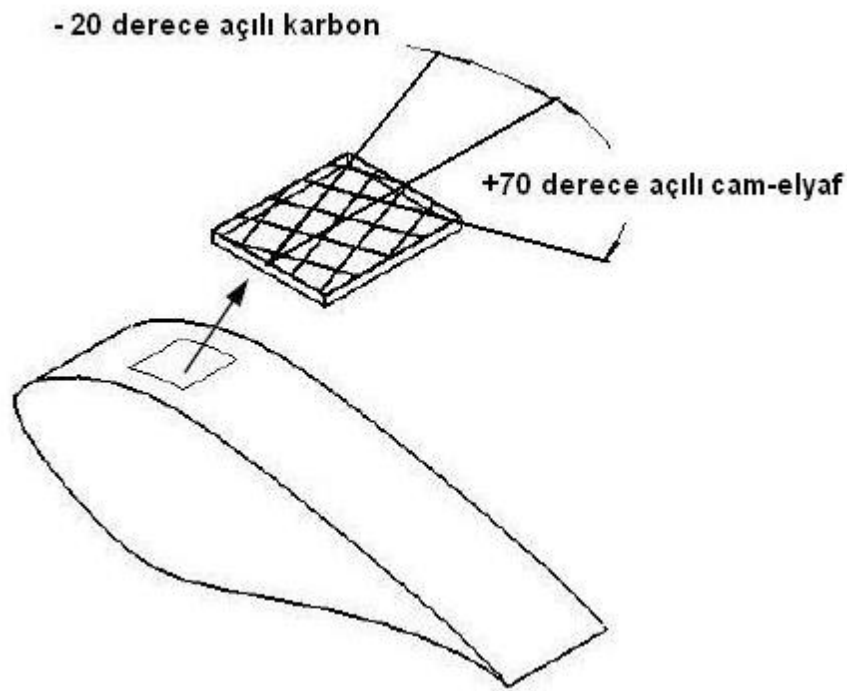
Tasarım yükleri, IEC standartları güç üretimi hız değerleri göz önüne alınarak bulunmuştur [20]. Buna göre güç üretimi durumu için normal çalkantı modeline (NÇM) uygun olarak türbin göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızı, tasarım hızına eşit alınmıştır.

$$V_{göbek} = V_{tasarım} = 10,5 \text{ m / s} \quad (5.3)$$

Buradan her bir istastona etki eden taşıma (L), sürüklenme (D) kuvvetleri ile dönme düzlemine dik (F_n) ve teğetsel (F_t) kuvvetler hesaplanmıştır.

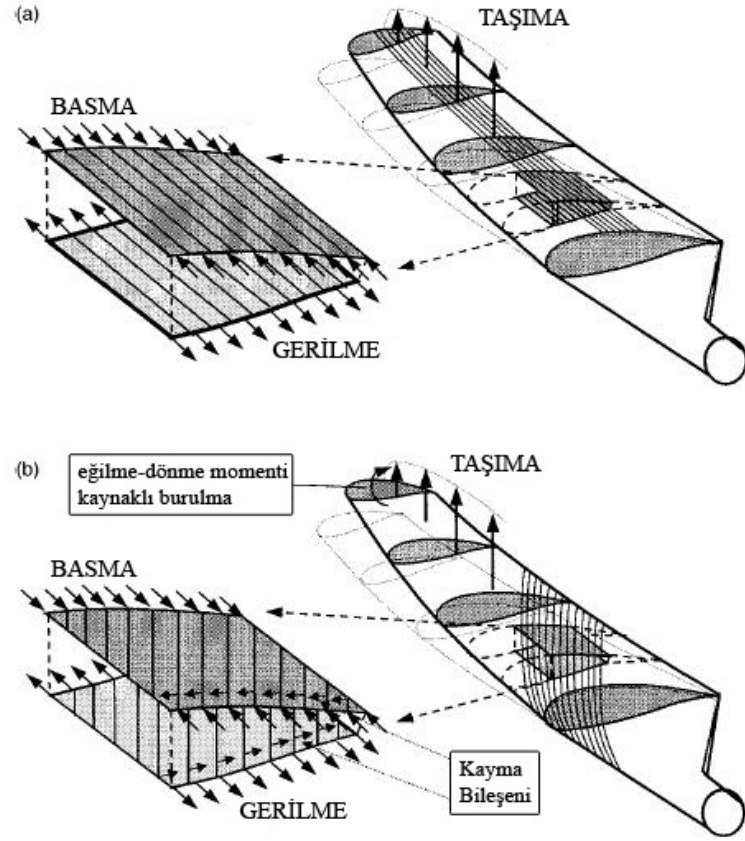
5.3.7 Malzeme Belirlemesi

Burulma bağlaşımı, kanat açıklığı boyunca oluşan eğilme kuvvetinin pala kesidinde yerel hüçüm açısı ve aerodinamik kuvvetleri değıştiren burulmaya yol açtığı bir aeroelastik uydurma biçimidir. Karbon/elyaf-cam/elyaf birleşimli bir pala katmanıyla yüksek derecede bir yapısal bağlaşım sağlanabilir. Şekil 5.7’de karbon elyaflar, uzunlamasına pala eksenine -20° ve cam elyafların da buna dik olarak uzunlamasına pala eksenine $+70^\circ$ eğim yapacak şekilde yerleştirildiği bir tasarım görölmektedir. Bu tür pala tasarımlarının üretim, yapısal bütünlük ve maliyet açısından uygulanabilirliği, sürdürölen çalışmalarda ele alınmaktadır [17].



Şekil 5.7: Çapraz Karbon - Cam/Elyaf Kabuk [17]

Ayrıca geleneksek elyaf yayılması ile açılı elyaf yayılmasını durumlarındaki yüklemeyi gösteren Şekil 5.8 aşağıda verilmiştir:



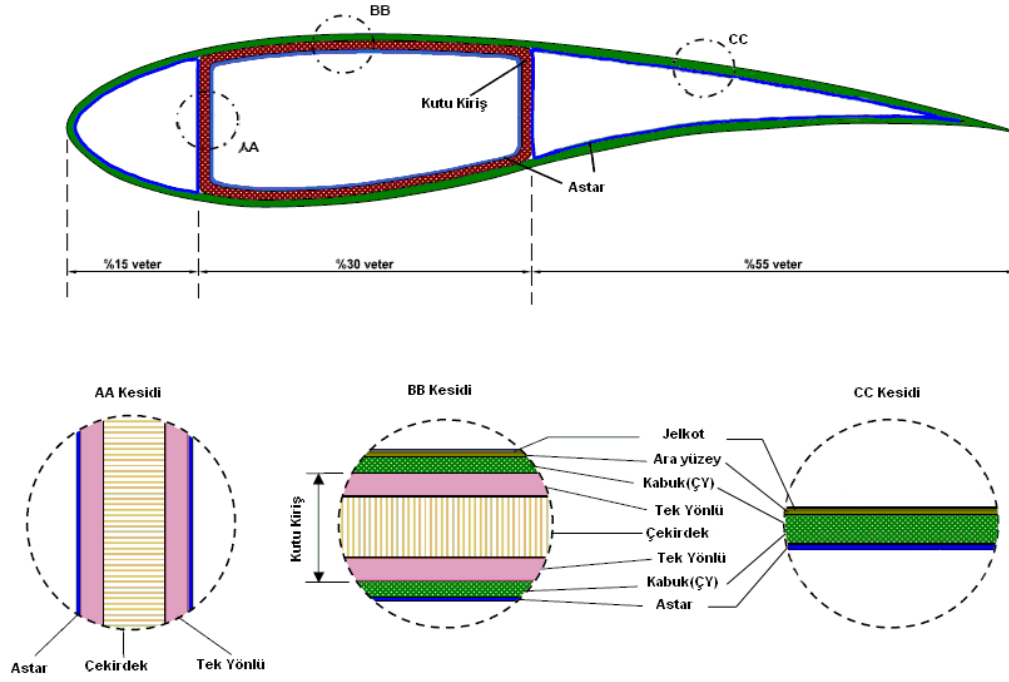
Şekil 5.8: (a) Geleneksek Paladaki Elyaf Yönelimi; (b) Eğilme-Burulma Yönelimli Paladaki Elyaf Yönelimi [18]

Pala yapımında kullanılan genel malzeme özellikleri ise Tablo 5.3'te gösterildiği gibidir:

Tablo 5.3: Palalarda Kullanılan Genel Malzeme Özellikleri [2]

Değişken Malzeme	Özgül ağırlık γ g/cm ³	Dayanım sınırı σ_B N/mm ²	Elastisite modülü E kN/mm ²	Özgül kırılma dayanımı σ_B/γ km	Özgül elastisite modülü E/ γ 10 ³ km	Yorulma dayanımı $\pm \sigma_A$ 10 ⁷ N/mm ²
Çelik St 52	7,85	520	210	6,6	2,7	60
Alaşımlı çelik, 1.7735.4	7,85	680	210	8,7	2,7	70
Alüminyum, AlZnMgCu	2,7	480	70	18	2,6	40
Alüminyum, AlMg5 (kaynak yapılabilir)	2,7	236	70	8,7	2,6	20
Titanyum alaşımı, 3.7164.1	4,5	900	110	20	2,4	-
Cam/elyaf-epoksi* kompozit	1,7	420	15	24,7	0,9	35
Karbon/elyaf-epoksi* kompozit	1,4	550	44	39	3,1	100
Aramid/elyaf-epoksi* Kompozit	1,25	450	24	36	1,9	-
Ahşap (Sitka Spruce)	0,38	≈ 65	≈ 8	≈ 17	≈ 2,1	≈ 20
Ahşap/epoksi (Epoksi dolgu: Hacmen %40)	0,58	≈ 75	≈ 11	≈ 13	≈ 1,9	≈ 35

Yapılan çalışmada elde edilen en iyi pala tasarımına uygun malzeme ve yapı özellikleri atanarak geleneksel ve bağlaşımlı iki tasarım oluşturulmaya çalışılmıştır. Tasarımın kesit biçimlenmesi Şekil 5.9'daki gibidir. Pala kirişinin perdeleri %15-%45 veter boyuna yerleştirilmiştir.



Şekil 5.9: Kesit Biçimlenmesi [23]

Her iki pala tasarımının kabuğu için çaprazlaşmasız tek yönlü çift eksenli cam/elyaf kullanılmıştır. Pala kirişi olarak ise geleneksel palada çaprazlaşmasız tek yönlü karbon/çift eksenli cam; bağlaşımlı palada ise +20 derece karbon, -70 derece cam/elyaf kullanılmıştır. Çeşitli yönelim açılarında 20° karbon/elyafın cam/elyafla birleşim özellikleri Tablo 5.4’te gösterilmiştir.

Tablo 5.4: Çeşitli Yönelim Açılarında 20° Karbon/Elyaf-Cam/Elyaf Birleşimi [19]

Cam/Elyaf Açısı [derece]	E_x [GPa]	E_y [GPa]	G_{xy} [GPa]	ν_{xy}	$\eta_{x,xy}$	Uzama (%)	Pala Boyunca Bağlı Burulma Dayanımı
70	22,2	11,6	3,89	0,15	-1,78	0,26	0,09
35	20,8	7,5	3,90	0,41	-1,75	0,40	0,13
0	26,3	6,9	4,29	0,56	-1,76	1,17	0,49
-15	30,0	6,9	5,29	0,70	-1,56	0,55	0,26
-30	29,3	7,1	5,95	0,85	-1,42	0,50	0,23
-45	25,6	7,7	5,60	0,88	-1,47	0,75	0,31
-60	22,2	9,2	4,65	0,75	-1,62	0,92	0,33

Kullanılacak malzemelerin özellikleri Tablo 5.5'te verilmiştir. Birinci satırdaki malzeme özellikleri, her iki palanın kabuğu için; ikinci satırdakiler, geleneksel, bağlaşımsız pala için; üçüncü satırdakiler satırdakiler ise bağlaşımlı pala için verilmiştir.

Tablo 5.5: Katman Mekanik Özellikleri ve Dayanım Verileri [19]

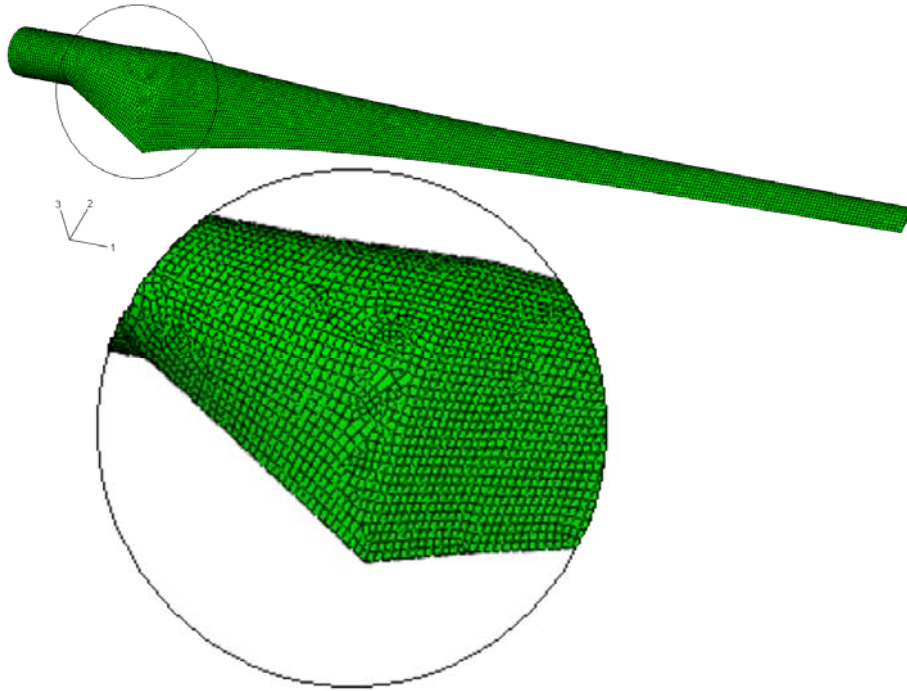
Açıklama	Elastik sabitler [GPa]			v_{xy}	Yoğunluk [kg/m ³]	Karakteristik Mukavemet (%)		Tasarım Mukavemeti (%)	
	E_x	E_y	G_{xy}			Çekme	Basma	Çekme	Basma
Tek yönlü çift eksenli cam/elyaf, çaprazlaşmasız	29,0	10,2	6,0	0,31	1880	2,70	1,55	1,10	0,63
Tek yönlü karbon / çift eksenli cam, çaprazlaşmasız	70,8	9,1	4,1	0,35	1562	1,35	0,90	0,55	0,37
+20 derece. karbon, -70 derece cam/elyaf	20,9	10,7	4,1	0,60	1562	0,91	0,91	0,37	0,37

Kutu kiriş, 3,5 mm'lik 4 katmandan; kabuk ise 3,5 mm'lik 6 katmandan oluşacak şekilde düşünülmüştür. Bütün bu özellikler ABAQUS yazılımında tanımlanıp, çalışma koşulundaki yükleme altında analizler gerçekleştirilmiştir.

5.4 Yapısal Analiz

Yapısal analizde, MATLAB yazılımıyla hazırlanmış kod ile yapılan aerodinamik tasarım için, pala kabuğu ve kirişinde kullanılan gerekli malzeme özellikleri, Bölüm 5.3.7’de bahsedildiği şekilde sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapan ABAQUS yazılımında tanımlanmış; doğrusal iki boyutlu çarpılma elemanları kullanılarak kesit özellikleri çıkartılmış ve bu özellikler daha sonra kabuk elemanları özellikleri olarak atanıp modal ve statik analiz gerçekleştirilmiştir. Böylelikle geleneksel ve bağlaşımlı yapıdaki, aynı geometrik özelliklere sahip iki tasarımın analiz sonuçları kullanılarak, uygun malzeme tanımlamasıyla geleneksel bir palaya istenilen güç çıktısını sağlayabilecek esnek bir yapı kazandırılması amaçlanmıştır.

Analizler için dörtgen elemanlar kullanılarak oluşturulan örgü modeli Şekil 5.10’da gösterilmiştir.

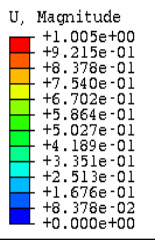
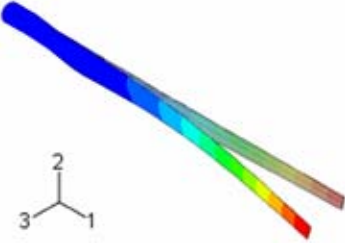
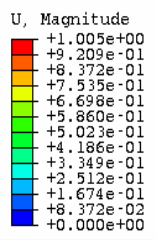
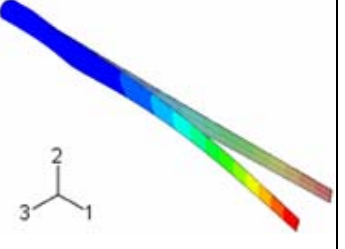
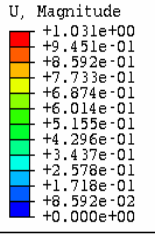
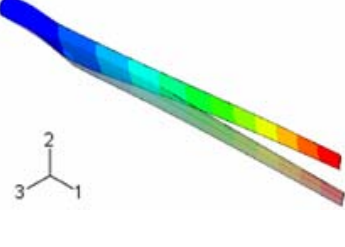
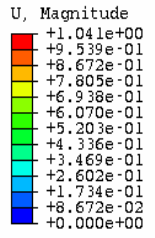
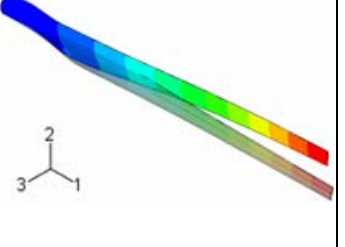
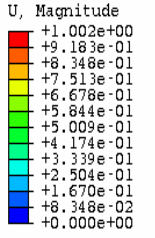
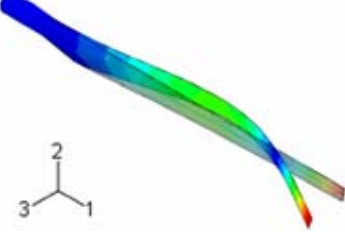
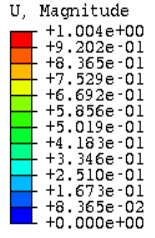
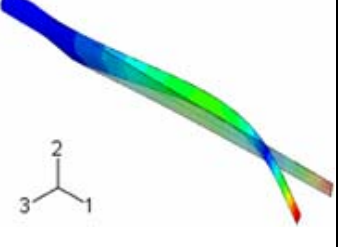
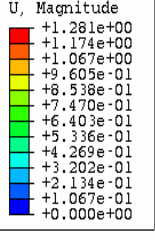
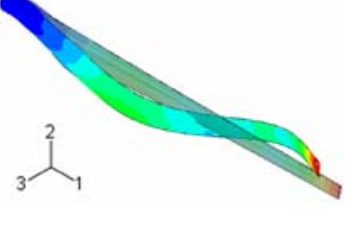
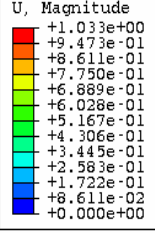
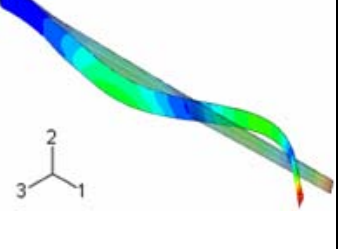
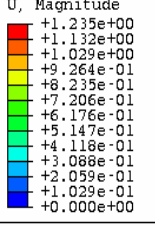
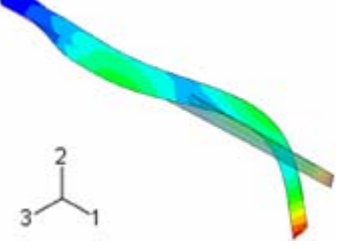
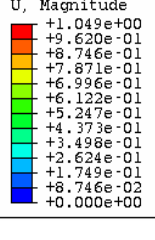
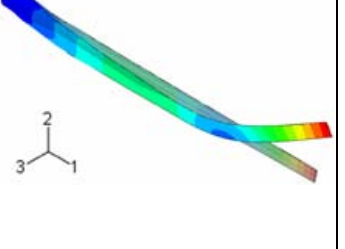


Şekil 5.10: Pala Örgü Modeli

Belirlenmiş olan tasarımlar, malzeme özellikleri ve hesaplanmış olan yükler altında gerçekleştirilen modal ve statik analizler aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

5.4.1 Modal Analiz

Her iki tasarım için serbest titreşim durumlarını elde etmek için gerçekleştirilen modal analiz sonucu oluşan ilk 5 mod Şekil 5.11’deki gibi gerçekleşmiştir.

Mod	Geleneksel Tasarım		Eğilme-Burulma Bağlaşımlı Tasarım	
	Yer Değişirme [m]	Mod Şekli	Yer Değişirme [m]	Mod Şekli
1				
2				
3				
4				
5				

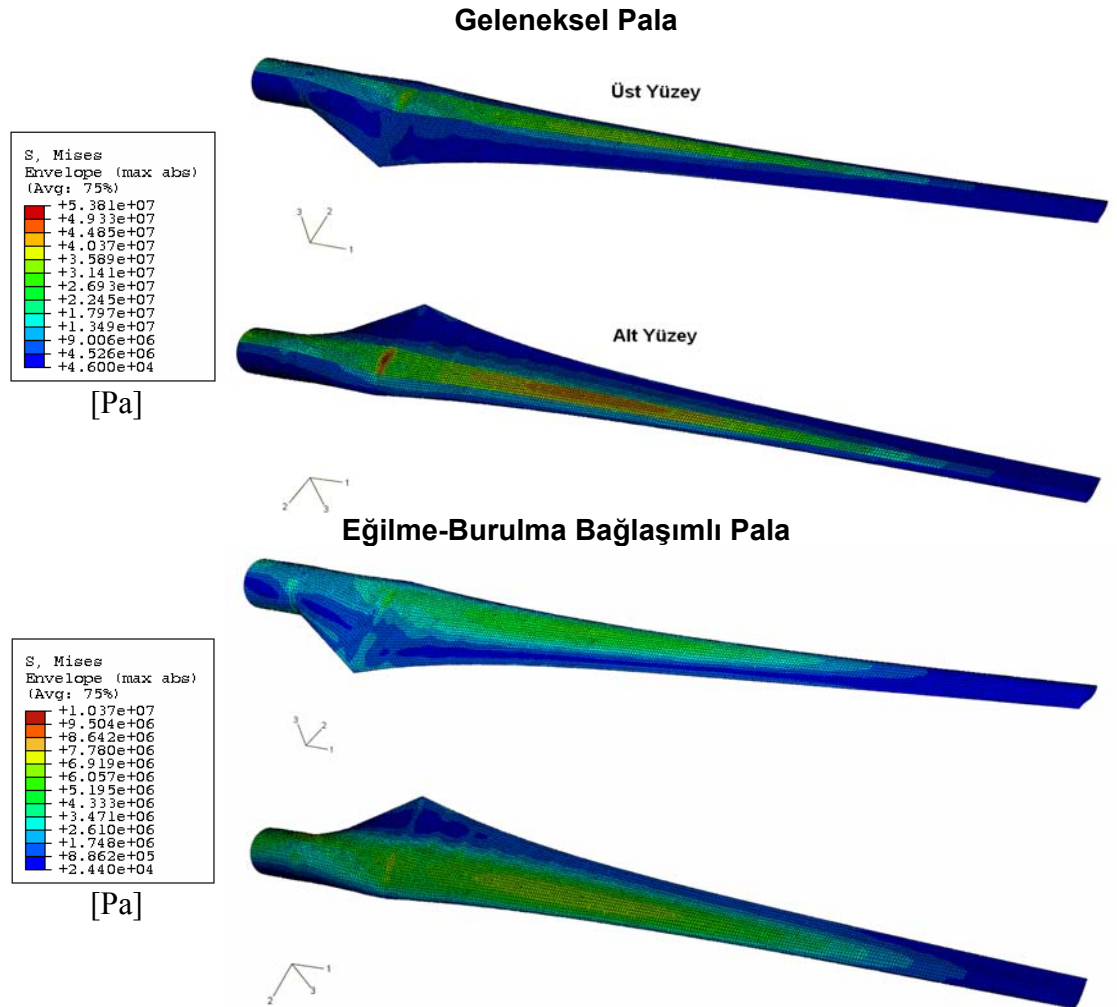
Şekil 5.11: Modal Analiz Sonuçları

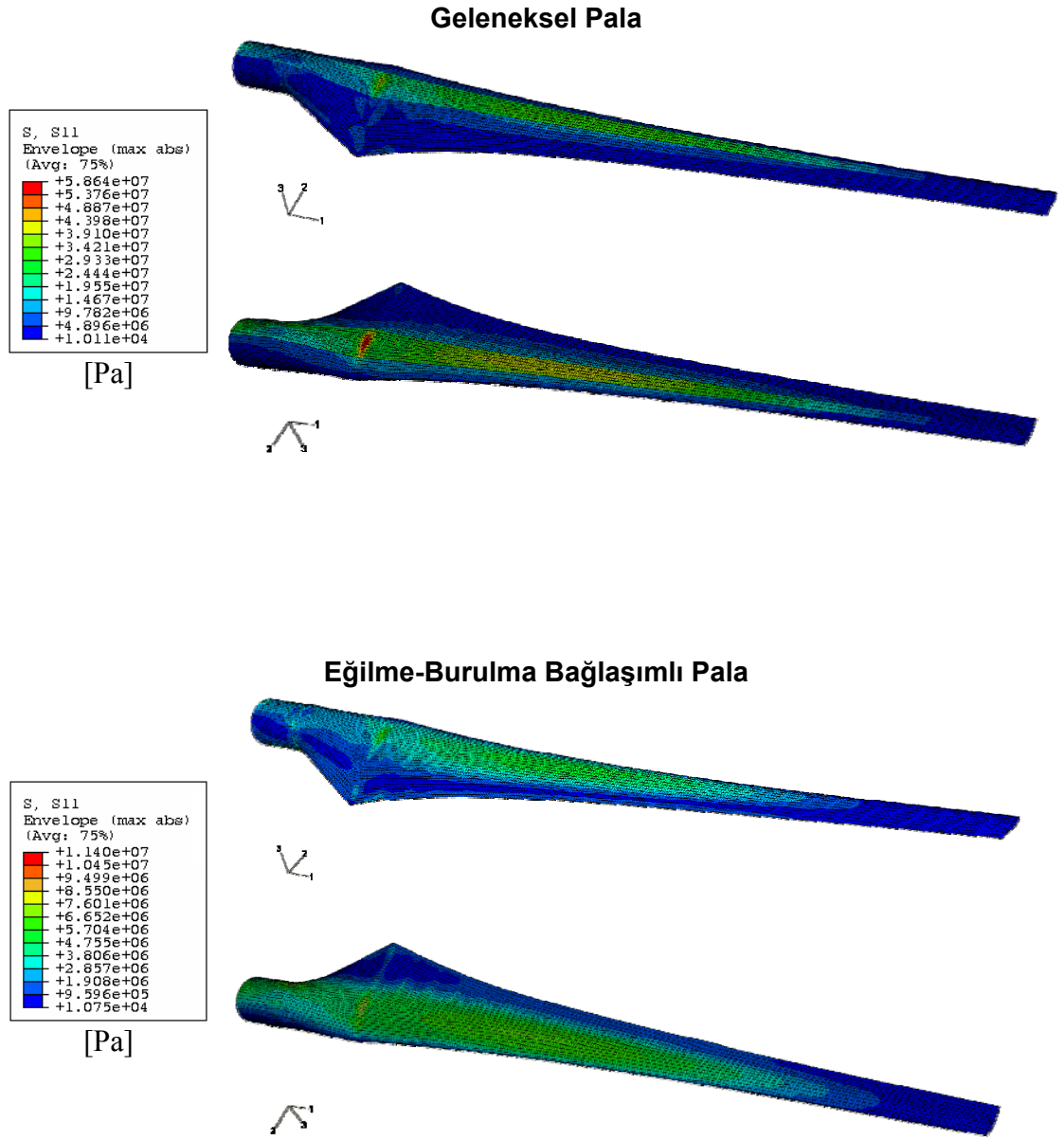
5.4.2 Statik Analiz

MATLAB kodu ile hesaplanan, dönme düzlemine dik ve teğetsel kuvvetler etkisi altındaki yükleme durumunda yapılan analiz sonuçları; tanımlı çalışma koşulunda aerodinamik kuvvetler ve merkezkaç kuvvetleri etkisi altındaki Von Mises gerilmeleri, pala açıklık eksenine boyunca oluşan S_{11} aksenal uzama gerilmeleri ve yer değiştirmeler olarak sunulmuştur. Pala açıklık eksenine göre simetri olmadığı için her koşulda sırasıyla pala üst ve alt yüzeyinde oluşan gerilme ve yer değiştirmeler ayrı ayrı gösterilmiştir.

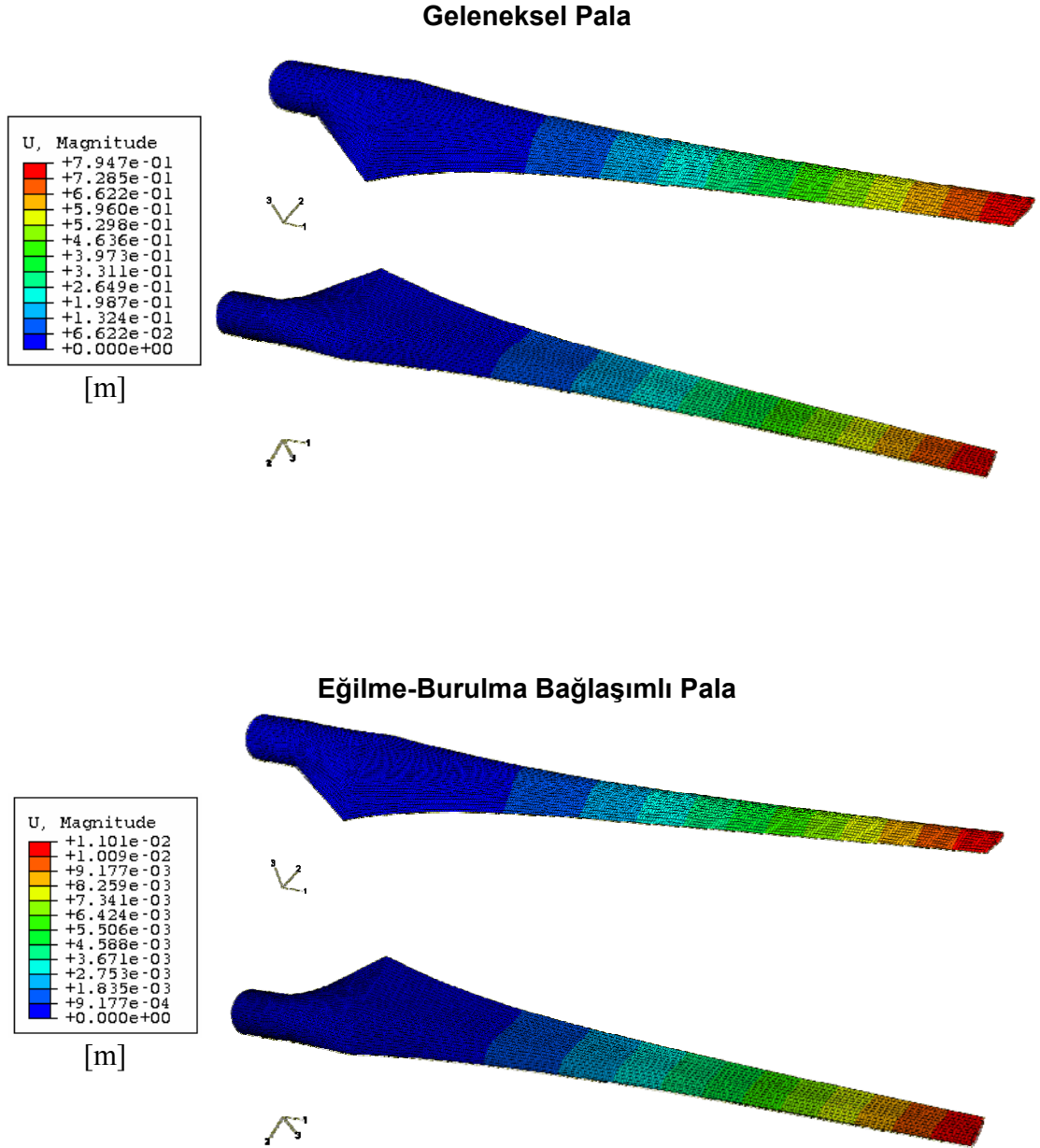
5.4.2.1 Aerodinamik Kuvvetler Etkisi Altındaki Analiz

Geliştirilen MATLAB kodu ile hesaplanan, dönme düzlemine dik ve teğetsel kuvvetlerin etkisi altında yapılan analiz sonucunda Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14'teki çıktılarına ulaşılmıştır.





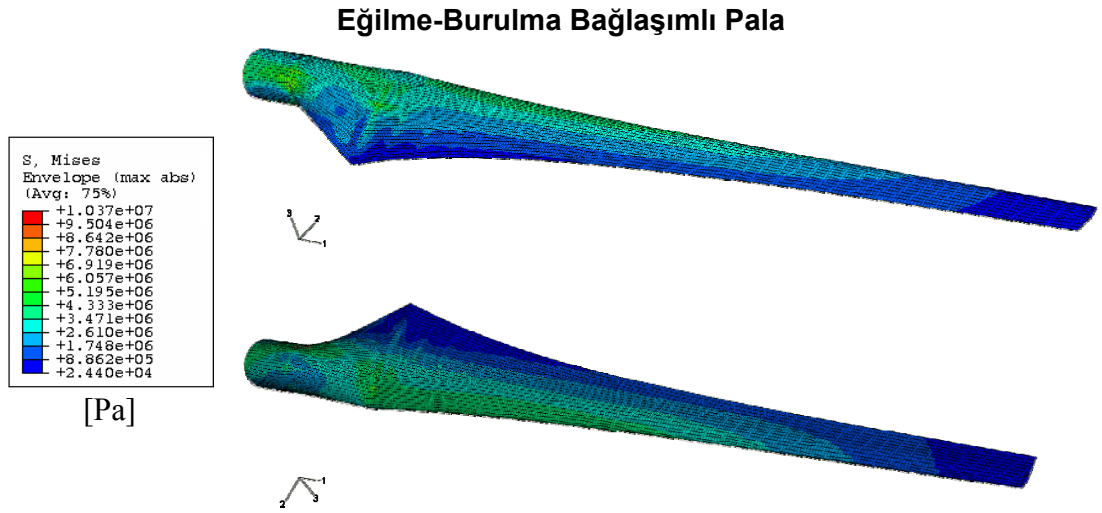
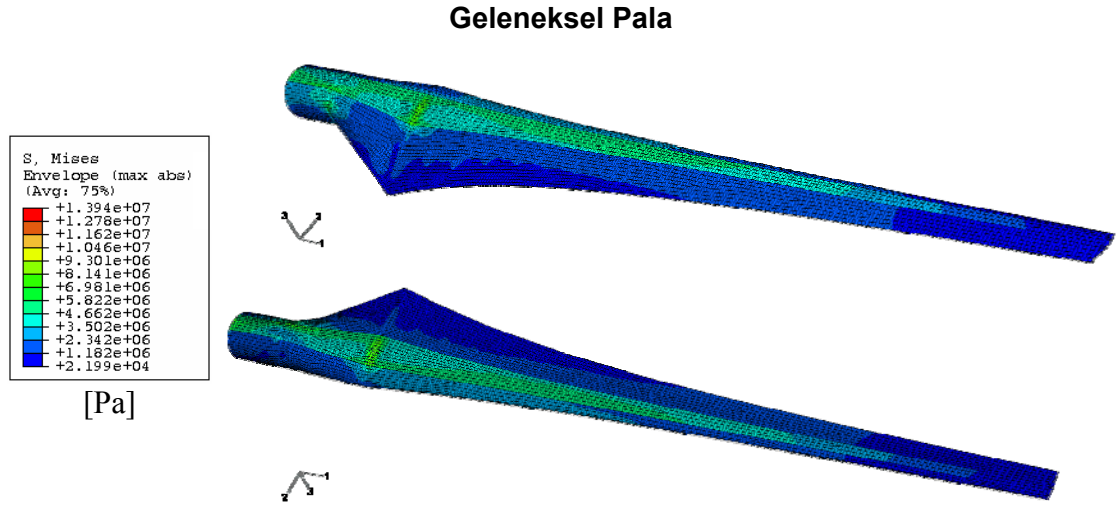
Şekil 5.13: Aerodinamik Kuvvetler Etkisi Altındaki S_{11} Gerilmeleri



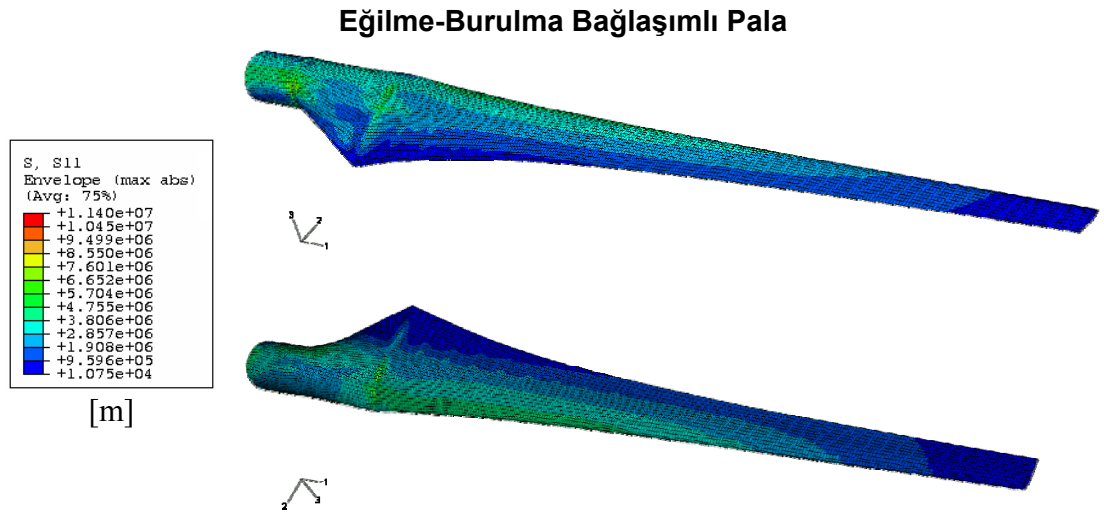
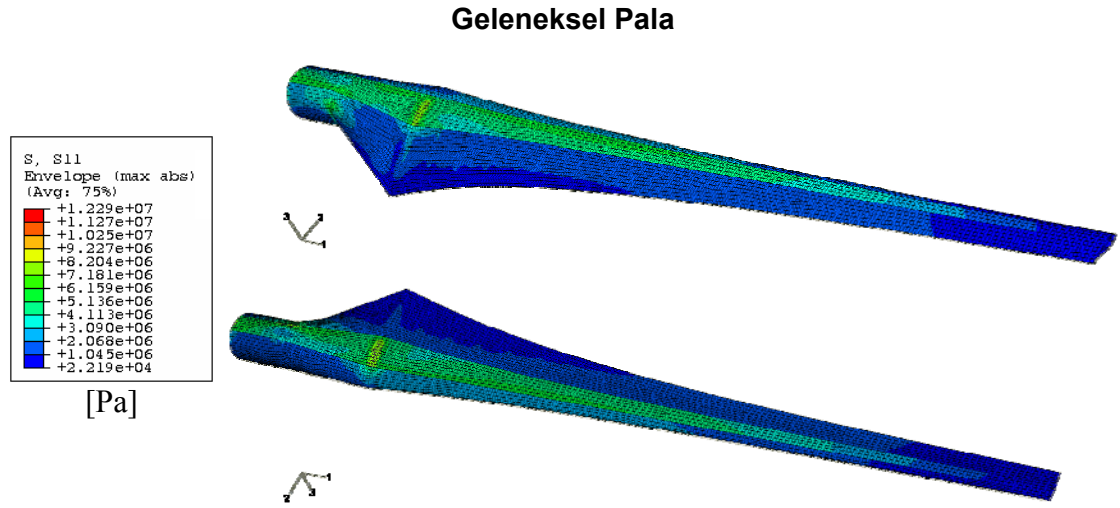
Şekil 5.14: Aerodinamik Kuvvetler Etkisi Altındaki Yer Değiştirmeler

5.4.2.2 Merkezkaç Kuvveti Etkisi Altındaki Analiz

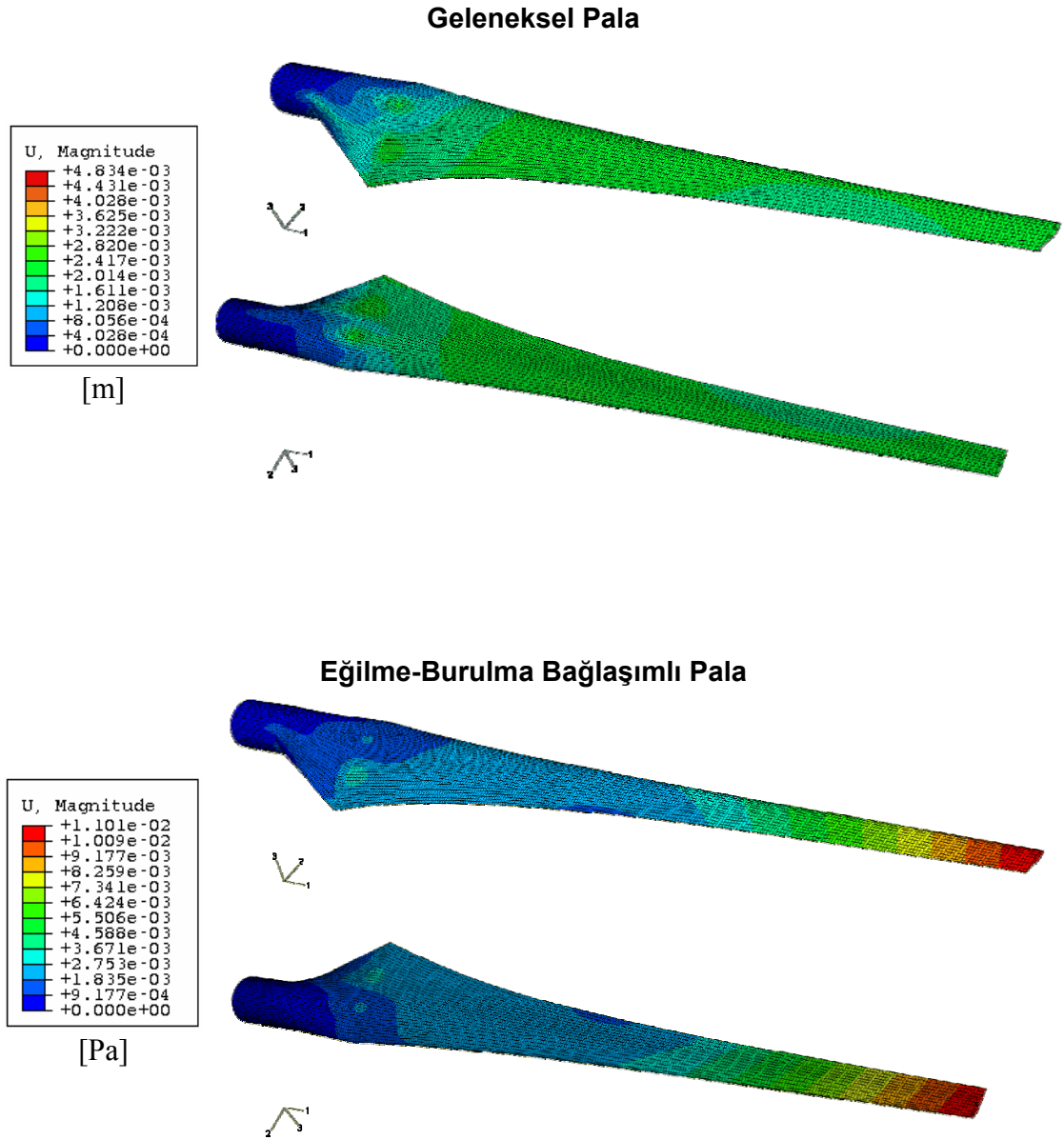
Belitilen rüzgâr hızında ($V_{ort}=7,5$ m/s) ve tasarım girdisi olarak kullanılan uç hız oranındaki ($\lambda=7$) çalışma koşulunda oluşan dönmeden ($\Omega=20,05$ rpm) kaynaklanan merkezkaç kuvveti etkisi altında yapılan analiz sonuçları Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17’de gösterilmiştir.



Şekil 5.15: Merkezkaç Kuvveti Etkisi Altındaki Von Misses Gerilmeleri



Şekil 5.16: Merkezkaç Kuvveti Etkisi Altındaki S_{11} Gerilmeleri

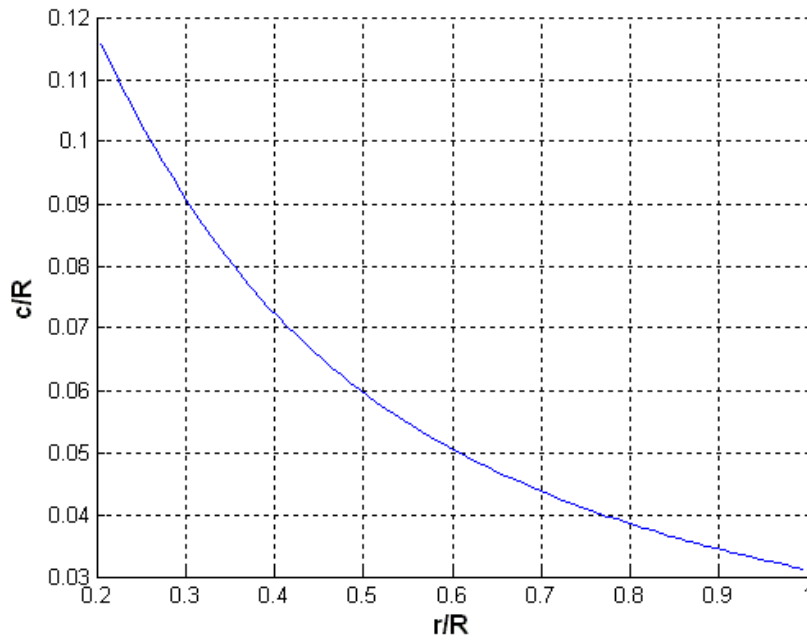


Şekil 5.17: Merkezkaç Kuvveti Etkisi Altındaki Yer Değiş-tirmeler

6 SONUÇLAR

PEMK kullanılarak yazılan kod sonucunda pala geometrisine ait aşağıdaki bulgular ile her bir istasyona ait yük bilgilerine ulaşılmıştır.

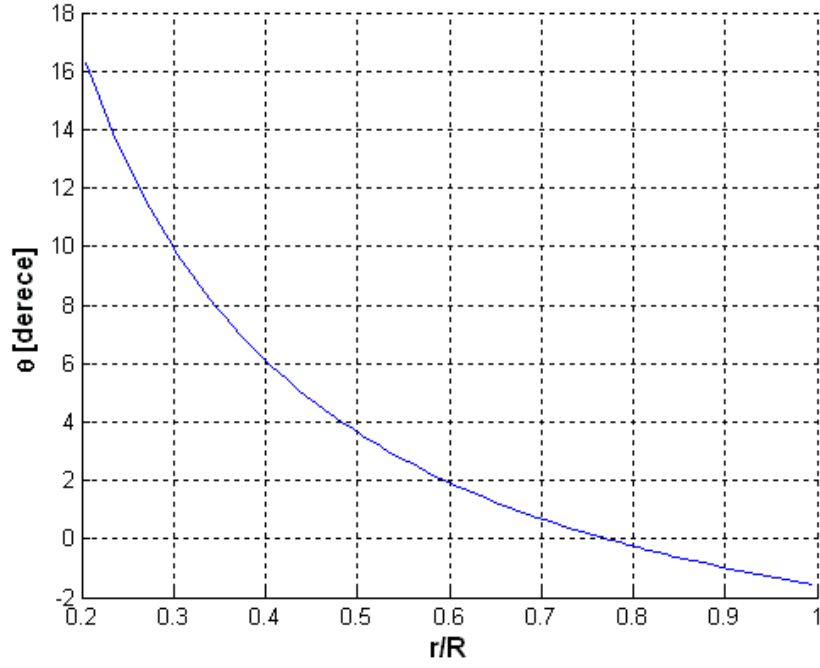
Pala veter boyu dağılımı, $\phi_{geometri}$ ve $C_{ltasarım}$ belirlenmesiyle birlikte (3.40) denklemi kullanılarak Şekil 6.1'deki gibi elde edilmiştir:



Şekil 6.1: Boyutsuz Veter Uzunluğunun Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi

En uzun veter boyu $c_{21}=4,0494m$, en kısa veter boyu ise $c_{100}=1,0931m$ olarak hesaplanmıştır.

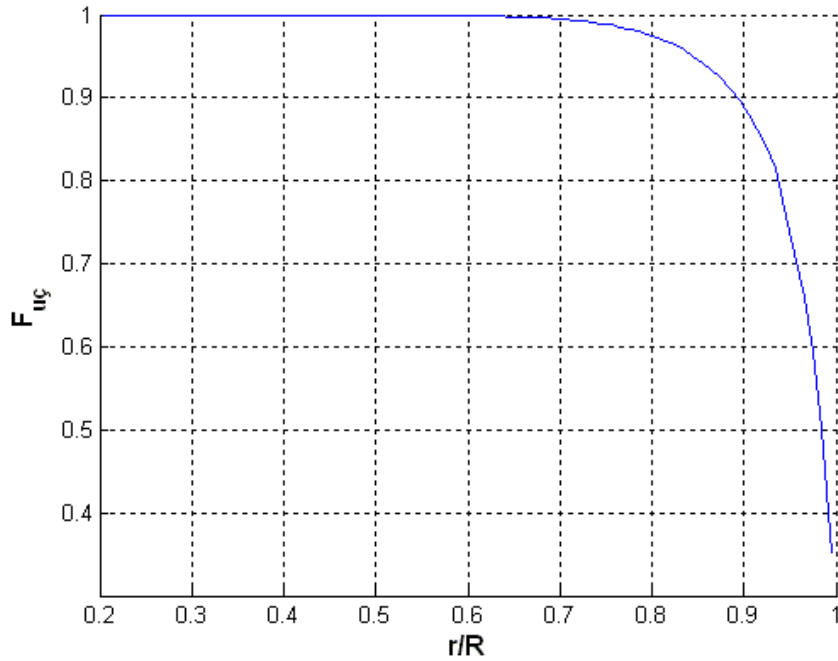
$\phi_{geometri}$ ve $\alpha_{tasarım}$ 'ın (3.41) denkleminde kullanılmasıyla bulunan θ dağılımı ise Şekil 6.2'de verilmiştir.



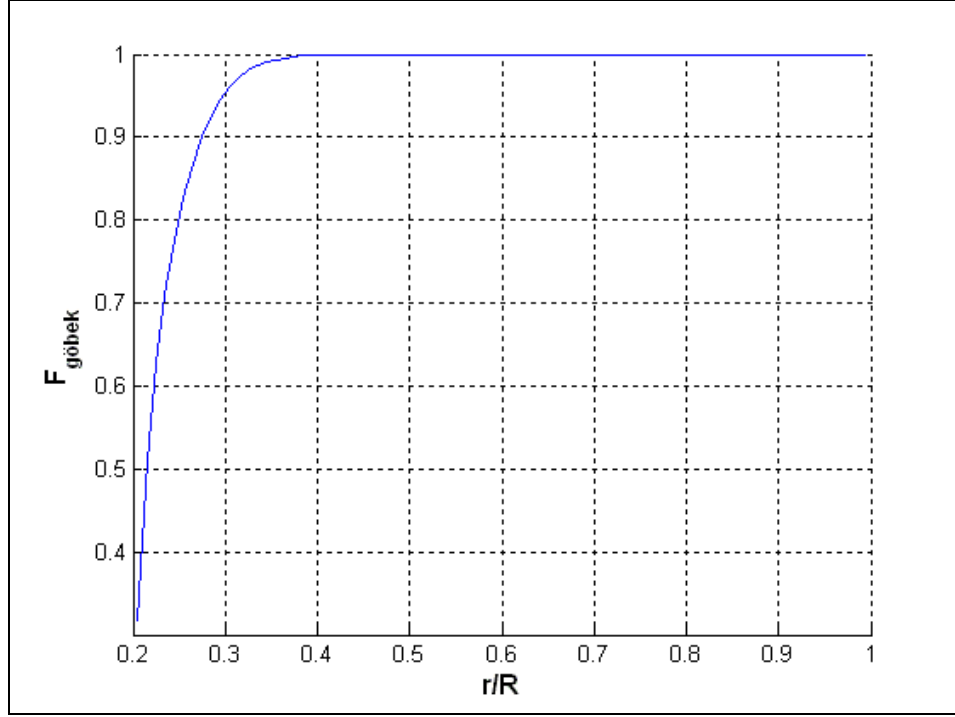
Şekil 6.2: Burulma açısının Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi

Kökteki burulma $\theta_{\text{burulma}21}=16.248^\circ$; uçtaki burulma ise $\theta_{\text{burulma}100}=-1,5531^\circ$ olarak hesaplanmıştır.

İterasyonlar sırasında Prandtl uç ve göbek kaybı çarpanları kullanılmıştır. Pala açıklığı boyuca bu çarpanların dağılımı (3.26), (3.27), (3.28), (3.29), (3.30) denklemleri kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 6.3, 6.4 ve 6.5 ile gösterilmiştir.

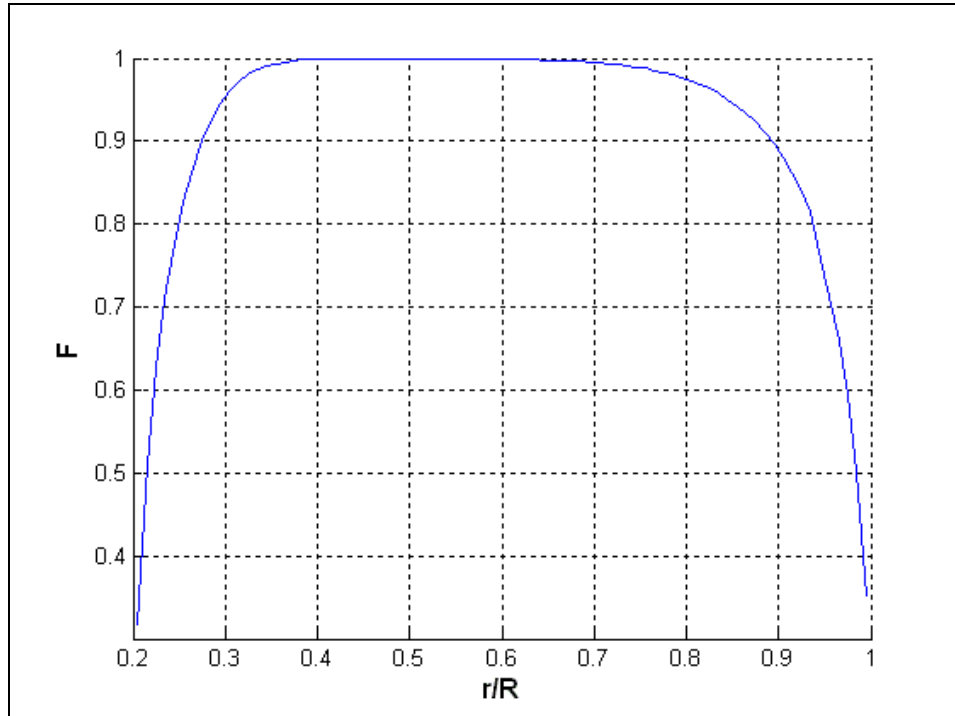


Şekil 6.3: Prandtl Uç Kaybı Çarpanının Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi



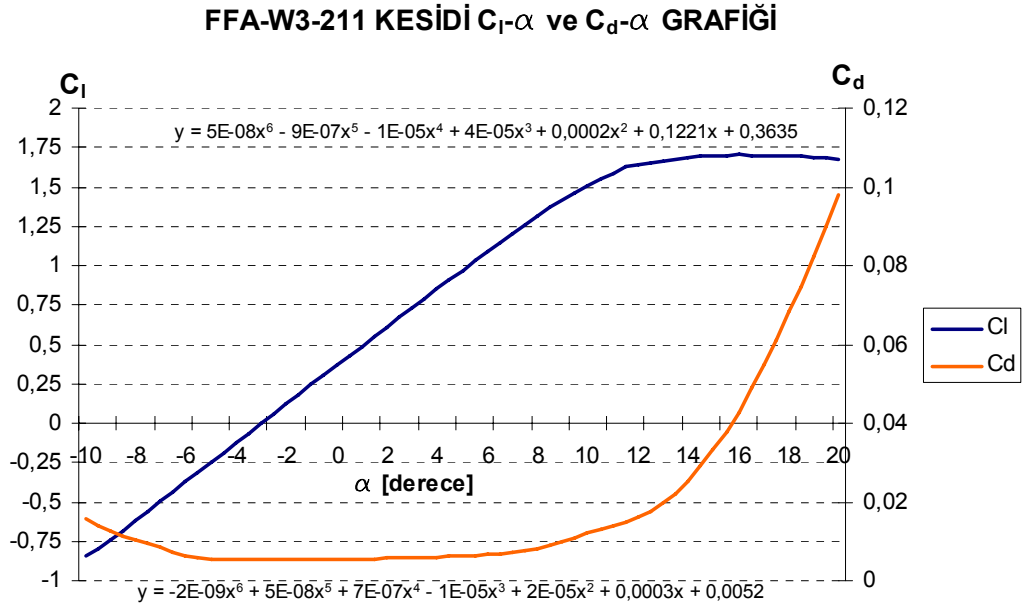
Şekil 6.4: Prandtl Göbek Kaybı Çarpanının Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi

Etkin göbek çarpanı; Prandtl göbek ve uç kaybı çarpanının çarpımıyla belirlenmiştir:



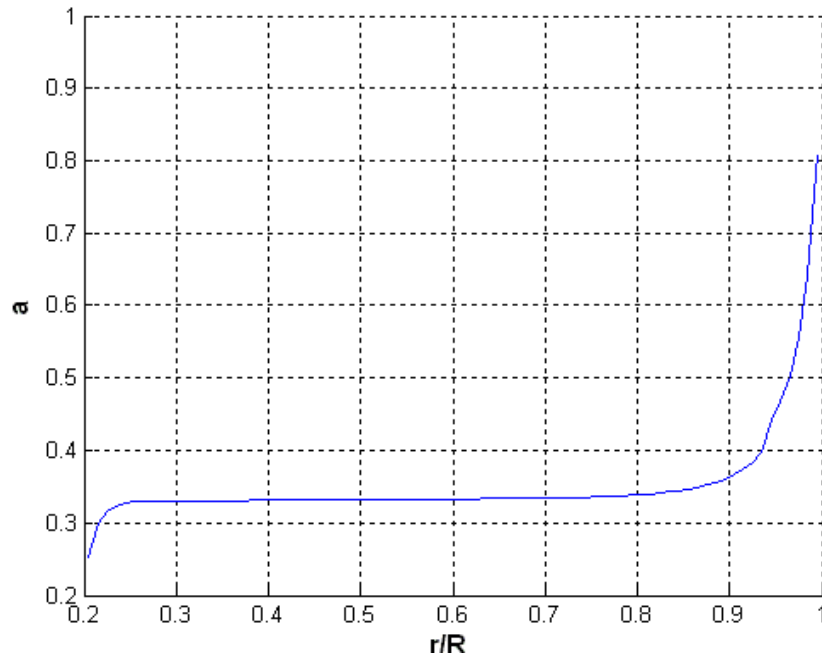
Şekil 6.5: Etkin Kayıp Çarpanının Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi

XFOIL ile elde edilen C_l - α ve C_d - α grafikleri Şekil 6.6’da görülmektedir. Verilerden geçirilen eğilim çizgisi denklemleri, iterasyonlar sırasında C_l ve C_d denklemleri olarak kullanılmıştır.



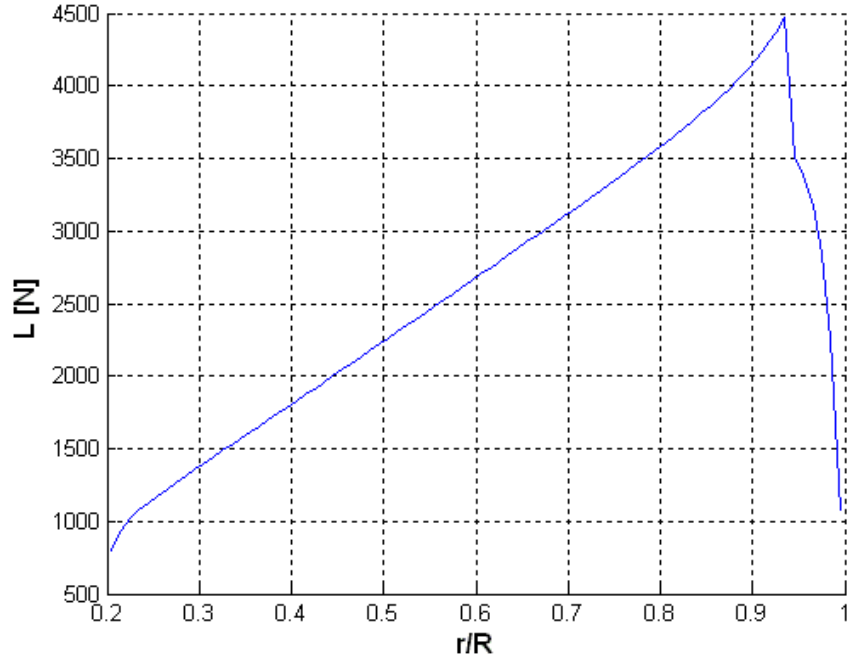
Şekil 6.6: FFA-W3-211 için C_l ve C_d ’nin α ile değişimi, ($Re=5.0E06$)

Eksenel indükleme çarpanı a , (3.24) denklemiyle hesaplanmaktadır. $a > 4$ olduğu durumlar için Glauert düzeltmesi yapılarak açıklık boyunca a dağılımı Şekil 6.7’deki gibi elde edilmiştir.

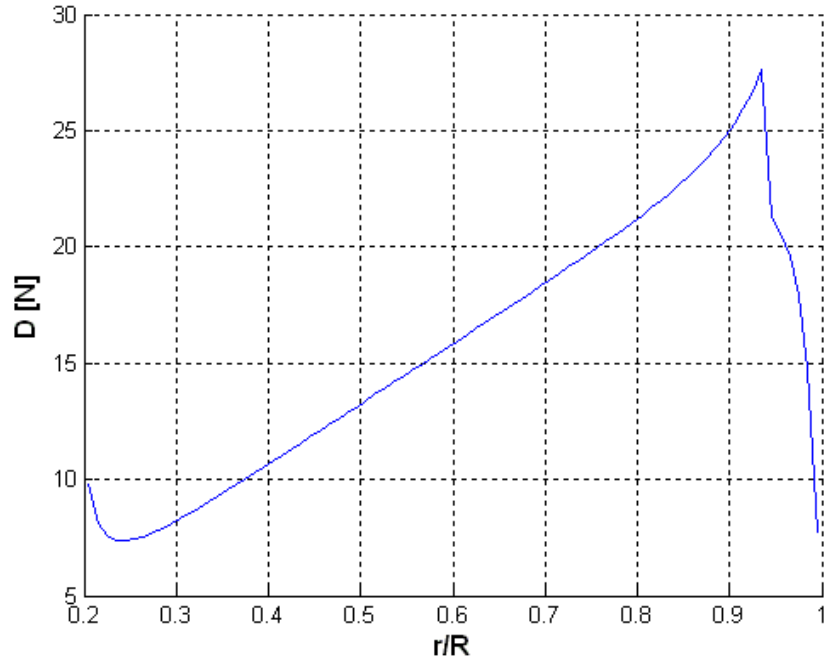


Şekil 6.7: Eksenel İndükleme Çarpanının Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi

İstasyondaki taşıma ve sürükleme kuvveti L ve D 'nin değişimi ise Şekil 6.8, 6.9'da verilmiştir.

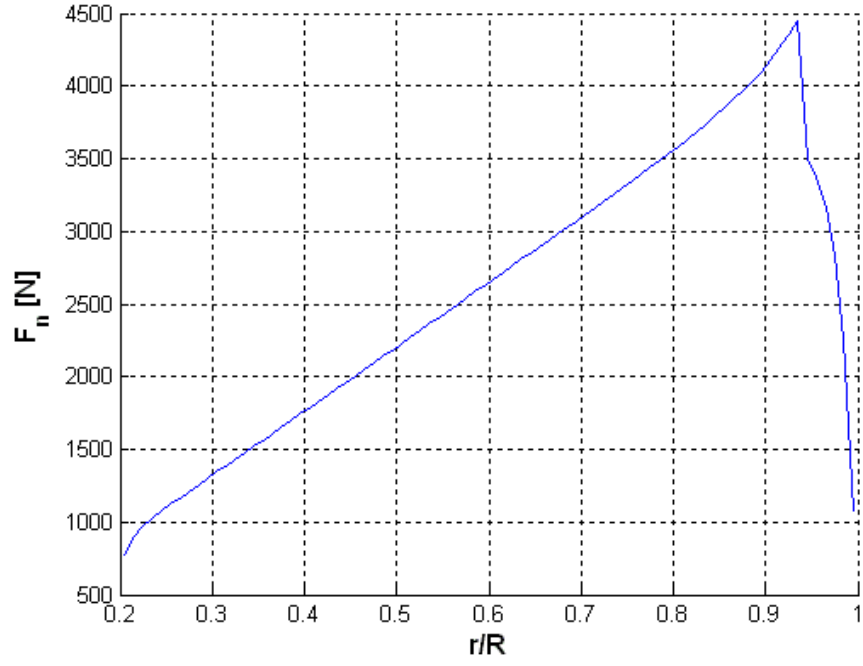


Şekil 6.8: Taşıma Kuvvetinin Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi

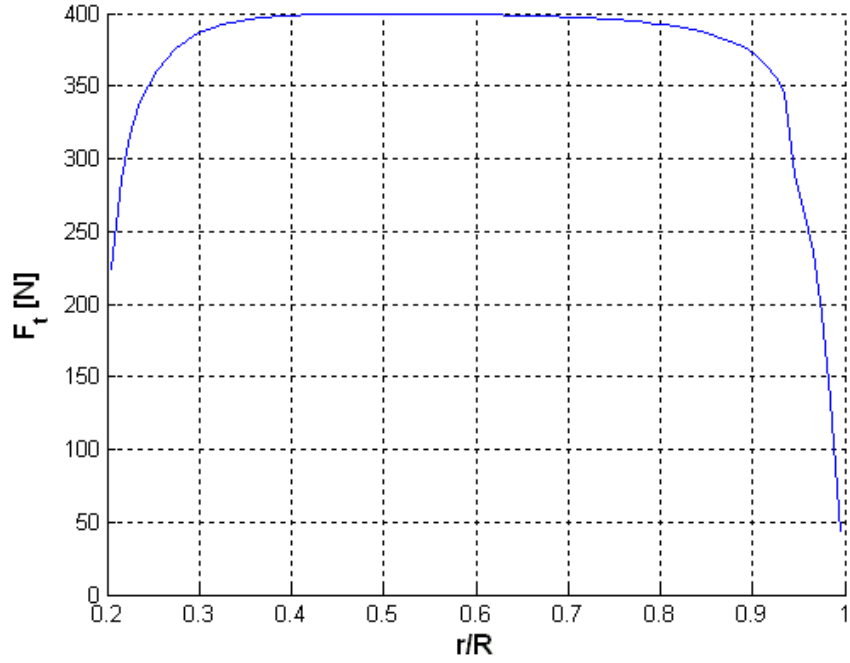


Şekil 6.9: Sürükleme Kuvvetinin Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi

İstasyondaki yerel kuvvet bileşenlerini F_N ve F_T 'nin değişimi ise Şekil 6.10, 6.11'de verilmiştir.

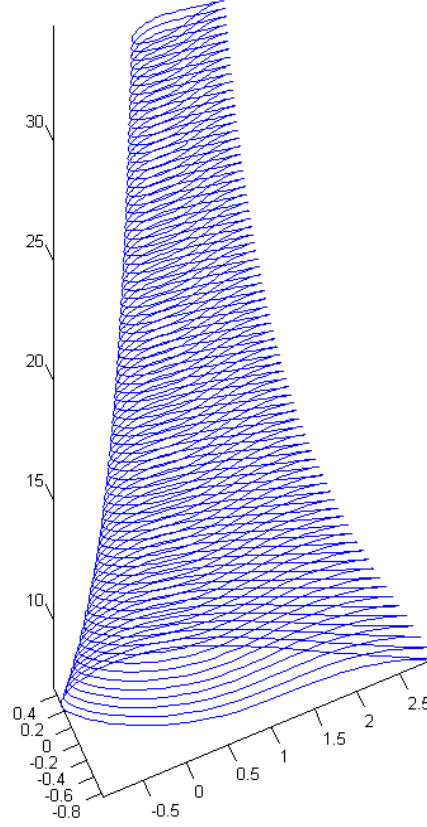


Şekil 6.10: Normal Kuvvetin Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi

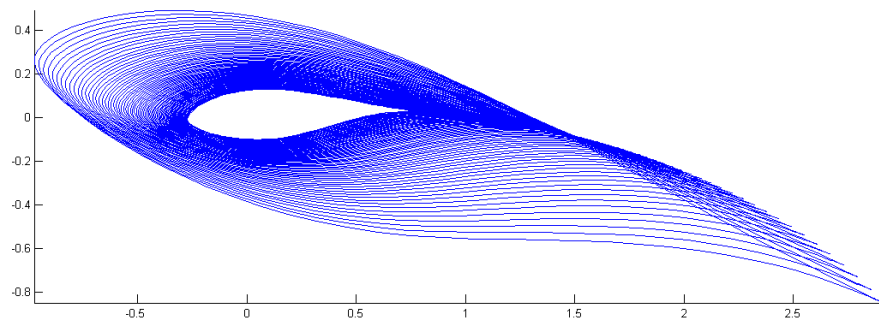


Şekil 6.11: Teğetsel Kuvvetin Boyutsuz İstasyon Uzaklığıyla Değişimi

PEMK sonuçları kullanılarak bulunan veter uzunlukları ve burulma dağılımı yardımıyla en iyi pala geometrisi Şekil 6.12 görüldüğü şekilde çizdirilmiş. Pala geometrisinin yandan görünüşü ise Şekil 6.13'te verilmiştir.

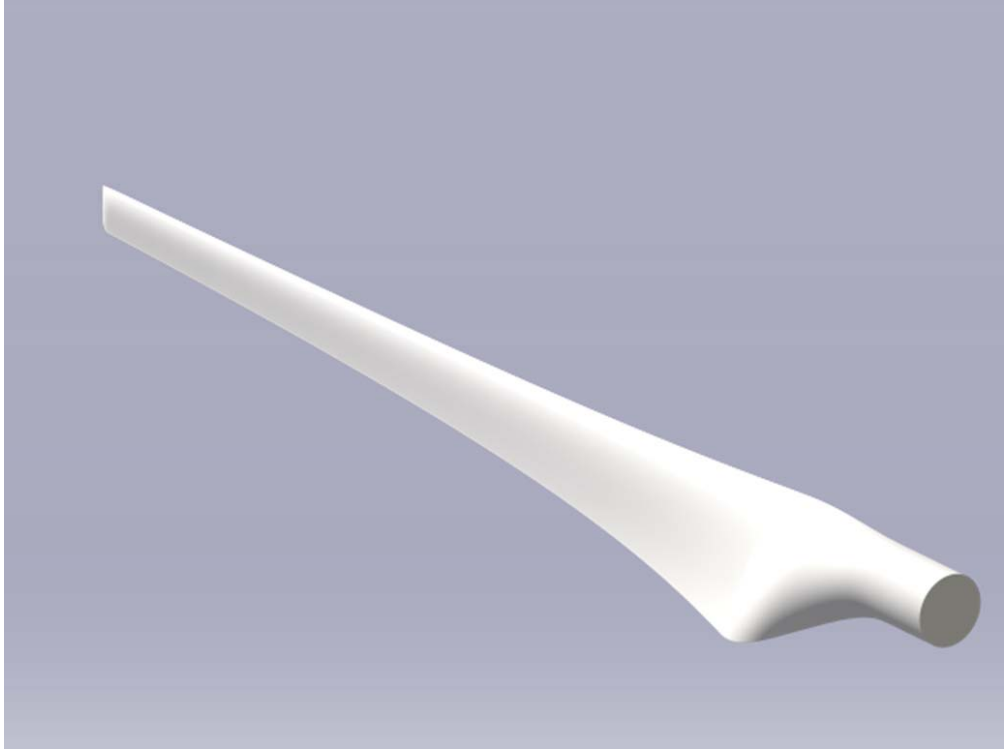


Şekil 6.12: Pala Geometrisi



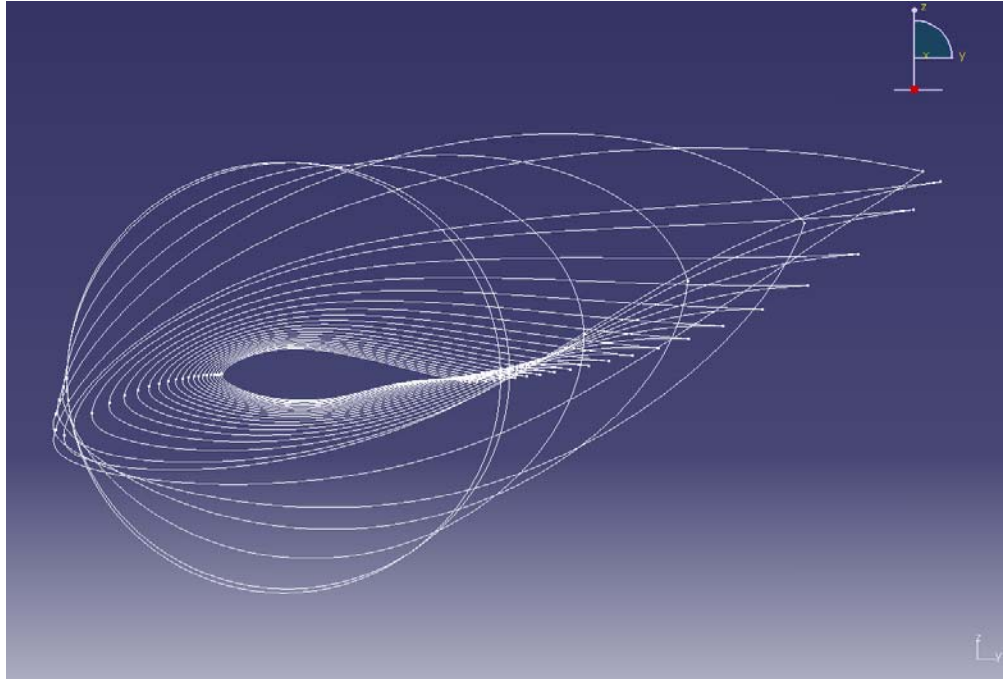
Şekil 6.13: Pala Geometrisi, Yandan Görünüş

Elde edilen en iyi pala şekli çıktılarıyla palanın 3 boyutlu kabuk modellemesi aşağıdaki gibi olmuştur:



Şekil 6.14: 3 Boyutlu Pala Geometrisi Kabuk

Kesitlerin görünümü ise Şekil 6.15'te görüldüğü gibidir:



Şekil 6.15: 3 Boyutlu Pala Geometrisi Kesitleri

Hesaplamalar sonucunda pala kökü çapı $R_{\text{kök}}=0,97525$ m olarak bulunmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] **Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E.,** 2001. *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, Chichester.
- [2] **Hau, E,** 2006. *Wind Turbines - Fundamentals, Technologies, Application, Economics – 2.basım*, Springer.
- [3] **Ackermann, T,** 2005. *Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester.
- [4] **Lee, A.T., Flay, R.G.J.,** 1999. Compliant blades for wind turbines, *IPENZ Transactions*, vol. 26.
- [5] **Maheri, A.,** 2006. Aero-Structure Simulation and Aerodynamic Design of Wind Turbines Utilizing Adaptive Blades, *University of the West of England-Bristol, Doctor of Philosophy*.
- [6] **Lobitz, D.W., Veers, P.S., Eisler, G.R., Laino, D.J., Migliore P.G., Bir G.,** 2001. The Use of Twist-Coupled Blades to Enhance the Performance of Horizontal Axis Wind Turbines, Sandia Report, SAND2001-1303, New Mexico/California.
- [7] **Türkyılmaz, U.,** 2007. Wind Energy Technologies: Preliminary Design Code Development, *Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.
- [8] **Gasch, R, Twele, J.,** 2002. *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*, Solarpraxis AG, Almanya.
- [9] **DNV/Risø,** 2002. *Guidelines for Design of Wind Turbines*, 2.Baskı, Danimarka.
- [10] **Hansen, M.O.L.,** 2000. *Aerodynamics of Wind Turbines*, James ve James, Ltd..
- [11] **Molenaar, D.P.,** 2003. *Cost-Effective Design and Operation of Variable Speed Wind Turbines*, Delft University Press.
- [12] **Moriarty, P.J., Hansen, A.C.,** 2005. AeroDyn Theory Manual, *National Renewable Energy Laboratory Technical Report, NREL/TP-500-36881*, Golden, Colorado.
- [13] **Maheri, A., Noroozi, S., Toomer, C., Vinney, J.,** 2006. Combined Analytical/FEA-Based Coupled Aero Structure Simulation of a Wind Turbine With Bend–Twist Adaptive Bladend-Twist Adaptive Blades, *University of the West of England-Bristol*.
- [14] **Lobitz, D.W., Veers P.S.,** 2002. Aeroelastic Behaviour of Twist-Coupled Hawt Blades, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*.

- [15] **Maheri, A., Noroozi S., Toomer C., Vinney J.,** 2006. WTAB, a computer code for coupled-aero-structure simulation of Wind Turbines utilising bend-twist Adaptive Blades, *University of the West of England-Bristol*.
- [16] **Zuteck, M.,** 2002. Adaptive Blade Concept Assessment: Curved Planform Induced Twist Investigation, Sandia Report, SAND 2002-2996, Clear Lake Shores, Texas.
- [17] **Griffin, D.A.,** 2004. Blade System Design Studies Volume II: Preliminary Blade Designs and Recommended TestMatrix, Sandia Report, SAND2004-0073, Kirkland/Washington.
- [18] **De Goeij, W.C., Van Tooren, M.J.L., Beukers, A.,** 1999. Implementation of Bending-Torsion Coupling Inthe Design of a Wind-Turbine Rotor-Blade, *Applied Energy*, 63, 191-207.
- [19] **Griffin, D.,** 2002. Evaluation of Design Concepts for Adaptive Wind Turbine Blades, Sandia Report, SAND2002-2424, Kirkland/Washington, Agustus 2002.
- [20] **IEC 61400-1,** 2005. Wind Turbines Part 1: Design Requirements, Ed. 3, International Electrotechnical Comission (IEC).
- [21] **IEC 61400-2,** 2006. Wind Turbines Part 2: Design Requirements for Small Wind Turbines, Ed. 2, International Electrotechnical Comission (IEC).
- [22] **Van Bussel, G, Zaaijer, M.B.,** Multi MegaWatt Wind Turbines for Offshore Application, *von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lecture Series 2007-05*, 2007.
- [23] **Bir, G., Migliore, P.,** 2004. Preliminary Structural Design of Composite Blades for Two- and Three-Blade Rotors, *National Renewable Energy Laboratory Technical Report*, NREL/TP-500-31486, Golden, Colorado.

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Çanakkale’de doğan Serhat YILMAZ, ilköğrenimini Umurbey İlkokulu’nda, ortaöğrenimini de Çanakkale Millî Piyango Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2005 yılında İTÜ Uçak Mühendisliği Lisans Programı’nı tamamlayıp aynı yıl İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Disiplinlerarası Uçak ve Uzay Mühendisliği Yüksek Lisans Programı’na girerek lisansüstü eğitime başladı. Aralık 2005’ten bu yana İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Hava Taşıtları Analiz ve Tasarımı Ana Bilim Dalı’nda araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.