Biyomimetik ve Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Küçük Ölçekli, Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı

Barış Arslan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2015

Small Scale, Horizontal Axis Wind Turbine Blade Design; by Using Biomimetics and Reverse Engineering Methods

Baris Arslan

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

January 2015

Biyomimetik ve Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Küçük Ölçekli, Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı

Barış Arslan

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekanik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yard. Doç. Dr. H. Selim Şengel

Ocak 2015

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Barış Arslan'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Biyomimetik ve Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Küçük Ölçekli, Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman **:** Yard. Doç. Dr. H. Selim ŞENGEL

İkinci Danışman **:** ---

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Yard. Doç. Dr. H. Selim ŞENGEL

Üye : Prof. Dr. Eşref ÜNLÜOĞLU

Üye : Doç. Dr. Özgür AVŞAR

Üye : Yard. Doç. Dr. Hakan EROL

Üye : Yard. Doç. Dr. Mehmet CANBAZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Yard. Doç. Dr. H. Selim ŞENGEL danışmanlığında hazırlamış olduğum "Biyomimetik ve Tersine Mühendislik Yöntemleriyle Küçük Ölçekli, Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 29/01/2015

Barış ARSLAN

İmza

ÖZET

Küresel çapta artan nüfus ve nüfusa bağlı olarak artan enerji ihtiyaçlarına çözüm bulmak amacıyla son yıllarda yapılan çalışmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmaların en büyük amacı; doğaya verilen zararı en aza indirerek enerji dönüşümü sağlamaktır. Bunun en verimli ve ekonomik yolu ise yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıdır. Tüm bu durumlar göz önüne alındığında araştırmacıların hedefi haline gelen rüzgar enerjisi ve rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi dönüşümünü sağlayan rüzgar türbinleri, son yılların en gözde "yeşil enerji" kaynağı olarak görülmektedir. Rüzgar türbinlerinin verimlilik gelişimi, yapısal olarak uygun malzemelerin kullanılması ve aerodinamik olarak efektif tasarımların seçilmesiyle doğru orantılıdır. Bu çalışma kapsamında kanat tasarımı yapılırken, enerji dönüşümü olarak daha verimli, yapısal olarak daha dayanıklı olacağı düşünülerek, kanat mikro mimarisi sayesinde doğada maruz kaldığı aerodinamik kuvvetlere karşı dayanıklılık kazanmış Odonata takımının, nesli tükenmiş bir türü olan Stenophlebia Amphitrite kanat yapısı (Fleck and Bechly, 2003), rüzgar türbinlerinin kanat yapıları ile eşdeğer görülerek incelenmiştir. Görüntü işleme ve tersine mühendislik yöntemleri kullanılarak bilgisayar ortamında üç boyutlu hale getirilen kanat yapısı, biyomimetik yaklaşımlarla optimize edilmiş ve sonlu elemanlar metodu tabanlı mekanik analizleri yapılarak verimliliği incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda, biyomimetik kanat modelinin yapısal olarak aerodinamik kuvvetlere karşı dayanıklı ve güvenilir bir şekilde çalışarak, %46 verim, 3,55 kW güç ile elektrik enerjisi dönüşümü yapabildiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyomimetik, Tersine Mühendislik, Sonlu Elemanlar Metodu, Yapısal Optimizasyon, Simpleware, Abaqus, Görüntü İşleme

SUMMARY

The number of researches about the globally increasing population and to finding solutions to the energy problems because of this, is constantly increasing in the last decades. The most important purpose of these researches is to minimize the damage done to the nature by ensuring energy conversion. The most efficient and economical way to achieve this is to use renewable energy resources. Considering these, wind power and wind turbines convert wind energy to electrical energy which has become the focus of researchers, is seen as the most popular "green energy" resource of the last decades. The efficiency progress of wind turbines is directly proportional to using structurally appropriate materials and choosing aerodynamically efficient designs. In this research, considering it will be more efficient in regards to energy conversion, and more durable structurally; the wing design of Stenophlebia Amphitrite (Fleck and Bechly, 2003) which is a breed of extinct species from the Odonata order that gained endurance against aerodynamic forces it has been exposed to in nature with its micro architectural design, is analysed considering it is equivalent with the design of wind turbines. The wing design, that has been transformed into 3D by using image processing and reverse engineering methods, has been optimized by biomimetic approaches and finite element method based mechanical analysis. In light of these examinations, it is seen that the biomimetic model is mechanically durable and compatible that it converts electrical energy with 46% efficiency and 3.55 kW of power.

Keywords: Biomimetic, Reverse Engineering, Finite Element Method, Structural Optimization, Simpleware, Abaqus, Image Processing

TEŞEKKÜR

Tezimde emeği geçen danışman hocam; H. Selim ŞENGEL'e, annem, babam ve halam başta olmak üzere tüm aileme ve tüm hocalarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET……...……vi
SUMMARY……..……..vii
TEŞEKKÜR……...……...…….viii
ŞEKİLLER DİZİNİ…….……....x
ÇİZELGELER DİZİNİ……...…….……..xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ……...…….xii
1. GİRİŞ……1
2. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR……..5
3. KÜÇÜK ÖLÇEKLİ, YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ…….…...….7
KANAT TASARIMI
3.1. Kanat Yapısı ve Mekanik Özellikleri……..…….……...9
3.2. Rüzgar Türbinleri..……...…….…….13
3.3. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması……..……...14
3.4. Verimlilik ve Aerodinamik..……...…….…….17
4. KANAT MODELİNİN ANALİZİ……23
4.1. Görüntü İşleme Metodu ……....……23
4.2. Sonlu Elemanlar Metodu Ağ Yapısı…….……..…….25
4.3. Malzeme Özelikleri ……..……...……26
4.4. Serbest Titreşim Analizi ……..……...……27
4.5. Şekil Optimizasyonu……29
4.6. Analizlerde Kullanılan Rüzgar Basıncı……..…….30
4.7. Kanat Kesiti İçin Titreşim Analizleri……...……32
4.8. Kanat Kesiti İçin Statik Analizler ……...……35
4.9. Kanat Kesiti İçin Optimizasyon Analizleri …….……37
4.10. Birleştirilmiş Kanat Modeli İçin Dinamik Analizler…….……39
4.11. Birleştirilmiş Kanat Modeli İçin Titreşim Analizleri…….……42
4.12. Birleştirilmiş Kanat Modeli İçin Statik Analizler…….……43
4.13. Verimlilik Analizleri……..……44
5. SONUÇ VE ÖNERİLER…….……...……..48
6. KAYNAKLAR……...…….……...50

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

1.1 Rüzgar Oluşumu……1
1.2 Rüzgar türbini tarlası, Indiana, ABD……..……...2
1.3 Odonata Takımından Yusufçuk Böceği…….……4
3.1 Odonata takımına mensup bir tür……...9
3.2 Kanat Yapısal Elemanları……11
3.3 Hücresel yapı şekilleri…….11
3.4 Sabun köpüğü teorisine göre oluşan şekiller:……..12
a) geçici durum, b) dengelenmiş durum
3.5 YERT Yapısı……13
3.6 Rüzgar Türbini Çeşitleri……..14
3.7 Boyutlarına göre yatay eksenli rüzgar türbinleri (YERT)……..….16
3.8 Tork……..……17
3.9 Kanat yüzeyinde oluşan aerodinamik kuvvetler:…….18
a) sürükleme ve kaldırma kuvvetleri, b) tork, c) itme kuvveti
3.10 Kanat Kesiti Elemanları…….21
4.1 Kanat yapısı…….23
4.2 Haritalanmış 8 bitlik görüntü……...24
4.3 Oluşturulan katı model…….24
4.4 SEM Kanat Modeli……..25
4.5 Eksen Takımı ve Mesnetlenme Şartı……...32
4.6 Kanat kesiti izometrik görünüşü…….……34
4.7 Değişen hücum açısı değerlerine bağlı oluşan tork değerleri……..35
4.8 Değişen hücum açısı değerlerine bağlı oluşan yer değiştirmeler……36
4.9 Birleştirilmiş kanat model (Önden)…….……39
4.10 Birleştirilmiş kanat model (İzometrik)……...…..……40
4.11 Zamana bağlı açısal hız değişimi……..…….40
4.12 Rüzgar hızına bağlı değişen verimlilik katsayısı……..……44

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

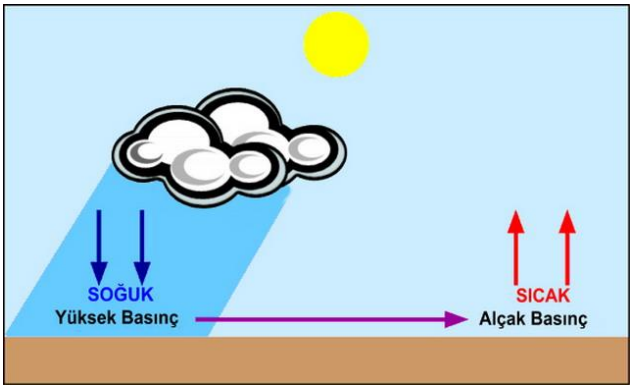
3.1. Çıkış gücüne bağlı YERT sınıflandırılması……...8
4.1. PoliEtherimide malzeme özellikleri…….26
4.2. Modelin fiziksel ve mekanik özellikleri……..26
4.3. Etkilenme katsayısı K_z ‘nin yüksekliğe bağlı değişimi……...31
4.4. Yüzey basınç katsayısı K_d ‘nin yapı cinsine göre aldığı değerler……...…31
4.5. Değişen rüzgar hızlarına bağlı rüzgar basınçları…….32
4.6. Doğal frekansa bağlı mod şekilleri……..……33
4.7. Şekil optimizasyonuna bağlı azalan gerilme değerleri……...…….36
4.8. İlk on mod doğal frekans değerleri……..36
4.9. Rotasyonel dönme kuvvetine bağlı eksenel kuvvetler…….43
ve tork değerleri
4.10. NACA4418, İnce cidarlı kesit ve ……..……45
biyomimetik kesit fiziksel özellikleri
4.11. NACA4418, İnce cidarlı kesit ve ……..46
biyomimetik kesit verimlilik karşılaştırmaları

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Şimgeler	**Açıklama**
YERT	Yatay eksenli rüzgar türbini
DERT	Dikey eksenli rüzgar türbini
NACA	Milli havacılık danışma heyeti
NREL	Ulusal yenilenebilir enerji laboratuvarı
P_{mek}	Mekanik güç
Γ	Tork
ω	Açısal hız
$F_{\perp}$	Kuvvet vektörünün dik bileşeni
r	Uzaklık vektörü
F_D	Sürükleme kuvveti
F_L	Kaldırma kuvveti
C_p	Verimlilik katsayısı
C_Q	Tork katsayısı
η	Üretilen net elektrik enerjisi
P	Havanın yoğunluğu
A	Türbin kanatları tarafından taranan alan
V_w	Rüzgar hızı
λ	Uç hız oranı
M	Kütle
K	Yay katsayısı
C	Sönümleme katsayısı
ASCE	Amerikan İnşaat Mühendisleri Topluluğu
K_z	Etkilenme katsayısı
K_{zt}	Topoğrafya katsayısı
K_d	Yüzey basınç katsayısı
U_1, U_2, U_3	x,y,z yönünde yer değiştirme
UR_1, UR_2, UR_3	x,y,z etrafında dönmeler

1.GİRİŞ

Güneşten gelen ısı enerjisinin kara ve denizler başta olmak üzere, yeryüzünün farklı bölgelerinde, farklı oranlarda soğurulmasıyla bölgesel olarak ısı farklılıkları oluşur. Güneşten gelen ısı enerjisiyle ısınan hava, atmosferin üst katmanlarına doğru hareket ederken, atmosferin üst katmanlarında soğuyan hava ise yeryüzüne doğru çöker. Isınan havanın yukarıya hareket etmesiyle yeryüzünde alçak basınç merkezleri, atmosferin üst katmanlarındaki soğuk havanın da aşağıya çökmesiyle yüksek basınç merkezleri oluşur. Farklı basınç bölgeleri arasında oluşan yatay hava akımları rüzgar olarak adlandırılır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Rüzgar oluşumu (M.G.M., 2015)

Rüzgarları oluşturan hava akımlarının enerjisi güneş kaynaklı olmalarından dolayı, rüzgarlar; sürekli, yenilenebilen ve ücretsiz bir enerji kaynağıdırlar. Rüzgar türbinleri ise; rüzgarın sahip olduğu bu kinetik enerjiyi, enerjinin dönüşümü prensibiyle, rüzgar ile kanat yüzeyinin aerodinamik etkileşimine bağlı olarak rotasyonel enerjiye çeviren makinelerdir.

Tarihsel olarak ilk rüzgar türbinlerinin kullanımı, rüzgar türbinlerinin atası olarak bilinen yel değirmenlerinin, 11. yüzyılda Hollanda'da su pompalama ve tahıl öğütme amaçlı kurulmasıyla başlamıştır. Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi ise ilk olarak Danimarkalı mucit Paul la Cour'un 1891 yılında kurduğu türbinden sağlanmıştır (Nurbay ve Çınar, 2005). 20. yüzyıl başında başlayan rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi, aynı zamanlara denk gelen dünya savaşlarına bağlı teknolojik gelişimler ve endüstri devriminin başlamasıyla yeterli ilgiyi görmemiş, bunun yerine fosil yakıtların üretimine ve tüketimine ağırlık verilmiştir. 1970'li yıllarda patlak veren petrol krizleri ile tekrar dünya gündemine gelen rüzgar enerjisi, son yıllarda artan nüfusun enerji ihtiyaçlarına karşılık, doğaya verilen zararı en aza indirerek ekonomik bir şekilde çözüm sağlamak amacıyla büyük şirketler tarafından üzerinde çok sayıda AR-GE çalışmasının yapıldığı ve büyük bütçelerin ayrıldığı bir sektör haline gelmiştir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Rüzgar türbini tarlası, Indiana, ABD (Anonim, 2015)

Termik ve nükleer enerji üretimiyle karşılaştırıldığında doğaya verilen zararın minimum olması nedeniyle "yeşil enerji" olarak adlandırılan rüzgar enerjisi;

günümüzde fosil yakıt kullanımına bağlı karbondioksit salınımının neden olduğu küresel ısınma ve iklim değişikliklerine karşı bir çıkış yolu olarak görülmektedir. Fakat geliştirilen rüzgar türbinleri incelendiğinde, bunların da havacılık sektöründe elastik olduğu için tercih edilen, plastik ve benzeri malzemelerin kompozit bir şekilde kullanıldığı petrol bazlı ürünlerden üretildiği bilinmektedir. Bu temiz enerji dönüşümü sağlayan tesislerin tüketicilerin kullanımına sunulurken de doğaya verilen zarar düşünülerek, gereksiz malzeme kullanımından kaçınarak daha verimli tasarımların yapılması gerekmektedir.

Daha verimli ve efektif tasarımların yapılması amacıyla doğada milyonlarca yıl boyunca doğal seçilim sonucunda optimizasyona uğrayarak mükemmelleşen sistemlerin gözlemlenmesi ve yapılan bu gözlemlere dayalı olarak doğadaki sistemlerin, işleyişlerin ve mekanizmaların taklit edilmesi; insanlık tarihi boyunca kullanılmış bir yöntemdir (Cohen, 2006). Bu yönteme Amerikalı mucit, mühendis ve biyofizikçi Schmitt O. H. tarafından, biyo; yaşam ve mimetik; taklit etmek anlamlarını taşıyan iki yunan kelime birleştirerek biyomimetik adı verilmiştir (Schmitt, 1969). Tersine mühendislik ise bir aygıtın, objenin veya sistemin; yapısının, işlevinin veya çalışmasının, çıkarımcı bir akıl yürütme analiziyle keşfedilmesi işlemidir. Bu analizlerde makine veya mekanik aletler parçalarına ayrılarak çalışma prensiplerinin çözümlemesi yapılır (Chikofsky, 1990). Biyomimetik ve tersine mühendislik yöntemleriyle doğada mükemmelleşmiş tasarımlar irdelenerek, mühendislik sistemlerinin çözümüne ışık tutulmaktadır.

Bu çalışmada kanat yapısından esinlenilen Stenophlebia Amphitrite; Alman entomolog Hagen, H.A. tarafından 1862 yılında sınıflandırılmış, 150 milyon yıl önce üst jura dönemde Almanya'nın Bavyera bölgesinde yaşamış olan (Fleck and Bechly, 2003) ve aynı takıma mensup Yusufçuk böceğiyle (Şekil 1.3) morfolojik olarak benzer özellikler taşıyan Odonata takımının bir alt türüdür.



Şekil 1.3. Odonata takımından yusufçuk böceği (Sun and Bhushan'dan, 2012)

Bu takım mensubu canlılar etçil oldukları ve avlarını uçarak avladıkları için, kanat yapıları gelişmiş aerodinamik özelliklere sahiptir. Kanat yapılarının sahip olduğu bu aerodinamik özelikler ve hava - kanat arasındaki aerodinamik etkileşime bağlı olarak hava akımlarına karşı kazandıkları mukavemetten dolayı Odonata takımına mensup canlıların kanat yapısı, rüzgar türbininin kanat yapısıyla eş görülerek incelenmiştir.

Bu incelemelerdeki amaç, hava akımına karşı özelleşmiş bu yapıların formunu kaybetmeden, rüzgar türbini kanat kesitlerinin çalışma prensibine uygun şekilde, kanat kesitinin üst ve alt taraflarında basınç farkı yaratıp, kesiti ekseni etrafında dönmeye zorlayacak olan, kambur bir kesit formu oluşturarak, hem hafif hem dayanıklı hem de verimli bir kanat kesiti oluşturmaktır. Oluşturulan bu kesit, özellikle küçük ölçekli olarak yani kişisel kullanıma uygun, ekonomik, rüzgar türbini kanat modeli olarak tasarlanmış ve verimlilik analizleri yapılarak uygulanabilirliği araştırılmıştır.

2.LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Cencelli N. A. vd. (Cencelli, et al., 2006), düşük rüzgar hızlarında (5-7 m/s) işletmeye yönelik küçük ölçekli türbinler için gradyan tabanlı kanat ve rotor optimizasyonu yapmışlardır.

Ameku K. vd. (Ameku, et al., 2008), 10-19 m/s'lik rüzgar hızlarında çalışmak üzere 3 kW'lık ince cidarlı kanat kesitlerine sahip türbin tasarımı yaparak teorik ve nümerik analiz sonuçlarını Amerikan Milli Havacılık Danışma Heyeti'nin kanat kesiti ailelerinden NACA 4418 kesitinin verileriyle karşılaştırmışlardır.

Nurbay N. ve Çınar A. (Nurbay ve Çınar, 2005) rüzgar türbinlerinin çeşitleri ve birbirleriyle karşılaştırılmaları üzerine bir derleme yapmışlardır. Verimlilik açısından, arazi şartları ve rüzgar hızına bağlı olarak seçilecek olan türbin ve kanat kesitlerinin önemini belirtmişlerdir.

Gürsel K. vd. (Gürsel, vd., 2012) pervane kanadının serbest titreşim analizi üstüne bir çalışma yapmışlardır. Dört kişilik bir ailenin elektrik enerjisini karşılayacak bir rüzgar türbini pervanesini NACA 4415 kesitine göre oluşturup, titreşim modlarını hesaplamışlardır.

Kishore R. A. vd. (Kishore, et al., 2013) portatif türbinlerden yüksek verim elde etmek amacıyla rotor çapı 40 cm olan türbin tasarlayarak 5,5 m/sn.'lik rüzgar hızı altında 2,2 W 'lık çıkış gücü elde etmişlerdir.

Schubel P. J. ve Crossley R. J. (Schubel and Crossley, 2012) yatay eksenli rüzgar türbinlerinin aerodinamik etkilerini detaylı bir biçimde inceleyerek kanat tasarımı yaparken en uygun verimliliği sağlayacak etkenleri rapor etmişlerdir.

Mc Cosker J. (Mc Cosker, 2012) kanat elemanı momentum teorisine göre üretilmiş, NACA ve NREL kanat kesitlerini karşılaştırarak küçük ölçekli türbinler için optimizasyonlar yapmıştır.

Buckney N. vd. (Buckney, et al., 2013) 45 metre uzunluğundaki kompozit türbin kanadı için topolojik optimizasyon tekniklerini uygulayarak, değişen kanat boyutlarına bağlı kesitler için şekil faktörleri ortaya atmışlardır.

Sunada S. vd. (Sunada, et al., 1998) odonata kanat yapısının burulma deformasyonlarına karşı mukavemetini incelemişler ve kanadın özelleşmiş mikro mimarisinin atalet momenti ve orijinde oluşan tork yani dönme momentini arttırırken (Denklem 3.2), eğilme ve burulma momentlerine karşı deformasyonların azaldığını belirtmişlerdir.

Combes S. ve Daniel T., (Combes and Daniel, 2005) yaptıkları çalışmalarında kanadın maruz kaldığı burulmaları kanat mikro mimarisi içindeki farklı elemanlara farklı elastisite değerleri vererek eğilme rijitliğine (EI) bağlı olarak incelemiş ve mekanik kuvvetler karşısında kanadın maruz kaldığı deformasyonların büyük ölçüde pasif olduğunu, yani mikro mimariye ve malzeme özeliklerine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuşlardır.

Mingallon M. ve Ramaswamy S., (Mingallon and Ramaswamy, 2011) kanat mikro mimarisi üstüne araştırmalarda bulunmuşlar ve kanat yapısında oluşan desenlerin sabun köpüğü teorisine (Thompson, 1942) bağlı olarak özelleşmiş şekiller olduğunu ve sonlu elemanlar metoduyla yaptıkları hesaplamalı akışkanlar mekaniği analizlerinin sonucunda, hücresel yapıların kanadın elastik özelliğini arttırdığını belirtmişlerdir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, zaten var olan kanat kesiti şablonlarının, gelişen teknolojiye bağlı olarak gelişen analiz yöntemlerine göre optimize edilerek geliştirilmeye çalışıldığı görülmektedir. Bu çalışmada ise, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, doğada farklı yüklemelere cevap verecek şekilde, zaten optimize olmuş bir sistemin, tersine mühendislik yöntemleriyle çalışma prensiplerinin

anlaşılarak, görüntü işleme metodlarının kullanımını takiben, ihtiyaca uygun bir şekilde optimize edilip, verimliliği incelenecektir.

3.KÜÇÜK ÖLÇEKLİ, YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT TASARIMI

Bu çalışmada öncelikle literatürde bulunan Odonata takımının kanat yapıları üzerine yapılmış çalışmalar incelenerek, kanadın aerodinamik ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu aerodinamik özeliklere bağlı olarak gelişen kanat yapıları ve bu yapıların mikro mimarilerinin, kanadın mekanik dayanımına etkileri ortaya konarak özelleşmiş yapılar olduğu anlaşılmıştır.

Rüzgar türbinlerinin çalışma prensipleri ve kanat kesitlerinin aerodinamik özelikleri üzerine yapılan çalışmalar incelenip; hafif, dayanıklı ve güvenilir tasarımların yapılabilmesi için kullanılan optimizasyon yöntemleri araştırılmıştır. Bu optimizasyonların sonucunda elde edilen kesitlerin şekil yapıları ile zaten doğada doğal seçilim sonucunda benzer aerodinamik kuvvetlere karşı optimize olan Odonata takımına mensup canlıların kanat yapıları birbirine eşdeğer görülmüştür ve kanadın aerodinamik kuvvetler karşısında dayanıklı olmasını sağlayan mikro mimarisine zarar vermeden, rüzgar türbini kanat kesitlerinde kullanılan şekil yapısına benzer bir form yakalamak amacıyla literatürde bulunan Odonata türüne ait kanat yapıları incelenerek, uygun kanat yapısı olarak Odonata takımının nesli tükenmiş bir türü olan Stenophlebia Amphitrite kanat yapısı seçilmiştir.

Literatürden alınan kanat görüntüsü (Fleck and Bechly, 2003), Simpleware (Simpleware Scan IP, V.7.0) isimli görüntü işleme programında işlenerek katı model haline getirilmiş, bunu takiben ise sonlu elemanlar metodu tabanlı Abaqus (Dassault Systems, Abaqus, 6.13) programında analizlerini yapmak üzere yine Simpleware programı kullanılarak ağ yapısı oluşturulmuştur.

Malzeme olarak dayanım ve elastiklik özelikleri açısından ve üç boyutlu yazıcılarla üretilebildiği için havacılık araştırmalarında kullanılan prototiplemelerde tercih edilen, PoliEtherimide malzeme özelikleri kullanılarak model oluşturulmuştur. ASCE 7-10 Yapılar İçin Minimum Tasarım Yüklemeleri (ASCE/SEI 7-10, 2010), isimli standartlara göre kanat tasarımı yapılmak istenen bölgenin ortam özellikleri ve rüzgar hızına bağlı rüzgar kuvvetler hesaplandıktan sonra mekanik analizlere geçilmiştir.

Mekanik analizler toplam altı adımda yapılmıştır; birinci analiz olarak kanat yapısına rüzgar türbininde kullanılabilecek şekilde uygun formu verebilmek amacıyla, Simpleware programında oluşturulan 2 metrelik kanat kesitinin doğal frekans analizi yapılmış ve mod şekilleri bulunmuştur. Bu mod şekilleri arasından, kanat kesitinde aranan özelliklere bağlı olarak, uygun kamburluğa sahip, +z ekseni etrafında maksimum torku oluşturacağı düşünülen kanat kesiti rasyonel olarak seçilmiştir.

İkinci analizlerde, seçilen kanat formuna en uygun hücum açısını belirlemek amaçlanmıştır. Bu nedenle +x ekseni etrafında belirli açılarla döndürülmesiyle oluşturulan kanat kesiti, statik analizlere sokulmuştur. Bu analizlerde orijinde +z ekseni etrafında maksimum torku oluşturan hücum açısı belirlenmiştir.

Belirlenen açıya göre düzenlenen kanat kesiti, üçüncü olarak yapılan optimizasyon analizlerinde, hücum kenarı bölgesinde oluşan gerilmelerin azaltılması ve gerilme yığılmalarının önüne geçilmesi amacıyla şekil optimizasyonuna sokulmuştur.

Hücum kenarı bölgesi optimize edilen kesitten üç tanesinin, aralarında 120º ’lik açılar bulunacak şekilde birleştirilmesiyle kanat modeli oluşturulmuştur. Dördüncü olarak yapılan analizlerde birleştirilmiş kanat modelinin, seçilen rüzgar hızlarının -z ekseni yönünde etkitilmesine bağlı olarak dinamik analizleri yapılmış ve +z ekseni etrafında dönebilen modelin açısal hız değerleri belirlenmiştir.

Beşinci analizlerde dördüncü analizlerden elde edilen açısal hız değerlerine bağlı, rezonans oluşumunun kontrolü için doğal frekans analizleri yapılarak rezonans oluşup oluşmadığı kontrol edilmiştir.

Son olarak yapılan altıncı analizlerde ise modele statik analizler uygulanarak, belirlenen bu açısal hız değerleri, bünyesel dönme kuvveti olarak sisteme girilmiş ve merkezkaç kuvvetine bağlı, +x yönünde oluşan eksenel gerilmeler ve merkezde oluşan tork değerleri hesaplanarak verimlilik hesaplamaları yapılmıştır.

3.1. Kanat Yapısı ve Mekanik Özellikleri

Odonata takımı, günümüzde 5000 çeşit türü bulunan, dünyanın her bölgesinde yaşayabilen ve avlarını uçarak avlayan etçil canlılardır. Genellikle "kızböcekleri" olarak bilinen bu takıma mensup canlılar; böcekler (insecta) sınıfının bir takımı ve bu takımda sınıflanan türlerin ortak adıdır (Vikipedi, 2015) (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Odonata takımına mensup bir tür (Vikipedi, 2015)

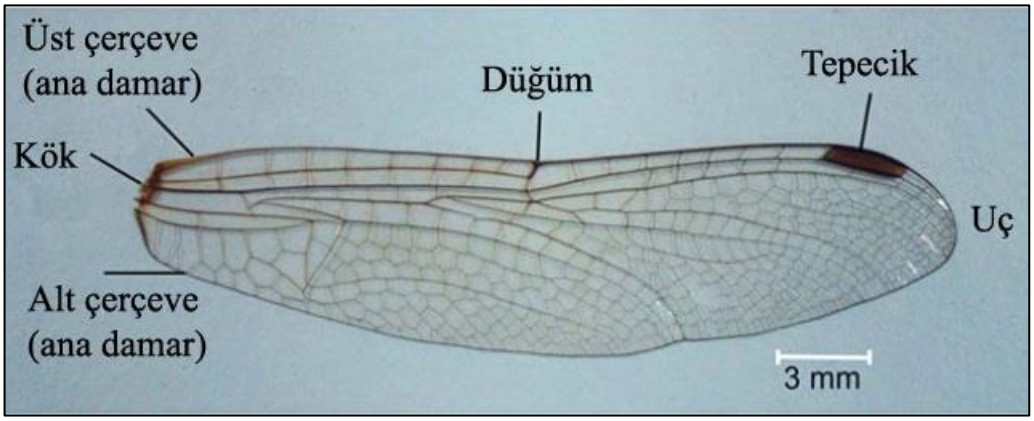
Yaşamak için genellikle gölleri ve durgun su kenarlarını tercih eden bu takıma mensup türler, karakteristik olarak büyük, yuvarlak bir kafa yapısına sahiptirler. Bu kafa yapısının büyük bölümünü, son derece gelişmiş göz sistemi oluşturur. Ağızlarında avlarını çiğneyebilmek için gelişmiş dişler bulunmaktadır. Vücutları kuvvetli yapıdadır ve hiçbir zaman düz değildir. Hareketleri hızlı ve devamlıdır, uçarak avlanırken hareketlerindeki hız ve devamlılığı sağlayan esas etmen ise aerodinamik olarak son derece gelişmiş kanat sistemidir.

Kanat kesiti oluşturmak üzere seçilen Stenophlebia Amphitrite; Alman entomolog Hagen, H.A. tarafından 1862 yılında sınıflandırılmış, 150 milyon yıl önce üst jura dönemde Almanya'nın Bavyera bölgesinde yaşamış olan (Fleck and Bechly, 2003), Odonata takımının bir türüdür. Günümüzde nesli tükenmiştir. Kanat kesiti oluşturmak üzere seçilmiş olmasının sebebi, literatürde incelenen diğer Odonata takımına mensup türlerin kanat yapıları ile karşılaştırıldığında (Fleck and Bechly, 2003), kanat yapısı rüzgar türbininde kullanılmaya uygun olarak, daha dar ve uzun bir forma sahiptir.

Diğer Odonata takımına mensup türler gibi Stenophlebia Amphitrite böceğinin de kanat yapısı, uçuş sırasında hava akımına bağlı kuvvetlerin, kanat bünyesinde meydana getirdiği eğilme ve burulmaya karşı mukavemet kazanmıştır. Hava akımına bağlı bu dış kuvvetler karşısında, böcek kanadının otokontrol mekanizması sınırlıdır. Kanatta meydana gelen deformasyonlar büyük ölçüde pasiftir. Tüm bu deformasyonlar öncelikli olarak kanadın mikro mimarisine ve yapı malzemesine göre değişmektedir (Combes and Daniel, 2005). Kanadın mikro mimarisi incelendiğinde, eğilme ve burulma kuvvetlerine karşı koyabilmek için yapının doğal olarak optimize olduğu anlaşılmaktadır.

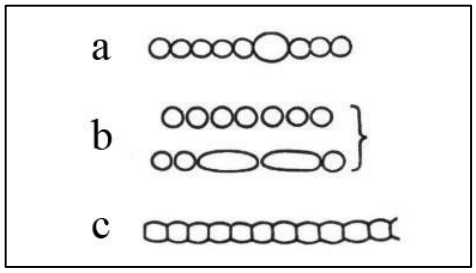
Kanadın görünüşte karmaşık bir damar yapısı vardır (Şekil 3.2). Bu karmaşık yapının anlaşılabilmesi için kanat üzerindeki hücre yapısının anlaşılması gerekir. Kanat çerçevesi ana ve ara damarların enlemesine ve boylamasına uzanmasıyla birleşmektedir. Ana damarlar genel olarak birbirlerine paralel uzanır, çapraşık şekilde uzanan ara

damarlar ise ana damarlarla kesişerek hücre yapılarını oluştururlar (Mingallon and Ramaswamy, 2011).



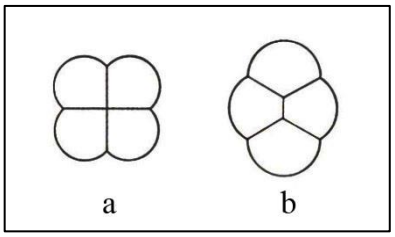
Şekil 3.2. Kanat Yapısal Elemanları (Sun and Bhushan, 2012)

İki ana damar arasındaki birbirine eş hücreler dörtgen olarak şekillenmiş ve tek sıra halinde dizilmişlerdir (Şekil 3.3.a). Eğer ana damarlar arasında hücreler tek sıra yerine iki sıra olarak dizilmişse bir sıradaki hücreler diğer sıradaki hücrelerle 120°'lik açı oluşturacak şekilde dizilirler (Şekil 3.3.b). Bu hücreler dizilim sırasında aralarındaki 120°'lik açıyı bozmayacak şekilde yüzey gerilimine bağlı olarak altıgen veya çokgen olarak da şekillenebilirler (Şekil 3.3.c). Hücrelerin sahip olduğu bu farklılaşmalar kanata çeşitli derecelerde esneklik kazandırır.



Şekil 3.3. Hücresel yapı şekilleri (Mingallon and Ramaswamy, 2011)

D’Arcy Thompson, kanadın esas şeklini oluşturan bu hücresel düzeni sabun köpüğü deneyiyle açıklamıştır (Thompson, 1942). Dört tane sabun köpüğü bir düzlem üzerinde bir araya gelirse; dört ara duvar birbiriyle 90°’lik dik açı oluşturacak şekilde (Şekil 3.4.a) ya da beş ara duvar, aralarında 120°’lik açı oluşturacak şekilde (Şekil 3.4.b) iki farklı simetrik düzende birleşirler. Sabun köpüklerinin aralarında 90°’lik açı oluşturduğu durum stabil bir durum değil, geçici bir durumdur. Eğer sabun köpükleri aralarında 90° oluşturacak şekilde (Bkz. Şekil 3.4.a) bir araya gelirse, bir süre sonra sahip oldukları iç - dış hava basınçlarının ve yüzey gerilmelerinin eşitlenmesine bağlı olarak aralarında 120°’lik açı oluşturacak şekilde (Bkz. Şekil 3.4.b) yer değiştirerek yeniden denge konumunda oldukları hale geçeceklerdir (Thompson, 1942).



Şekil 3.4. Sabun köpüğü teorisine göre oluşan şekiller (Mingallon and Ramaswamy'den, 2011): a) geçici durum, b) dengelenmiş durum

Bu dikdörtgen ve çokgen hücre yapılarının ortak kullanımı, kanadın şekil konfigürasyonunun oluşumunda büyük oranda çeşitlilik imkanı sağlamaktadır. Kanadın ana çerçevesine bağlı ve genellikle üst kısımda oluşan dikdörtgensel hücreler rüzgar basıncına bağlı gerilmelere karşı dayanımı arttırırken, alt kısımlarda çokgenlerden oluşan hücresel yapı, kanadın esnekliğinin artmasını sağlarlar (Mingallon and Ramaswamy, 2011).

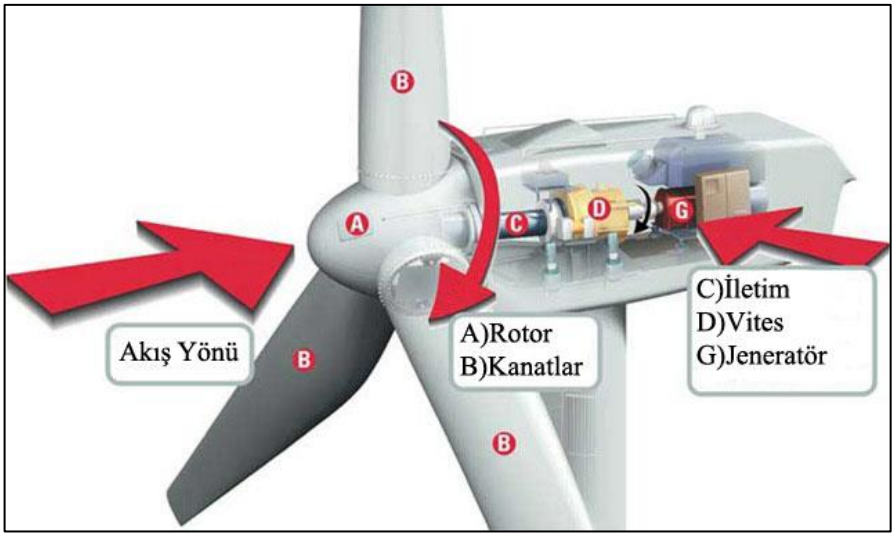
Kanat mikro mimarisindeki bu hücresel yapı oluşumları malzeme miktarından tasarruf sağlarken, dayanıklılık için gerekli olan elastiklik özelliğini sağlamaktadır. Rüzgar türbini kanat kesitlerinin tasarımı yapılırken bu iki özellik dikkate alınmaktadır.

Hücresel yapıların formunu kaybetmeden, rüzgar türbini kanatlarının çalışma prensibi olan, kanat kesitinin üst ve alt taraflarında basınç farkı yaratıp, kesiti ekseni etrafında dönmeye zorlayacak olan kambur bir kesit formu oluşturulduğunda, hem hafif hem de dayanıklı bir yapı elde edilecektir.

3.2. Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri rüzgardaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye sonra da elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Bir rüzgâr türbini genel olarak kule, jeneratör, vites kutusu, elektrik-elektronik elemanlar ve kanatlardan oluşur. Rüzgarın kinetik enerjisi, kanatların akışkanla olan aerodinamik etkileşimi sonucunda rotora mekanik enerji olarak aktarılır. Türbin kanatlarından rotora aktarılan rotasyonel enerji, daha sonra jeneratör yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Jeneratörden elde edilen elektrik enerjisi doğrudan veya akülerde depolanarak tüketicilerin kullanımına sunulur.

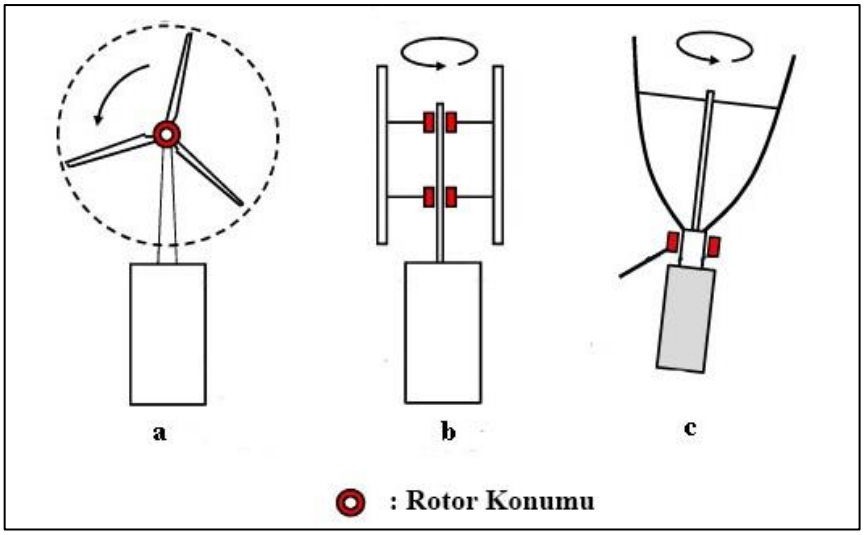
Elektrik enerjisi dönüşümü için kullanılan modern rüzgar türbinlerinin ana parçalarını, türbin kanatları, rotor, fren sistemi, iletim sistemi, jeneratör ve kule oluşturur (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. YERT Yapısı (MTHS Enviroscapes - Wind Energy, 2015)

3.3. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılmasında kullanılan esas etken türbin ekseninin yeryüzüne göre uzanma açısıdır. Bu açıya bağlı olarak rüzgar türbinleri yatay eksenli (YERT), dikey eksenli (DERT) ve eğik eksenli olmak üzere 3'e ayrılır (Şekil 3.6);



Şekil 3.6. Rüzgar türbini çeşitleri (Thorstensson, 2009)
a)YERT b)DERT c)Eğik Eksenli

YERT (Şekil 3.6.a), dönme ekseni rüzgarın esme yönüne paraleldir, kanatları ise belli bir eğimle rüzgarın geliş yönüne dik olarak konumlandırılarak kaldırma kuvvetinin etkisinden maksimum şekilde faydalanılabilmektedir. Bu tip türbinlerin verimi yaklaşık %45 'dir (Nurbay ve Çınar, 2005). YERT'leri de kendi aralarında kanat sayısına göre; tek kanatlı, çift kanatlı, üç kanatlı ve çok kanatlı olmak üzere dörde ayrılır. Kanat sayısı azaldıkça rotorun dönüş hızı artar. Tek kanatlı rotorların dönüş hızlarının yüksek olması ve dengesizlik sebebiyle artan titreşim frekanslarına bağlı gürültü problemleri oluşur. İki kanatlı türbinlerin balansı tek kanatlı türbinlere göre daha düzgündür ama bu tip kanat yapısı içinde yüksek dönme hızına bağlı problemler oluşabilmekte ve bu istenmeyen etkilerin ortadan kaldırılması için sisteme ilave mekanizmalar eklenmesiyle

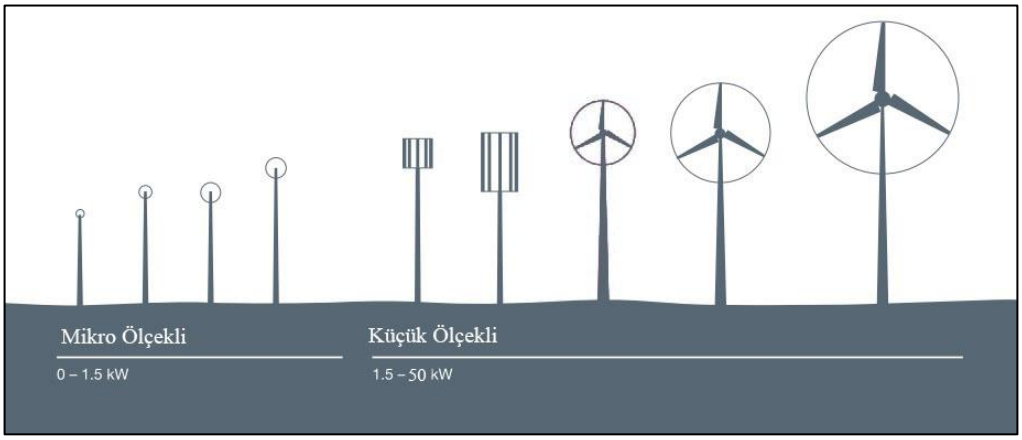
maliyetler artmaktadır (Nurbay ve Çınar, 2005). Üç kanatlı rüzgar türbinleri, dönme momentinin dengeli olması sebebiyle en çok tercih edilen türbinlerdendir. Bu yüzden ek titreşim önleyici donanımlara ihtiyaç duyulmaz ve gürültü açısından diğer türbinlere oranla daha verimlidir. Üç kanatlı türbinlerle karşılaştırıldığında; iki kanatlı tasarımların %3, tek kanatlı tasarımların ise %7 ile %13 arasında değişen enerji kaybı vardır (Schubel and Crossley, 2012). Çok kanatlı YERT'leri ise rüzgar gülü olarak tabir edilen ilkel rüzgar türbini örneklerindendir. Tarihte genellikle su pompalama ve tahıl öğütme amaçlı kullanılmışlardır. Verimliliği düşük olduğu için elektrik enerjisi dönüşümünde kullanılmaları tercih edilmez.

DERT'de (Şekil 3.6.b) dönme ekseni rüzgar yönüne diktir. Kanatların içbükey ve dış bükey yüzeyleri arasında oluşan itme kuvvetinden faydalanarak enerji dönüşümü sağlanır. Bu tip türbinlerin verimi yaklaşık olarak %35'dir. Genellikle düşük rüzgar hızları için üretilmişlerdir. Yüksek rüzgar hızlarında verimsiz çalışırlar. Kanat sayısı arttırımı kütle artımını da beraberinde getirir. Kanat çapı 5 m olan türbinlerden yaklaşık 0,5 kW güç elde edilir (Nurbay ve Çınar, 2005).

Eğik eksenli rüzgar türbinlerinde (Şekil 3.6.c) dönme eksenleri dikeyle rüzgar yönünde bir açı yapar. Bu tip rüzgar türbinlerinin yaygın olarak kullanım alanı bulunmaz.

Rüzgar türbinleri kullanım amaçlarına göre ideal çalışma şartları altında ürettikleri enerji cinsine göre de kendi içlerinde sınıflandırılmaktadır. Üretilen enerji miktarı, ideal bir rüzgar hızı altında, standart bir ısı ve standart bir yüksekliğe bağlı olarak rüzgar türbininden elde edilen anlık çıkış gücünün watt cinsinden ifadesidir.

Rüzgar enerjisi teknolojisi, büyük enerji şirketleri tarafından büyük ölçeklerde, arazi tipi geniş açıklıklarda ve açık denizlerde rüzgar türbini tarlaları şeklinde geliştirilip üretilirken, evsel ihtiyaçlara yönelik, verimli, kullanımı kolay, küçük ölçekli (Şekil 3.7) ve emniyetli tasarımların yapılması kişisel kullanım açısından önem kazanmaktadır (Ameku, et al., 2008).



Şekil 3.7. Boyutlarına göre yatay eksenli rüzgar türbinleri (YERT) (Renewable UK'dan, 2013)

Kişisel kullanıma yönelik olarak geliştirilen rüzgar türbinleri küçük ve orta ölçekli olarak tanımlanmaktadır (Çizelge 3.1) ve 0-1,5 kW' dan 500 kW'a kadar çıkış gücü olan türbinleri kapsamaktadır (Renewable UK, 2013).

Çizelge 3.1. Çıkış gücüne bağlı YERT sınıflandırılması (Renewable UK, 2013)

Çıkış Gücüne Bağlı Olarak Küçük ve Orta Büyüklükteki Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması			
	Güç (kW)	**Yıllık Enerji Üretimi (kWsa)**	**Toplam Yükseklik (m)**
Mikro Ölçekli	0-1.5	1000 kW'a kadar	10-18
Küçük Ölçekli	1,5-50	200.000 kW'a kadar	15-35
Orta Ölçekli	50-500	1.800.000 kW'a kadar	25-55

Bu çalışmada tasarımı yapılacak olan kanat modeli için verimlilik ve aerodinamik açısından diğerlerine göre daha verimli olan yatay eksenli rüzgar türbinleri seçilmiştir. Kanat sayısı olarak da dengeli oluşu ve düşük titreşime bağlı mekanik özellikleri

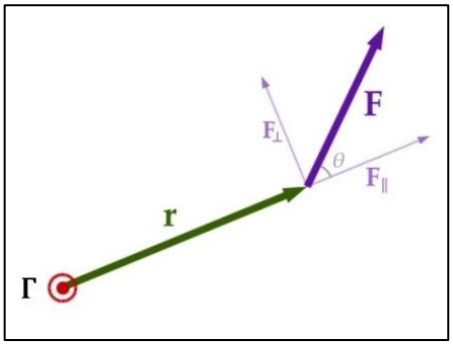
açısından daha avantajlı olan üç kanatlı model seçilmiştir. Kullanım amacı olarak kişisel kullanım amaçlandığı için küçük ölçekte tasarım yapılması uygun görülmüştür.

3.4. Verimlilik ve Aerodinamik

Rüzgar türbinleri; rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjiyi, rüzgar ile kanat yüzeyinin aerodinamik etkileşimine bağlı olarak mekanik enerjiye çeviren makinelerdir. Bu mekanik enerjinin iş yapma hızı, tork ile açısal hızın çarpımına eşittir. P_{mek}; yani mekanik güç vektörel olarak şu şekilde ifade edilir;

$$\mathbf{P_{mek} = \Gamma\omega} \qquad 3.1$$

Tork ifadesi veya kuvvet momenti (Şekil 3.8.), matematiksel olarak; devir üretilmesini sağlayan kuvvet vektörünün dik bileşeni ile, nesnenin ekseninden kuvvetin uygulandığı noktaya kadar olan uzaklık vektörünün çarpımı olarak tanımlanır. Tork vektörel olarak şu şekilde ifade edilir;

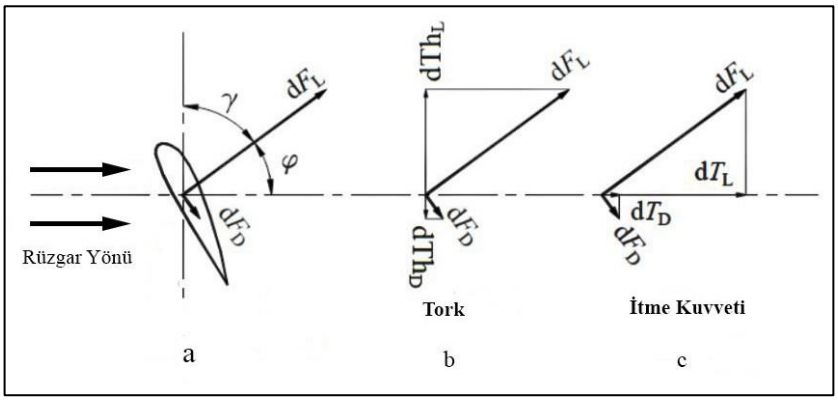


Şekil 3.8. Tork (Vikipedi, 2015)

$$\mathbf{\Gamma = F_{\perp} r} \qquad 3.2$$

Rüzgar türbinleri tasarlanırken amaç, ortamdaki hava şartlarının el verdiği ölçüde maksimum verimi alabilmektir. Rüzgar türbini tasarımında rüzgardaki kinetik enerjinin pervane miline kayıpsız bir şekilde aktarılması elde edilecek verimi önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sebeple rüzgar türbinlerinde kanadın aerodinamik tasarımı, enerji verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Kanadın aerodinamik tasarımı yapılırken, verimliliği maksimuma çıkarmak için özel kanat kesitleri kullanılır. Bunlar rüzgarı önden alıp, türbinin dönüş yönünde kaldırma kuvveti oluşturacak şekilde optimize edilmiş kesitlerdir. Rüzgar ile kanat yüzeyinin etkileşimi sonucunda kanatın kambur kesitinin, rüzgarın geliş açısıyla yaptığı hücum açısının eğimine bağlı olarak, sürükleme (F_D) ve kaldırma (F_L) kuvvetleri oluşur (Şekil 3.9.a). Kaldırma ve sürükleme kuvvetlerinin rüzgarın geliş açısına dik bileşenleri, rotor merkezinde verimlilikle direk alakalı olarak tork oluşturur (Şekil 3.9.b). Aynı kuvvetlerin, rüzgarın geliş yönüne paralel bileşenleri ise kanat bünyesinde itme kuvveti denilen kuvvetleri oluşturur (Şekil 3.9.c).



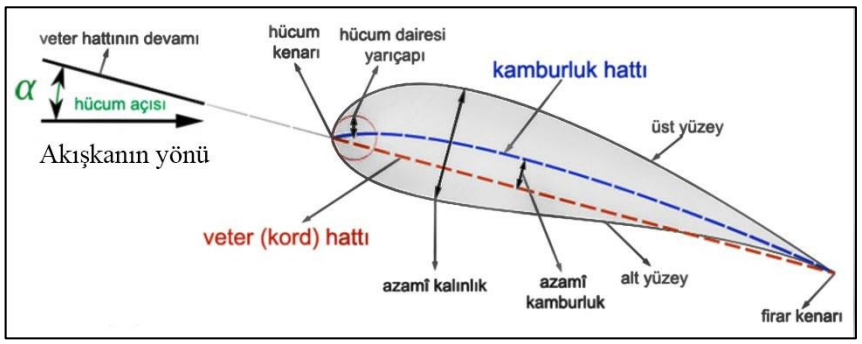
Şekil 3.9. Kanat yüzeyinde oluşan aerodinamik kuvvetler (Mc Cosker, 2012): a) sürükleme ve kaldırma kuvvetleri, b) tork, c) itme kuvveti.

Şekil 3.9.b'den anlaşılacağı üzere sürükleme kuvvetinin dik bileşeni, kaldırma kuvvetinin dik bileşenini skaler olarak azaltarak verimliliğin azalmasına sebep olur.

Aynı şekilde, Şekil 3.9.c'de oluşan itme kuvvetleri, kanat bünyesinde istenmeyen eğilme ve burulma etkilerine sebep olur.

Tüketicilerin ihtiyaçlarına, kolay ve verimli bir şekilde çözüm getirmek amacıyla enerji şirketlerinin ve kurumların şablon şeklinde kullanılan kanat kesitleri vardır. NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) ve NREL (National Renewable Energy Laboratory) gibi şirket ve kurumların hazırladıkları bu şablonlarda, kesitlerin boyutları ve şekilleri kanat elemanı ve momentum metodu kullanılarak Betz teorisi ve yerel rüzgar hızlarına göre hesaplanır (Schubel and Crossley, 2012).

NACA kanat kesiti aileleri, Amerikan Milli Havacılık Danışma Heyeti (National Advisory Committee for Aeronautics) tarafından, 1930'lu ve 1940'lı yıllarda matematiksel olarak tanımladıkları şablonlardan oluşan kanat kesitleridir. NACA kısaltmasının yanındaki 4 haneli seri numaraları kesitin şekil özelliklerini verir. Sağdan ilk iki basamaktaki sayının yüzde olarak, kanadın hücum ve firar kenarlarından geçen doğrunun, yani veter hattının (Şekil 3.10) uzunluğuyla çarpımı, kanadın azami kalınlığını verir. Soldan ilk basamaktaki sayının yüzde olarak, veter hattı uzunluğuyla çarpımı kanadın azami kamburluğunu verir. Soldan ikinci basamaktaki sayının yüzde olarak veter hattı uzunluğuyla çarpımı ise; azami kamburluğun bulunduğu yerin, hücum kenarından uzaklığını verir.



Şekil 3.10. Kanat kesiti elemanları (Vikipedi, 2015)

Kanat elemanı ve momentum teorisi, lineer momentum teorisi ile kanat elemanı teorisinin birleştirilmiş halidir. İdeal verimlilik hesaplamalarında başarılı sonuçlar veren momentum teorisi, akışın sürekli, homojen ve sıkıştırılamaz olduğunu; kanat yerine sonsuz incelikte bir disk olduğunu, disk üzerindeki basınç değişiminin disk üzerindeki her noktada aynı olduğunu, diskin önünde ve arkasında girdap olmadığını varsayarak, diskten geçen havanın momentum değişimini inceler. Fakat bu teorinin kanat kesitiyle hiçbir bağlantısı yoktur. Bu nedenle en uygun kanat kesit parametrelerinin hesaplanmasında kullanılamaz. Kesit parametrelerinin belirlenmesinde ise kanat elemanı teorisi kullanılır. Bu teoriye göre, kanat kesiti kendisini oluşturan daha küçük parçalara ayrılır ve akışkanın her bir küçük parça üzerinde oluşturduğu kuvvetler hesaplanır. Bu kuvvetler kanat boyunca integre edilerek, kanata etkiyen toplam kuvvetler hesaplanır. Bu iki teorinin birleştirilmesiyle, akışkanın kanat şekline bağlı olarak kanat yüzeyinde oluşturduğu kuvvetler ve bu kuvvetlerin rotora aktarılmasıyla oluşan verimlilik durumu incelenebilmektedir (Mc Cosker, 2012).

Tasarımdan bağımsız olarak, rüzgarın kinetik enerjisinin rotor tarafından elektrik enerjisine dönüşümünde bir üst limit vardır. Betz Limiti olarak bilinen ve enerjinin korunumu kanununa göre hesaplanmış bu teoreme göre; ideal çalışma şartlarında (akışın sürekli, homojen ve sıkıştırılamaz olduğu; kanat yerine sonsuz incelikte bir disk olduğu, disk üzerindeki basınç değişiminin disk üzerindeki her noktada aynı olduğu, diskin önünde ve arkasında girdap olmadığını varsayılarak) rotor serbest şekilde akan rüzgarın en fazla $C_p = 0{,}593$ ünden faydalanabilir (Cencelli, et al., 2006). Her ne kadar teoride türbinin verimlilik katsayısının üst limit değeri $C_p = 0{,}593$ olsa da uygulamada bu değere ulaşılamaz. Bunun sebebi kayıplardır, bu kayıplar ihmal edilen direnç kuvvetlerinden kaynaklanan kesit kayıpları, kanat uçlarındaki hava akımına bağlı oluşan vortekslerin neden olduğu uç kayıpları ve Betz teorisine göre rüzgarın pervaneye geliş ve çıkışındaki doğrultusunun değişmediği varsayımından kaynaklanan; uygulamada ise rüzgarın türbin kanadına çarptıktan sonra oluşturacağı vortekslere bağlı girdap kayıplarıdır (Avcı ve Yılmaz, 2012).

Rüzgar türbinlerinin genel performansını belirlemek ve karşılaştırma yapabilmek için sıklıkla kullanılan üç parametre vardır. Bu parametreler; verimlilik katsayısı; C_p (Denklem 3.3), tork katsayısı; C_Q (Denklem 3.5), ve toplam rüzgar gücüne karşılık üretilen net elektrik enerjisini ifade eden toplam verimlilik miktarıdır (η). Verimlilik katsayısı (C_p) ve tork katsayısı (C_Q) jeneratör ve dişli kutusundan kaynaklı kayıplardan bağımsız, direk olarak kanat tasarımı ile rüzgarın karakteristik özelliklerine bağlı olarak değişim gösterirken, toplam verimlilik miktarı (η), kullanılan elektrik jeneratörü, dişli kutusu ve iletim sisteminden kaynaklı olan sürtünme ve atalet kayıplarına göre değişkenlik gösterir (Kishore and Priya, 2013). Toplam verimlilik miktarı (η), elektrik jeneratörü ve dişli kutusu gibi kanat tasarımından bağımsız değişkenlerle alakalı olduğu için bu çalışmada dikkate alınmamıştır.

Betz limiti yada türbinin verimlilik katsayısı olarak da bilinen C_p ifadesi, kanatlar sayesinde türbin miline aktarılan mekanik gücün, ρ yoğunluklu hava ortamında bulunan türbinin kanatları tarafından taranan A alanına etkiyen, V_w hızlı rüzgarın mutlak kinetik enerjisine oranıdır ve şu şekilde ifade edilir;

$$C_p = \frac{P_{mek}}{P_{rüzgar}} = \frac{\Gamma\omega}{\frac{1}{2}\rho A {V_w}^3} \qquad 3.3$$

λ uç hız oranı pervane ucundaki açısal kanat hızının, V_w rüzgar hızına oranıdır (Burton, et al., 2011) (Denklem 3.4). Uç hız oranı için 1 - 2 değerleri düşük uç hız oranı olarak tanımlanırken, 10 ve daha yüksek değerler yüksek uç hız oranı olarak tanımlanır (Schubel and Crossley, 2012). λ uç hız oranı şu şekilde ifade edilir;

$$\lambda = \frac{\omega r}{V_w} \qquad 3.4$$

Bu tasarım değişkeninin seçiminde verimlilik, tork, mekanik gerilmeler ve gürültü problemleri göz önünde bulundurulur. Artan uç hız oranı verimliliği ve torku arttırırken merkezkaç kuvvetine bağlı eksenel gerilmeleri de arttırmaktadır. Bu gerilmelerin fazla olması yorulma ve artan titreşim etkilerine bağlı olarak sistem içinde göçmelere neden olmaktadır. Açısal dönüş hızının artmasına bağlı olarak artan gürültü problemleri de yüksek uç hız oranının dezavantajıdır. Genellikle küçük ölçekli türbinlerin açısal hızı, büyük ölçekli türbinlere göre daha yüksek olduğu için küçük ölçekli tasarımların uç hız oranı daha yüksek değerler alır (Ameku, et al., 2008).

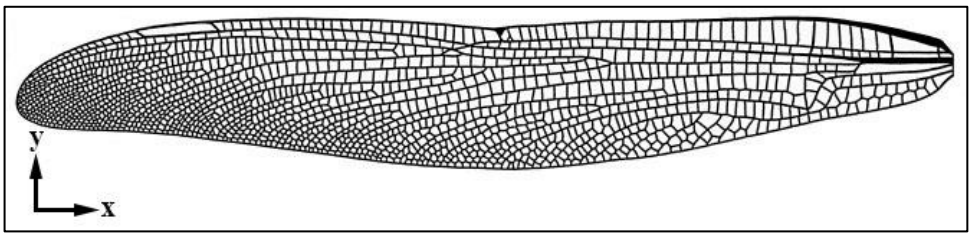
Tork katsayısı C_Q'nun matematiksel olarak ifadesi, C_p verimlilik katsayısının, λ uç hız oranına oranıdır (Denklem 3.5). Tork katsayısının yüksek değerlerde olması rüzgar hızının düşük olduğu koşullarda dahi türbinin harekete geçmesine ve dönüşün devam etmesine olanak sağlar (Kishore and Priya, 2013). Tork katsayısı C_Q şu şekilde ifade edilir;

$$C_Q = \frac{C_p}{\lambda} \qquad 3.5$$

4.KANAT MODELİNİN ANALİZİ

4.1.Görüntü İşleme Metodu

Stenophlebia Amphitrite ön kanat yapısı, literatürden alınan iki boyutlu resimleri (Fleck and Bechly, 2003) (Şekil 4.1), tersine mühendislik ve görüntü işleme yöntemlerine tabi tutularak Simpleware isimli görüntü işleme programında katı model haline getirilmiştir. Simpleware (Simpleware Scan IP, V.7.0); Scan IP ve +FE Modülünden oluşan, medikal veya piksel bazlı görüntülerin işlenerek, sonlu elemanlar tabanlı programlara aktarılmasına olanak veren bir programdır.

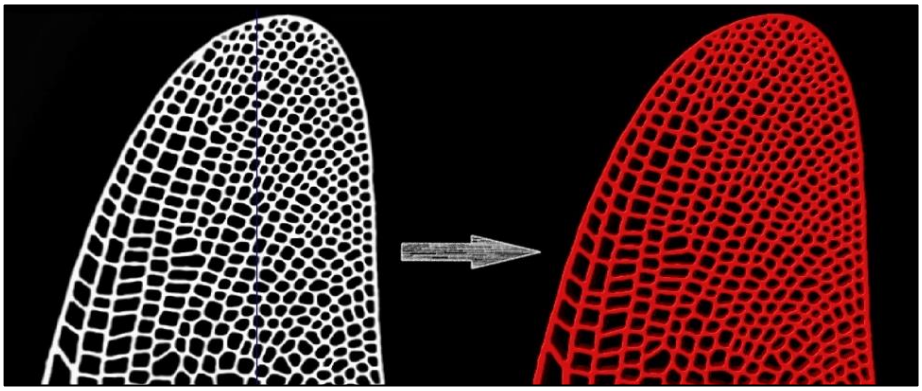


Şekil 4.1. Kanat yapısı (Fleck and Bechly'den, 2003)

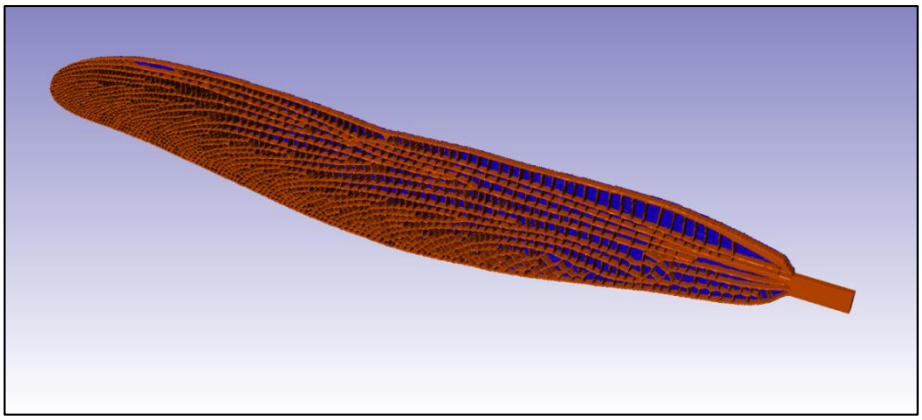
Görüntü, x ve y ekseni boyunca uzanan 1038x164 pikselden oluşmaktadır. z ekseninde ise arka arkaya 4 görüntü kullanılarak vokseller oluşturulmuştur. x ve y ekseninde her bir piksel aralığı 1,9 mm, z ekseninde ise her bir dilim kalınlığı 7,5 mm seçilerek kanadın eni x ekseni boyunca 2000 mm, y ekseni doğrultusunda uzanan boyu 300 mm, kalınlığı ise 30 mm olacak şekilde ölçüler ayarlanmıştır.

X ve Y ekseninde uzanan piksel tabanlı iki boyutlu görüntüler, gri piksel değerlerinin haritalanması tekniğiyle birleştirilmiştir. Bu haritalama tekniğinde 0-255

arasında kodlanmış olan 8 bitlik gri görüntü üstündeki 0 değeri siyah rengi temsil ederken, 255 değeri beyaz rengi temsil etmektedir. Arada kalan değerler ise beyaz ve siyahın birleşiminden oluşan gri değerleri temsil etmektedir. Haritalama tekniğinde bu değerler arasından en uygun eşik değeri olarak 90-255 arası seçilmiştir ve iki boyutlu resim üzerinde haritalama yapılmıştır (Şekil 4.2). Bu işlemi takiben yine aynı eşik değerlerine bağlı kalarak Z ekseninde arka arkaya dizilen görüntülerin birleştirilmesiyle üç boyutlu katı model oluşturulmuştur (Şekil 4.3).



Şekil 4.2. Haritalanmış 8 bitlik görüntü



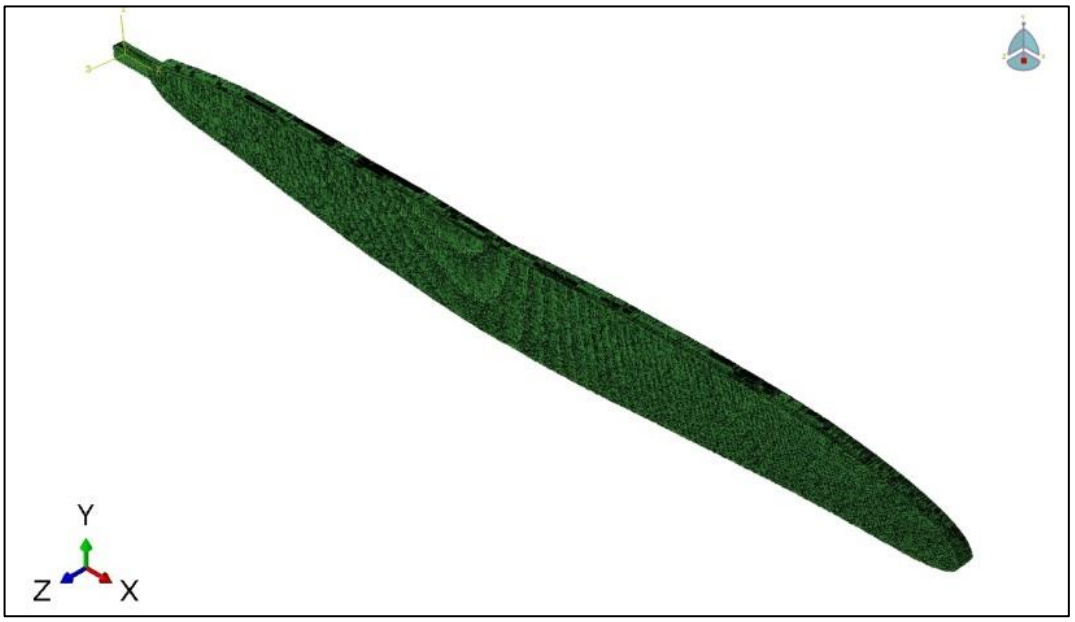
Şekil 4.3. Oluşturulan katı model

4.2.Sonlu Elemanlar Metodu Ağ Yapısı

Oluşturulan katı model sonlu elemanlar metoduyla çalışmak üzere yine aynı program kullanılarak, Abaqus programında kullanılmak üzere ağ yapısına bölünmüştür.

Abaqus (Dassault Systems, Abaqus, 6.13); sonlu elemanlar metodu tabanlı bir analiz programıdır. Abaqus programının tercih edilme sebebi "benchmark" bir program olmasıdır. Yani ölçüm ve karşılaştırma kriterleri göz önüne alındığında, deneysel olarak elde edilen verileri çözümsel olarak da kanıtlamış, dünya genelindeki büyük şirketlerde ve akademik çevrelerde de güvenle kullanılan bir programdır.

Ağ yapısı oluşturulurken eleman çeşidi olarak altı yüzü olan hekzahedral ve dört yüzü olan tetrahedral elemanların ortak kullanımı tercih edilmiştir. İşlemlerin sonucunda 511.790 düğüm noktalı, 83.648'i lineer hekzahedral, 1.193.244'ü lineer tetrahedral olmak üzere toplamda 1.276.928 elemandan oluşan kanat modeli ortaya çıkmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. SEM Kanat Modeli

4.3.Malzeme Özelikleri

Hücum kenarına eklenen mesnet bölgesi ve rüzgarla temas halinde olacak ön kısmın yine aynı malzeme kullanılarak 8 mm kalınlığında bir plak tabakasıyla kapatılmasıyla oluşturulmuş modelin toplam hacmi 2.493.740,75 mm^3'tür. Malzeme olarak, mekanik özelikleri Çizelge 4.1.'de verilen, üç boyutlu yazıcılarla üretilebildiği için havacılık araştırmalarında kullanılan prototiplemelerde tercih edilen PoliEtherimide malzemesi seçilmiştir. Çizelge 4.2.'de ise bu malzeme özeliklerine bağlı oluşturulan modelin kütlesi ve Şekil 4.4.'de verilen eksen takımına göre atalet momentleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. PoliEtherimide malzeme özelikleri;

Malzeme Özelliği	**PEI**
Yoğunluk (g/mm^3)	0,00128
Elastisite Modülü (MPa)	3.275,01
Poisson Oranı	0,44
Çekme Dayanımı (MPa)	113,76
Basınç Dayanımı (MPa)	151,68

Çizelge 4.2. Modelin fiziksel ve mekanik özelikleri;

Malzeme Özelliği	
Kütle (kg)	3,19
Hacim (mm^3)	2.493.740,75
Atalet Momentleri; I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} (mm^4)	9.225,53; 900.279,44; 893.334,44
I_{xy}, I_{yz}, I_{zx} (mm^4)	6.407,48; -2.444,83; 10.714,83

4.4.Serbest Titreşim Analizi

Rezonans, bir cismin doğal frekansıyla çakışan bir frekansta uyarılması veya bir milin doğal frekansıyla çakışan kritik bir hızda döndürülmesiyle oluşan ve rezonansa giren cismin aşırı şekilde titreşmesiyle sonuçlanan fiziksel bir olaydır. Rezonans sonucu oluşan titreşimler sisteme zarar verebilir veya yorulma etkilerine bağlı, sistem içinde lokal göçmelere sebep olabilir. Bu sebeplerden dolayı harmonik harekete maruz sistemlerde doğal titreşim analizleri yaparak rezonanstan kaçınmak, sistemin güvenliği ve emniyeti açısından önemlidir (Çağlayan, 2009).

Cismin sadece kütlesine ve K yay katsayısı değerine bağlı olan ve cismin o frekansta uyarılırsa yüksek genlikle, sürekli olarak titreşime maruz kalacağı frekansa doğal frekans denir. M kütleli, K yay katsayılı, C sönümlenme katsayısına sahip zorlanmış bir sistemin titreşim ifadesi (Çağlayan, 2009);

$$M\frac{d^2}{dt^2}X + C\frac{d}{dt}X + KX = F.sin(\omega t + \varphi) \qquad 4.1$$

M kütlesi, F genliğiyle etki eden sinüsoidal bir kuvvet etkisiyle, K yay katsayısı ve C sönümleme katsayısına sahip bir yayın ucunda asılı şekilde X genliği ile titreşir. X genliği de sinüsoidaldir. Yani $X = x.sin(\omega t + \varphi)$ şeklinde gösterilebilir. Serbest titreşim, belirli bir uyarı ile başlar ve bu uyarı sisteme belirli bir enerji verildikten sonra ortadan kalkar. Eğer F kuvveti ortadan kalktığında titreşim devam ediyorsa, sistem serbest titreşime geçer ve ω sistemin doğal frekansını verir. Serbest titreşim ifadesi; (Çağlayan, 2009)

$$M\frac{d^2}{dt^2}X + C\frac{d}{dt}X + KX = 0 \qquad 4.2$$

Sürtünme ve sönümün olmadığı teorik durumlarda; titreşim genliklerinin mertebesi sistem parametrelerine bağlıdır; yani titreşimin ana karakteristiği sistemin fiziksel özelliklerinin bir fonksiyonudur (Gürsel, vd., 2012). Viskoz sönümleyici bulunmayan sistemlerde serbest titreşim şu hali alır;

$$M\frac{d^2}{dt^2}X + KX = 0 \qquad 4.3$$

Sonsuz serbestlik dereceli sürekli sistem için bu ifade matris formunda, harmonik harekete göre düzenlenirse şu hali alır;

$$([K] - \omega_i^2[M])\{u_i\} = \{0\} \qquad 4.4$$

Denklemde $[M]$ kütle matrisi ve $[K]$ elastik yay katsayısı matrisi olmak üzere; ω_i^2 özdeğerleri, $\{u_i\}$ mod şekillerini içeren özvektörleri temsil etmekte olup, i ise 1 ile serbestlik derecesi arasındaki değerleri göstermektedir. Serbestlik derecesi; mekanik bir sistemin titreşimlerini ifade etmek için değer verilmesi gerekli olan bağımsız değişkenlerin sayısıdır. En basit toplanmış parametreli titreşim modeli tek serbestlik derecelidir. Sürekli sistem modelleri sonsuz serbestlik derecelidirler.

Mod şekilleri, frekans değerleri gibi yapının ağırlığı, kütle dağılımı ve mesnetlenme şartlarına bağlı olarak değişir. Kütle dağılımına bağlı olarak atalet momenti, mod şekillerinin belirlenmesinde önemli bir etkendir. Özdeğerlerin karekökü ω_i ise doğal açısal frekanslardır. (Çağlayan, 2009)

$$\omega_i = \sqrt{\frac{K}{M}}(rad/sn) \qquad 4.5$$

Özellikle türbin benzeri yapılarda titreşime bağlı rezonans oluşumu sık gözlemlenen bir olaydır. Rezonans olayının gerçekleşmemesi için kanat yapısının açısal frekanslarının sistemin işletme frekans değeri olan zorlayıcı dış kuvvetin frekansının aynı ya da yakın değerler almaması gerekir.

Titreşim frekanslarının genliği rezonans dışında, gürültü ve sistem içinde yorulma etkilerine de neden olur. Tüm bu faktörlerin incelenmesi için Abaqus programı kullanılarak sistemin doğal frekansları ve titreşim modları hesaplanmıştır.

4.5.Şekil Optimizasyonu

Şekil optimizasyonu, yapısal optimizasyonun bir çeşidi olup belirli tasarım kriterleri altında gerçel bir amaç fonksiyonunu maksimize yada minimize etmeye yarayan çözüm kümesinin iteratif olarak elde edilmesi işlemidir. Şekil optimizasyonu düğüm noktalarının vektörel olarak modifiye edilmesi mantığıyla çalışır. Bu şekilde optimize edilecek bölgede gerilme yığılmalarının önüne geçilebilmektedir. Amaç ve kısıtlamalar tasarım değişkenlerinin (x) 'e bağlı fonksiyonudur ve $F(x)$ fonksiyonunun alt kümesini oluşturur.

$F(x)$ fonksiyonu minimize ya da maksimize edilmesi istenilen amaç fonksiyonu olarak tanımlanmış olup; tasarım değişkenleri, yani optimizasyonu yapılmak istenilen malzemenin şekil değişkenleri ve boyut özelliklerini içeren (x) 'e bağlı olarak değişmektedir. Tasarım değişkenlerinin limitleri; $x_i^L \leq x_i \leq x_i^U$, $(i=1,n)$ şeklinde belirtilir; basitçe en uygun tasarımı yapılmak istenen bölgenin ve malzeme içinde tasarımdan bağımsız tutulacak bölgelerin belirlenmesini sağlar. $g_j(x) \leq 0$, $(j=1,m)$ olarak belirtilen ifadede $g_j(x)$ kısıtlamaları ifade eder ve tasarım değişkenlerine bağlı olarak sistem cevaplarının amaç fonksiyonuna uygun olup olmadığının kontrolünü yapar (Vanderplaats, 2006).

Kanat sap bölgesinin optimize sürecinde, sistem bağlantı noktasından kısıtlanmış olup amaç fonksiyonu olarak kaldırma ve sürükleme kuvvetine bağlı mesnet ve mesnet bölgesine yakın kısımlarda oluşan gerilmelerin minimize edilmesi istenmiştir. Tasarım sürecinde amaç fonksiyonlarından bir tanesi de; kütleyi, dolayısıyla türbin maliyetini makul düzeyde tutmaktır. Bu sebeplerden dolayı, tasarım değişkenleri olarak kaldırma kuvvetinden en iyi şekilde yararlanabilmek için sistemin geometrik şekil yapısı ve kütle artımından kaçınmak için eleman yoğunluğu seçilmiştir.

4.6. Analizlerde Kullanılan Rüzgar Basıncı

Rüzgar yüklemeleri yapılara rasgele etkiyen dinamik kuvvetlerdir. Bu kuvvetler rüzgar hızına, yapının yerden yüksekliğine, şekline ve bulunduğu ortamın topoğrafik özelliklerine bağlı olarak hesaplanır. ASCE 7-10 (ASCE/SEI 7-10 2010) standartlarına göre hesaplanan, belirli bir z yüksekliğinde yapıya etkiyen hız basınç kuvveti q_z; şu formülle hesaplanır:

$$q_z = 0.000000613\, K_z K_{zt} K_d V^2 \ (\mathrm{N}/mm^2) \qquad 4.6$$

Rüzgar hızı basınç hesaplamaları yapılırken öncelikle yapının bulunduğu ortamın atmosferik sınır koşullarının belirlenebilmesi için sınıflandırılması gerekmektedir. Sınıflandırma maksadıyla kullanılan; B sınıfı, C sınıfı ve D sınıfı olmak üzere üç farklı sınıf vardır (ASCE/SEI 7-10 2010).

Bu sınıflandırmaya göre yüksek yapıların bulunduğu şehirler B sınıfı, daha alçak yapıların bulunduğu banliyö ve kasaba tarzı yerleşim yerleri C sınıfı, daha geniş açıklıkların olduğu ve açık deniz yapılarının hesaplamaları için kullanılmak üzere D sınıfı kabul edilir. Tasarım yapılırken banliyö ve kasaba benzeri açıklık alanlarda kullanılması planlanan rüzgar türbini sınıfı, C olarak belirlenmiştir. Etkilenme katsayısı K_z, yapının yerden yüksekliğine göre değişim gösterir (Çizelge 4.3.). C sınıfı alanda

yerden 10 metre yükseklikte yapılması planlanan türbin için bu değer 0,99 olarak alınmıştır (ASCE/SEI 7-10 2010).

Çizelge 4.3. Etkilenme katsayısı K_z 'nin yüksekliğe bağlı değişimi

Yerden Yükseklik	B Sınıfı	C Sınıfı	D Sınıfı
0-4,6 m	0,57	0,85	1,03
4,7-6,1 m	0,62	0,90	1,08
6,2-7,6 m	0,66	0,94	1,12
7,7-9,1 m	0,70	0,98	1,16
9,1-12,2 m	0,76	1,04	1,22

Yapının bulunduğu ortamın topoğrafik özelliklerine bağlı olan K_{zt}, topoğrafya katsayısını ifade eder, düz alana yapılması planlanan türbin için bu değer 1 olarak alınmıştır (ASCE/SEI 7-10 2010). Yapının rüzgar alan yüzeylerine bağlı olarak değişen K_d (Çizelge 4.4); yüzey basınç katsayısı, rüzgar türbini için 0,85 olarak alınmıştır (ASCE/SEI 7-10 2010).

Çizelge 4.4. Yüzey basınç katsayısı K_d 'nin yapı cinsine göre aldığı değerler

Yapı Cinsi	$\boldsymbol{K_d}$
Binalar	0,57
Fabrika bacaları, Su tankları, Depolar	0,95
Levha ve Billboardlar	0,85
Kafes Sistem Kuleler	0,85

Rüzgar hızı V ise 10, 15 ve 20 m/sn olarak alınarak yapılan işlemler sonucunda Çizelge 4.5.'de verilen değerler elde edilmiştir.

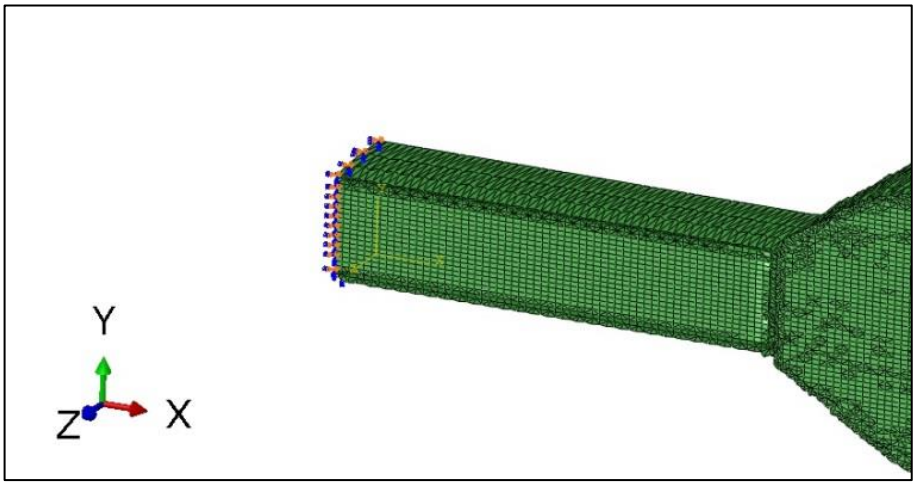
Çizelge 4.5. Değişen rüzgar hızlarına bağlı hesaplanan rüzgar basınçları;

Rüzgar Hızı (m/sn)	**Rüzgar Basıncı** (N/m^2)
10	51,58
15	116,06
20	206,34

4.7. Kanat Kesiti İçin Titreşim Analizleri

Oluşturulan kanat geometrisi Çizelge 4.1'de verilen malzeme özellikleri ve Şekil 4.5.'de verilen mesnetlenme şartlarına bağlı olarak serbest titreşim analizine tabi tutulmuş ve ilk on mod değeri hesaplanmıştır. Bu analizin amacı, oluşturulan modele türbin kanat kesitlerinin aerodinamik özelliklerini belirleyen kamburluğu verebilmektir. Sistemde harmonik harekete bağlı rezonans etkisinin olup olmadığı, Bölüm 4.11.'de birleştirilmiş kanat modeli için titreşim analizleri yapılarak incelenmiştir.

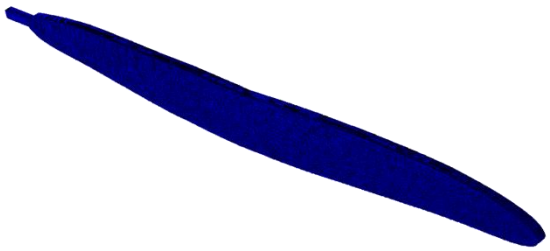
Şekil 4.5.'de verilen eksen takımına göre mesnetlenme şartı; sistem Z ekseni etrafında döneceği için sap bölgesinin uç kısmından, $U_1 = U_2 = U_3 = 0$; $UR_1 = UR_2 = 0$ olarak seçilmiştir.

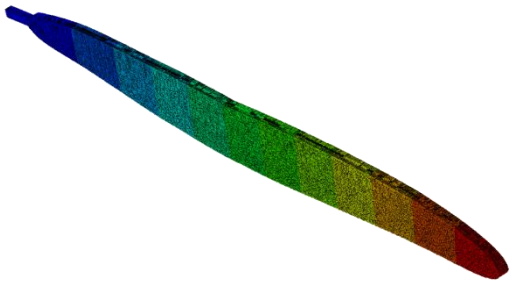
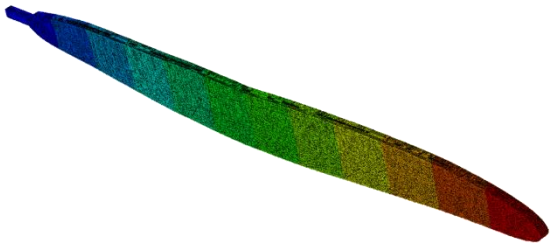
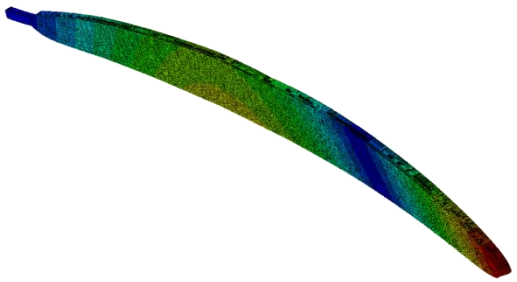
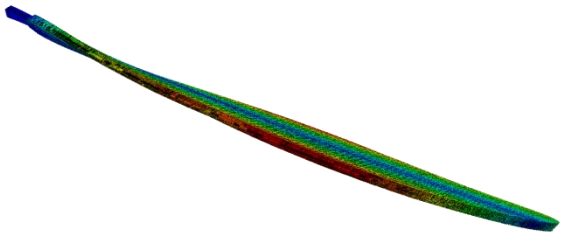
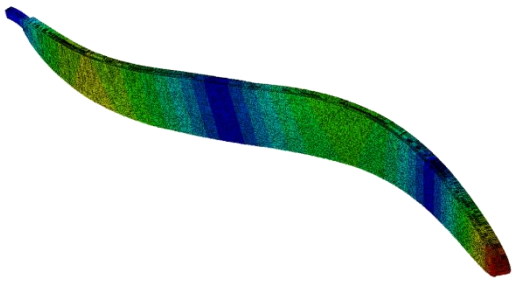


Şekil 4.5. Eksen Takımı ve Mesnetlenme Şartı

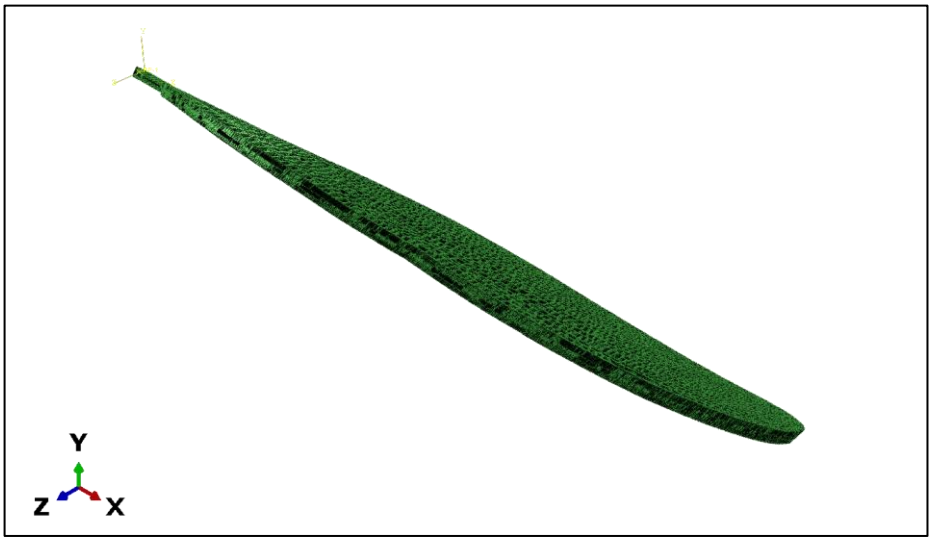
Analizler sonucunda elde edilen ilk 5 mod değeri ve mod şekilleri Çizelge 4.6.'da verilmiştir;

Çizelge 4.6. Doğal frekansa bağlı mod şekilleri

Mod	Frekans (Rad/Sec)	Mod Şekli
Başlangıç Durumu	0	

1	0,29	
2	0,41	
3	2,19	
4	4,46	
5	6,59	

Titreşime bağlı mod şekilleri arasından, kanat kesitini oluşturmak üzere, önden rüzgarı alıp, +z ekseni etrafında tork oluşturacak şekilde, sistemin +x ekseni etrafında burulmasıyla oluşmuş 4. mod şekli seçilmiştir (Şekil 4.6).



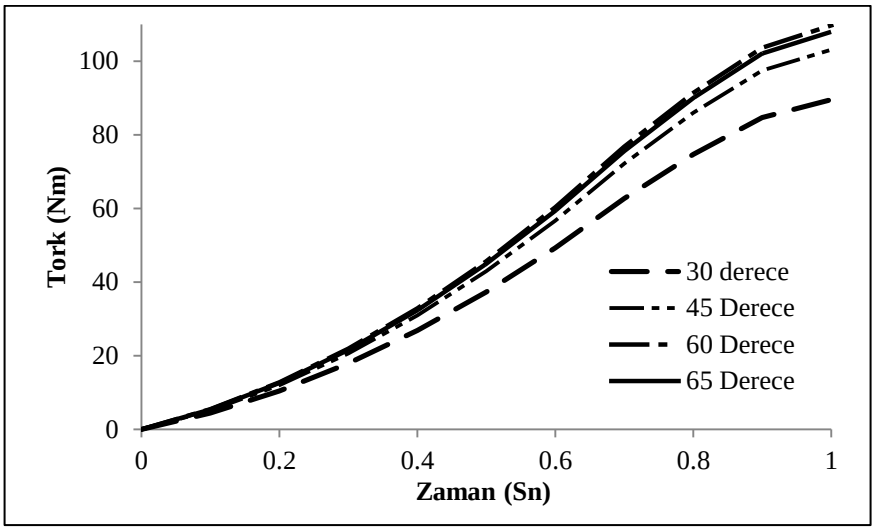
Şekil 4.6. Kanat kesiti izometrik görünüşü

Bu seçim rasyonel olarak, 4. mod şeklinin rüzgar türbini kanat kesitlerine benzer bir şekilde, kesitin üst kısmının alt kısmına göre daha kambur bir formu yakalamasından dolayı yapılmıştır. Bu kamburluk sayesinde kesitin alt kısmıyla üst kısmı arasında meydana gelecek olan basınç farkından dolayı, kesitin +z ekseni etrafında dönmesini sağlayacak kaldırma kuvveti oluşacaktır.

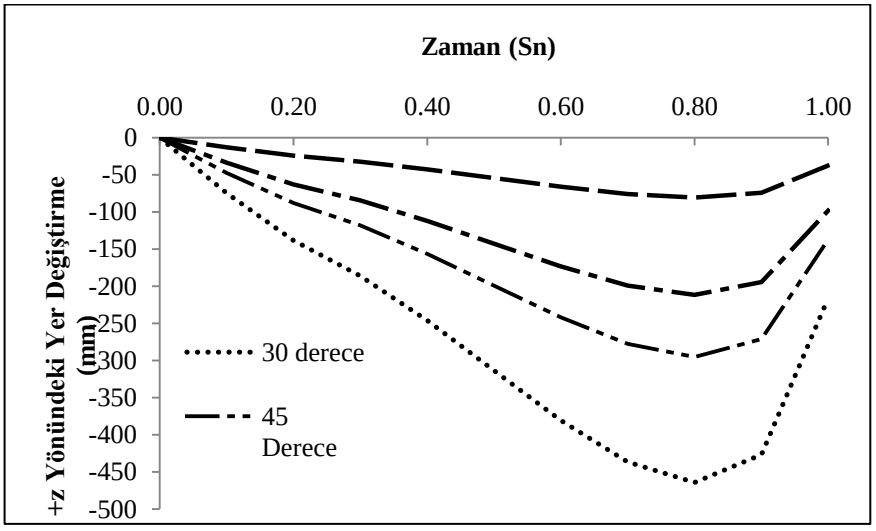
4.8. Kanat Kesiti İçin Statik Analizler

Kendi içinde uygun kamburluğu verilmiş kanat kesitine, -z yönünde etkiyen rüzgar basıncının +z ekseni etrafında oluşturacağı tork değerinin arttırılması amacıyla uygun hücum açısını tespit edilmesi gerekmektedir. Denklem 4.6. yardımıyla hesaplanan 10 m/sn.'lik rüzgar hızına eşdeğer rüzgar basıncı, kanat kesitinin +x ekseni

etrafında 30º, 45º, 60º ve 65º döndürülmesiyle oluşturulmuş hallerine –z yönünde etkitilerek, kaldırma kuvvetlerine bağlı, merkezde +z ekseni etrafında oluşan tork değerleri (Şekil 4.7.) ve sürükleme kuvvetlerine bağlı +z ekseni yönündeki kanat uç noktasındaki yer değiştirmeler (Şekil 4.8.) hesaplanmıştır.



Şekil 4.7. Değişen hücum açısına bağlı oluşan tork değerleri



Şekil 4.8. Değişen hücum açısı değerlerine bağlı oluşan yer değiştirmeler

Bu analiz, uygun hücum açısının tespit edilebilmesi için yapılmıştır. Bir saniyelik analiz sonuçları, uygun hücum açısının tespit edilebilmesi için yeterli bilgiyi vermektedir. Statik analizlerden elde edilen değerlere bağlı olarak, maksimum torkun 60º ’lik açıya kadar artarak 60º ’den sonra düşüşe geçmesi maksimum torku oluşturan 60º ’lik açı değerinin uygun hücum açısı değeri olduğunu göstermiştir.

Bu açıya bağlı maksimum tork değeri; 109,66 N.m’dir. Aynı hücum açısı değerine bağlı olarak, kanadın uç noktasındaki rüzgar yönündeki maksimum yer değiştirme miktarı -211,6 mm olarak belirlenmiştir. 30º ‘lik hücum açısında oluşan 89,6 N.m’lik tork ile 60º ’lik hücum açısı değerinde oluşan 109,66 Nm’lik tork arasında %22,3’lük bir artış meydana gelmiştir. Kanat bünyesinde meydana gelen maksimum yer değiştirmelerin 30º ’lik hücum açısında -462,22 mm’den -211,6 mm değerine gerilemesi, kaldırma kuvvetinin artmasına bağlı azalan itme kuvvetinden kaynaklanmaktadır (Bkz. Şekil 3.9).

Kanadın 1 saniyelik analizi boyunca artan tork değeri, +z ekseni etrafında oluşan torktur. Hücum açısına bağlı, kanat uç noktasında oluşan +z yönlü yer değiştirmelerin 0,8 saniyeye kadar artıp sonra azalması ise, kanadın +z ekseni etrafında dönme eğilimine geçip , +y yönünde harekete yönelerek +z yönünde toparlanmasından kaynaklanmaktadır.

4.9. Kanat Kesiti İçin Optimizasyon Analizleri

Statik analizler sonucunda Çizelge 4.1.’de verilen elastik ve plastik malzeme özeliklerine göre, malzemenin gerilmelere ve yer değiştirmelere bağlı olarak plastik deformasyona uğramadığı, elastik bölgede kalarak kütlesi ve rüzgar yüklemesine karşı dayanıklı olduğu görülmüştür.

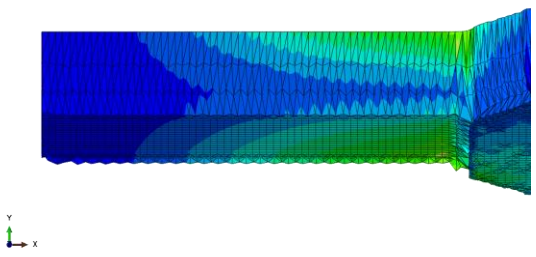
Analizler sonucunda, statik gerilmelere bağlı olarak ortaya çıkan maksimum gerilmeler, mesnet bölgesine yakın olmasından dolayı kanadın hücum kenarı bölgesinde

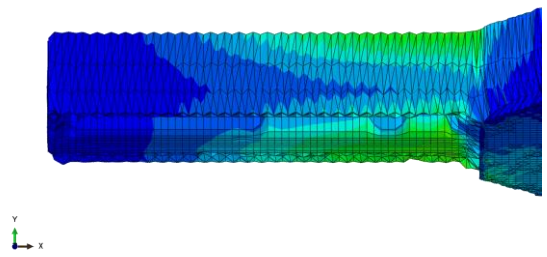
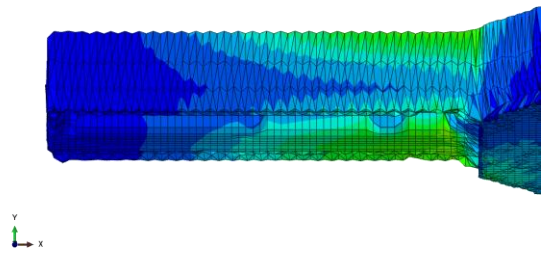
yoğunlaşmaktadır. Bu gerilmeler, başlangıçta dikdörtgen olarak tasarlanmış hücum kenarı bölgesinin, köşe kısımlarında gerilme yığılmaları oluşturduğu için, hücum kenarı bölgesinde şekil optimizasyonu işlemi uygulanarak sistem daha dayanıklı hale getirilmiştir.

Uygulanan şekil optimizasyonu işlemi, Bölüm 4.5.'de açıklandığı üzere, düğüm noktalarının vektörel olarak konumlarının amaç fonksiyonuna göre iteratif olarak modifiye edilmesi mantığıyla çalışmaktadır. Bu optimizasyon işleminde kullanılan amaç fonksiyonu; kullanılan malzeme miktarı değişmezken maksimum gerilmelerin azaltılmasıdır. Statik analizlerden elde edilen gerilme değerlerine göre modifiye edilen düğüm noktaları sayesinde, optimizasyon bölgesinde gerilme yığılmalarının önüne geçilmiş, hacimsel olarak malzemeden tasarruf edilirken yapısal olarak da sistem, daha güvenilir bir hale getirilmiştir.

Esas şekilden başlayarak iteratif olarak beş kez işlem tekrar edilerek, şekil optimizasyonuna bağlı maksimum gerilme değerleri Çizelge 4.7.' de verilmiştir;

Çizelge 4.7. Şekil optimizasyonuna bağlı azalan gerilme değerleri

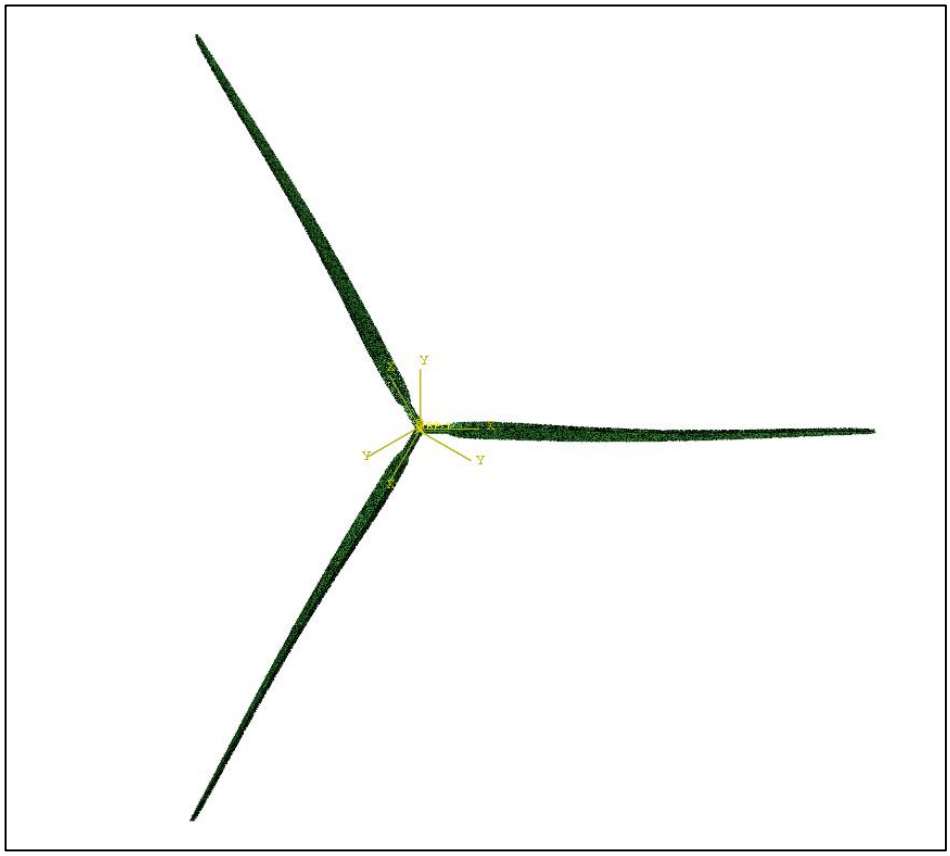
Esas model σ_{maks} = 84,2 MPa	

3. İterasyon σ_{maks} = 81,4 MPa	
5. İterasyon σ_{maks} = 80,5 MPa	

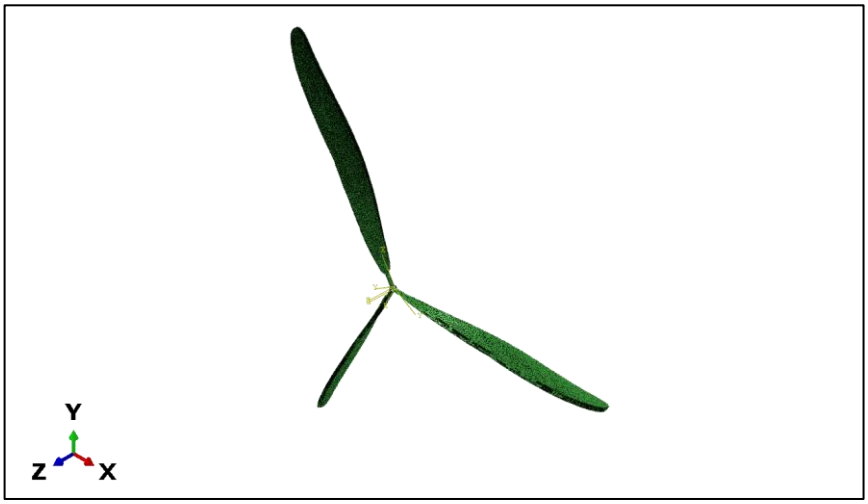
Çizelge 4.7.'de verilen esas model, kanat kesitinin ilk halidir. Hücum kenarı bölgesinin alt ve üst kısmında yeşil renk koduyla gösterilen bölgeler maksimum gerilmelerin oluştuğu bölgelerdir. Üçüncü ve beşinci iterasyonlar sonucunda optimize olan şekillerde ise, dikdörtgen prizma şeklinde olan sap bölgesinin orta kısmı boşaltılmış, alt ve üst flaşlar genişletilip yuvarlatılarak gerilmelerin oluştuğu eksendeki atalet momenti arttırılmış ve maksimum gerilme miktarı esas modelde 84,2 MPa değerinden üçüncü iterasyonda 81,4 MPa 'a inmiş, beşinci iterasyonda ise 80,5 MPa değerine gerilemiştir. Hücum bölgesinin optimizasyon işlemi sonucunda kullanılan malzeme miktarı değişmezken esas modelle beşinci iterasyon sonunda oluşturulan model arasında % 4,4' lük gerilme azalması olmuştur.

4.10. Birleştirilmiş Kanat Modeli İçin Dinamik Analizler

Hücum kenarı bölgesi optimize edilen kesitten üç tanesinin, aralarında 120º 'lik açılar bulunacak şekilde birleştirilmesiyle Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.'da görülen kanat modeli oluşturulmuştur.



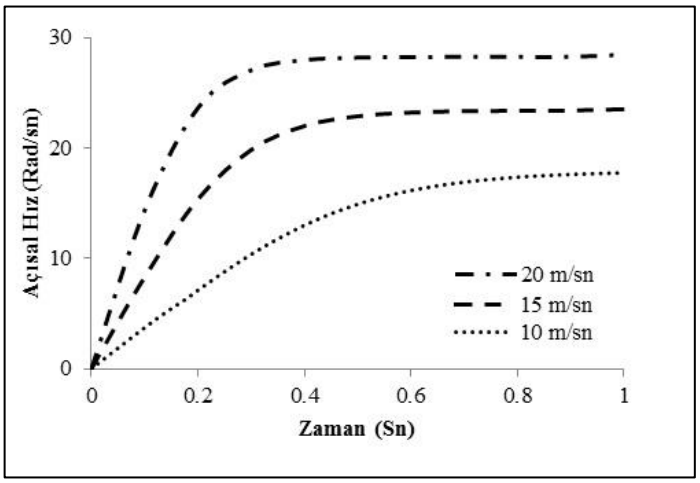
Şekil 4.9. Birleştirilmiş kanat modeli (Önden)



Şekil 4.10. Birleştirilmiş kanat modeli (İzometrik görünüş)

10 m/sn, 15 m/sn ve 20m/sn'lik rüzgar hızlarının, birleştirilmiş kanat modeli üzerinde oluşturduğu rüzgar basınçlarının sisteme dinamik yük olarak etkitilmesiyle yapılan 1 sn'lik dinamik analizlerde, sistemin açısal dönüş hızları tespit edilerek bu dönüş hızlarına bağlı açısal hız oranı, λ (Denklem 2.4) bulunmuştur.

10 m/sn, 15 m/sn ve 20m/sn'lik rüzgar hızlarına bağlı olarak analizlerden elde edilen açısal hız değerleri Şekil 4.11.'de verilmiştir;



Şekil 4.11. Zamana bağlı açısal hız değişimi

10 m/sn'lik rüzgar hızı için tasarlanmış olan sistemin, bu rüzgar yükü etkisindeki 1 sn'lik analizinden elde edilen maksimum açısal hız miktarı 17;78 rad/sn olarak bulunmuştur. λ uç hız oranı Denklem 3.4 yardımıyla;

$$\lambda = \frac{17{,}78\,\frac{\text{rad}}{\text{sn}}\text{x}2000\text{mm}}{10000\ \text{mm/sn}}$$

$$\lambda \cong 3{,}5$$

4.11. Birleştirilmiş Kanat Modeli İçin Titreşim Analizleri

Dairesel harmonik hareket yapan kanat modelinde dinamik analizlerden elde edilen açısal hızların yani zorlayıcı kuvvet frekanslarının, kanat modelinin doğal frekanslarına denk düşen değerleri rezonans oluşumuna yol açar. Rezonans etkisinin oluşması istenmediği için mod değerlerinin bulunması amacıyla doğal frekans analizleri yapılmıştır. Bulunan ilk mod şekli, en düşük potansiyel enerji ve şekil değiştirme enerjisi ile oluşur ve doğal frekansın anlaşılmasında belirleyicidir. İkinci ve üçüncü mod şekilleri daha yüksek enerjiye ihtiyaç duyarlar ve daha yüksek şekil değiştirme enerjisi içerirler.

Birleştirilmiş kanat modeli için analizler sonucunda elde edilen ilk 10 mod değeri Çizelge 4.8.'de verilmiştir;

Çizelge 4.8. İlk on mod doğal frekans değerleri

Mod	Frekans (Rad/sn)	Titreşim Türü	Yön
1	$1{,}24x10^{-4}$	Eğilme Titreşimi	Y ekseni çevresinde
2	0,29	Eğilme Titreşimi	Z ekseni çevresinde
3	0,30	Eğilme Titreşimi	X ekseni çevresinde
4	0,42	Burulma Titreşimi	X ekseni çevresinde
5	0,48	Eğilme Titreşimi	Y ekseni çevresinde
6	0,49	Eğilme Titreşimi	Z ekseni çevresinde
7	1,31	Eğilme Titreşimi	Y ekseni çevresinde
8	1,63	Burulma Titreşimi	X ekseni çevresinde
9	1,69	Burulmalı Eğilme Titreşimi	Xekseni çevresinde burulma,Y ekseni çevresinde eğilme
10	4,20	Burulmalı Eğilme Titreşimi	X ekseni çevresinde burulma, Z ekseni çevresinde eğilme

Kanat modelinin tasarım rüzgar hızı olan 10 m/sn'lik değeri için dinamik analizlerden elde edilen açısal hızı 17,78 rad/sn'dir. Türbin tasarımı yapılırken mil tarafından tahrik edilen elektrik jeneratörünün senkron jeneratör olduğu ve bu nedenle de türbinin dönüş hızının her şart altında eşit olduğu kabul edilir (Gürsel, vd., 2012).

Birinci moda karşılık gelen frekans değeri $1{,}24x10^{-4}$ rad/sn, ikinci moda karşılık gelen frekans değeri ise 0,29 rad/sn karşılık gelmektedir. Sistemin rezonans frekanslarının zorlayıcı kuvvet frekansı olan 17,78 rad/sn'den çok küçük olması sebebiyle herhangi bir rezonans tehlikesi bulunmamaktadır.

4.12. Birleştirilmiş Kanat Modeli İçin Statik Analizler

Fiziksel olarak, bir merkez etrafında dairesel olarak hareket eden cisimler, dönüş hızı, kütle ve yarıçapa bağlı olarak merkezden dışarıya doğru bir ivmeye maruz kalırlar. Sistemin merkezinden başlayıp, cismin doğrultusunda eksenel olarak etkiyen bu ivmeye bağlı, cismin bünyesinde merkezkaç kuvveti olarak adlandırılan bir kuvvet oluşur. Dönüşsel bünye etkisi olarak da adlandırılan bu etki, sistemde eksenel olarak uzanan global ve lokal +x eksenleri boyunca gerilmelere ve gerilmelere bağlı yer değiştirmelere neden olur. Bu gerilmelerin ve yer değiştirmelerin sisteme etkisi önemlidir ve sistem göçmelerine neden olmaması için analizlerde göz önünde bulundurulması gerekir.

Bu sebeplerden dolayı merkezcil kuvvetlerin etkilerini ve merkezde oluşan tork değerini hesaplamak için, dinamik analizlerden elde edilen 10 m/sn, 15 m/sn ve 20 m/sn'lik rüzgar hızlarına ait açısal dönüş hızları, statik analizler altında sisteme, bünyesel dönüş etkisi olarak tanımlanmıştır. Bu analizler sonucunda elde edilen merkezkaç kuvvetleri ve tork değerleri Çizelge 4.9.' da verilmiştir;

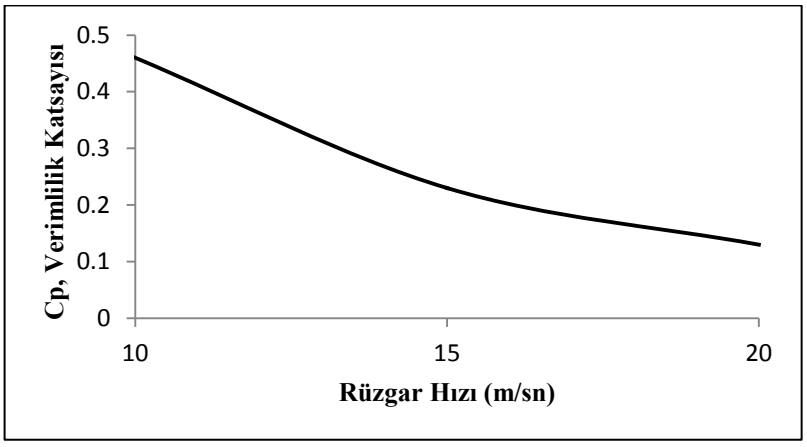
Çizelge 4.9. Rotasyonel dönme kuvvetine bağlı eksenel kuvvetler ve tork değerleri

Kuvvet	Rüzgar Hızı	Devir Sayısı	Değer
Merkezkaç Kuvveti	10 m/sn 15 m/sn 20 m/sn	N=169,8 rpm N=224,5 rpm N=271,7 rpm	2148,7 N 4695,6 N 8167,7 N
Tork	10 m/sn 15 m/sn 20 m/sn	N=169,8 rpm N=224,5 rpm N=271,7 rpm	202,3 N.m 253,7 N.m 281,2 N.m

Devir sayısının artmasına bağlı olarak sistemde istenmeyen merkezkaç kuvvetleri 10 m/sn ‘lik rüzgar hızı etkisinde 2148,7 N ’dan 20 m/sn ‘lik rüzgar hızı etkisinde 8167,1 N ’a artış göstermiştir. Aynı rüzgar hızlarına bağlı tork değerleri ise 202,3 N.m’den 281,7 N.m’ye artış göstermiştir. Verimlilik için yüksek olması beklenen tork değerleri iki hız değeri için % 39 artış gösterirken, sistem içinde yorulmalara ve stabilite sorunlarına yol açabilecek merkezkaç kuvvetleri %280.12 artış göstermiştir.

4.13. Verimlilik Hesapları

Dinamik analizlerden elde edilen açısal dönüş hızlarına bağlı açısal hız oranı ve statik analiz sonuçlarından elde edilen tork değerleri kullanılarak, Denklem 3.3.’e göre sistemin verimlilik katsayısı hesaplanmıştır. 10 m/sn’lik rüzgar hızı için tasarlanmış olan sistemin, bu rüzgar kuvveti etkisindeki verimliliği; %46 olarak bulunmuştur. 15 ve 20 m/sn’lik rüzgar hızları için verimlilik değerleri ise, sırasıyla %23 ve %13’tür (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Rüzgar hızına bağlı değişen verimlilik katsayısı

C_p verimlilik katsayısının λ açısal hız oranına bölünmesiyle C_Q tork katsayısı 0,153 olarak bulunmuştur. λ değeri, 10 m/sn ve 20m/sn'lik rüzgar hızlarına bağlı olarak 3,5 ile 5,7 arasında değerler alabilmektedir.

Denklem 3.3.'de yer alan, hava akımındaki kinetik enerjiden kaynaklanan güç ifadesi, verimlilik katsayısına göre düzenlenirse şu hali alır;

$$P_{rüzgar} = C_p \frac{1}{2} \rho A V_w^3 \qquad 6.7$$

10 m/sn rüzgar hızı altında çalışmak için tasarlanmış olan kanat modelinin aynı rüzgar hızı altındaki C_p verimlilik katsayısı 0,46 olduğu düşünülürse, 1,23 kg/m^3 yoğunluklu hava ortamında, 2 m yarıçapa sahip türbinden elde edilecek güç; 3,55 kW olarak belirlenmiştir. Türkiye'de yaşayan dört kişilik bir ailenin yıllık elektrik enerjisi tüketim miktarının 5600 kW.sa olduğu düşünülürse (Gürsel, et al., 2012), biyomimetik kanat modelinden elde edilecek yıllık elektrik enerjisi, 31098 kW.sa 'dir.

Ameku K. vd. (Ameku, et al., 2008), 10-19 m/s'lik rüzgar hızlarında çalışmak üzere 3 kW'lık, ince cidarlı kanatlara sahip kanat tasarımı yaparak teorik ve nümerik analiz sonuçlarını kanat kesiti ailelerinden NACA 4418 kesitinin verileriyle karşılaştırmışlardır. Tasarladıkları 2 metre uzunluğundaki, ince cidarlı kesite sahip, 3 kanatlı, yatay eksenli rüzgar türbini, 11 m/sn' lik rüzgar hızı altında çalışmak üzere tasarlanmıştır. Tasarladıkları kesitin, fiziksel özellikleri Çizelge 4.10.'da verilmiştir.

Çizelge 4.10. NACA4418, İnce Cidarlı Kesit ve Biyomimetik Kesit Fiziksel Özelikleri

Değerler	**NACA4418** (Ameku et al. 2008)	**İnce Cidarlı Kesit** (Ameku et al. 2008)	**Biyomimetik Kesit**
Uç Hız Oranı	3	3	3,5
Kütle (kg)	5,4	6	3,19
Ağırlık Merkezinin Hücum Kenarından Uzaklığı (mm)	560	759	975

Ameku K. vd. (Ameku, et al., 2008) yaptıkları nümerik analizler sonucunda ince cidarlı kesitin, 11 m/sn'lik rüzgar hızı için açısal hızını 150 rpm olarak bulmuşlardır. Biyomimetik kanat modelinde bu hız 169,8 rpm olarak hesaplanmıştır. 160 rpm için tek kanat kesitinin torkunu 92,1 N.m olarak hesaplamışlardır. Biyomimetik kanat modelinde bu değer 109,66 N.m'dir. Yine aynı çalışmalarında, 3,5 uç hız oranı için tork katsayısını ince cidarlı kesitleri için hesaplayarak 0,14 olarak tespit etmişlerdir. Biyomimetik kanat modelinde bu oran, 3,5 uç hız oranı için 0,153 olarak hesaplanmıştır. Yine aynı uç hız oranı için NACA kesitinin tork katsayısı 0,15 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.11.).

Çizelge 4.11. NACA4418, İnce Cidarlı Kesit ve Biyomimetik Kesit Verimlilik Karşılaştırmaları

Değerler	**NACA4418** (Ameku, et al., 2008)	**İnce Cidarlı Kesit** (Ameku, et al., 2008)	**Biyomimetik Model**
Açısal Hız (rpm)	150	150	169,8
Verimlilik Katsayısı	%45	%44	%46
Tork (N.m)	-	92,1	109,66
Tork Katsayısı	0,150	0,140	0,153
Yıllık Üretilen Elektrik Enerjisi Miktarı	-	26280kW.h	31098 kW.h

Çizelge 4.11.'de verilen, analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında biyomimetik modelin açısal hızı, NACA 4418 ve ince cidarlı kesite göre 10 m/sn'lik rüzgar hızı altında %13,2 fazladır. Verimlilik katsayıları karşılaştırıldığında ise biyomimetik kanat modelinin %46 değeri ile NACA 4418 modeline göre %1'lik, ince cidarlı kanat modeline göre %2'lik bir avantajı vardır. Tek kanat kesitlerinin tork miktarları karşılaştırıldığında ise biyomimetik kanat kesitinin 109,66 N.m ile ince cidarlı kanat kesitinin sahip olduğu 92,1 N.m'lik tork değerine göre %19,06'lık bir farkı bulunmaktadır.

Çizelge 4.10.'da verilen kesit fiziksel özellikleri incelendiğinde, enerji verimliliği olarak %2'lik farkla avantajlı olan biyomimetik kanat modeli, kullanılan malzeme miktarı olarak da avantajlı görülmektedir. İnce cidarlı kesitin kütlesi 6 kg iken, biyomimetik kanat kesitinin ağırlığı 3,19 kg'dır. Yani enerji verimliliği %2 fazlayken, kütle olarak da %46,83 farkla daha hafiftir.

Yıllık üretilen elektrik enerjisi miktarları hesaplandığında ise biyomimetik kanat modelinin gücü 3,55 kW'dır. Yıllık olarak 31.098 kW.sa elektrik enerjisi üreten sistem, 3kW'lık güç ile üretim yapan ince cidarlı kanat modelininin yıllık elektrik enerjisi üretim miktarı olan 26.280 kW.sa'e göre %18,33'lük farkla daha avantajlıdır.

5.SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde, iklim koşullarının havadaki karbondioksit miktarının artmasına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği düşünülürse, küresel olarak bir an önce fosil yakıtlardan vazgeçilip temiz enerji dönüşümü sağlayan sistemlerin yaygınlaştırılması gerekmektedir. Bu dönüşümünde verimli bir şekilde sağlanması açısından, daha az malzeme kullanılarak daha verimli ürünlerin tüketicilere sunulması hedeflenmelidir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, genellikle havacılıkla ilgili kurum ve şirketlerin (NACA, NREL), geçmişte hazırladığı şablonlar, teknolojinin gelişimine bağlı olarak yeni analiz ve optimizasyon yöntemlerinin gelişimiyle tekrardan ele alınarak, var olan kanat kesitleri üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Bu geliştirilen rüzgar türbinleri incelendiğinde, bunların da havacılık sektöründe elastik olduğu için tercih edilen, plastik ve benzeri malzemelerin kompozit bir şekilde kullanıldığı petrol bazlı ürünlerden üretildiği bilinmektedir. Bu temiz enerji dönüşümü sağlayan tesislerin tüketicilerin kullanımına sunulurken de doğaya verilen zarar düşünülerek, gereksiz malzeme kullanımından kaçınarak daha verimli tasarımların yapılması gerekmektedir.

Biyomimetik ve tersine mühendislik yöntemleri uygulanarak geliştirilmiş olan rüzgar türbini kanat modeli ise hazır kanat kesiti şablonların yeniden optimize edilmesiyle değil, doğada benzer aerodinamik etkilere karşı zaten optimize olmuş bir sistemin, kullanım amacına uygun bir şekilde yeniden optimize edilmesiyle oluşturulmuştur. Literatürde yapılan diğer çalışmalar ile karşılaştırıldığında (Ameku, et al., 2008), malzeme olarak %46,83 daha hafif, enerji verimliliği olarak da %2 farkla daha verimli olduğu tesbit edilmiştir. Yapılan verimlilik analizleri sonucunda kanat mikro mimarisinin sağlamış olduğu güvenlik ve yapılan optimizasyonların sağladığı verimlilik açısından geliştirilmeye uygun olarak görülmektedir.

10 m/sn‘lik rüzgar hızı altında çalışmak için tasarlanmış olan, 2 metre yarıçaplı kanat modelinden, aynı rüzgar hızı altındaki C_p verimlilik katsayısına bağlı olarak elde edilecek güç miktarı; 3,55 kW olarak belirlenmiştir. Türkiye’de yaşayan dört kişilik bir ailenin yıllık elektrik enerjisi tüketim miktarının 5.600 kW.sa olduğu düşünülürse (Gürsel, vd., 2012), biyomimetik kanat modelinden elde edilecek yıllık elektrik enerjisi, 31.098 kW.sa, ortalama bir ailenin yıllık elektrik tüketimini karşılaması açısından gayet yeterli görülmektedir.

Özellikle gelişen üç boyutlu yazıcı teknolojisi sayesinde bu tip tasarımların prototiplenmesi ve kişisel kullanıma sunulması kolaylaşmıştır. İlerleyen çalışmalar için, statik ve dinamik analiz sonuçlarından elde edilen verilerin, vorteks hesaplarının da yapılabildiği hesaplamalı akışkanlar mekaniği analizlerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmasını takiben, ürünün üretiminin yapılarak, deneysel sonuçlarla analiz sonuçlarının karşılaştırılması düşünülmektedir. Bu analizleri takiben ürünün üretilerek kişisel kullanıma açılması düşünülmektedir.

Ayrıca aerodinamik olarak geliştirilebilen ürünün, kullanım alanı ve gereken mekanik özelliklerine göre, genetik algoritma gibi, daha farklı optimizasyon yöntemleri uygulanarak, havacılık sektörünün kullanımına uygun, insansız hava taşıtı benzeri sistemlerde de kanat yapısı olarak kullanılabileceği düşünülmektedir.

Kaynaklar Dizini

Ameku, K., Nagai, B.M. and Roy, J.N., 2008, Design of a 3kW wind turbine generator with thin airfoil blades, Experimental Thermal and Fluid Science, 32(8), pp.1723–1730.

Anant Kishore, R. and Priya, S., 2013, Design and experimental verification of a high efficiency small wind energy portable turbine (SWEPT), Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 118, pp.12–19.

3D image processing software from Simpleware. Available at: http://www.simpleware.com/software/scanip/ [Erişim: 08.02.2015].

Abaqus/CAE - Dassault Systèmes. Available at: http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/abaquscae/ [Erişim: 08.02.2015].

İlköğretim Öğrencileri İçin Meteoroloji - Meteoroloji Genel Müdürlüğü. Available at: http://www.mgm.gov.tr/cocuklar/kitap-meteoroloji.aspx?s=ruzgar [Erişim: 08.02.2015].

Kanat profili - Vikipedi. Available at: http://tr.wikipedia.org/wiki/Kanat_profili [Erişim:03.02.2015].

Kızböcekleri - Vikipedi. Available at: http://tr.wikipedia.org/wiki/K%C4%B1zb%C3%B6cekleri [Erişim: 03.02.2015].

MTHSEnviroscapes - Wind Energy. Available at: http://mthsenviroscapes.wikispaces.com/Wind+Energy [Erişim: 03.02.2015].

Tork - Vikipedi. Available at: http://tr.wikipedia.org/wiki/Tork [Erişim: 03.02.2015].

Wind Turbine Fields . Available at: http://7-themes.com/7034160-wind-turbine-fields.html [Erişim: 04.02.2015].

Yusufçuk - Vikipedi. Available at: http://tr.wikipedia.org/wiki/Yusuf%C3%A7uk [Erişim: 09.02.2015].

ASCE Standards, ASCE/SEI 7-10, 2010, Minimum design loads for buildings and other structures.

Bar-Cohen, Y., 2006, Biomimetics-Using nature to inspire human innovation, Bioinspiration & Biomimetics, 1(1), pp.P1–P12.

Buckney, N. et al., 2013, Structural efficiency of a wind turbine blade, Thin-Walled Structures, 67, pp.144–154.

Burton, T. et al., 2011, Wind energy handbook,

Cencelli, N., Bakstrom, T. Von and Denton, T., 2006, Aerodynamic optimisation of a small-scale wind turbine blade for low windspeed conditions, M.Sc. Thesis.

Chikofsky, E.J., 1990, Reverse engineering and design recovery: A taxonomy in IEEE software, IEEE Computer Society, pp.13 – 17.

Combes, S. and Daniel, T., 2005, Flexural stiffness in insect wings: effects of wing venation and stiffness distribution on passive bending, American Entomologist, pp.2–4.

Fleck, G. and Bechly, G., 2003, Phylogeny and classification of the Stenophlebioptera (Odonata: Epiproctophora). Annales de la Sociétée, 39(1), pp.55–93.

Gürsel, K., Çoban T. ve Özdamar A., Rüzgar Türbini Pervane Kanadının Titreşim Analizi, Emo.Org.Tr, Pp.3–14.

H. Çağlayan, İ., Rezonans: Makinalarin ve Yapilarin Gizli Düşmanı, Mühendis ve Makina, Cilt 50, Sayi 598, pp.55–60.

McCosker, J., 2012, Design and Optimization of a Small Wind Turbine, M.Sc. Thesis.

Mingallon, M. and Ramaswamy, S., 2011, The Architecture of the Dragonfly Wing: A Study of the Structural and Fluid Dynamic Capabilities of the Anisoptera's Forewing, ASME 2011, pp.1–8.

Nurbay, N. & Çınar, A., 2005, Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması. III. Yenilenebilir Enerji. Kaynakları, pp.1976–1980.

Projesi, B., Avcı, B. & Yılmaz, T., 2012, Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı Ve Analizi

Renewable UK, 2013, Generate Your Own Power.

Renewable UK, 2013, Small and Medium Wind UK Market Report.

Schmitt O. H., 1969, Some Interesting and Useful Biomimetic Transforms, Proceeding, Third International Biophysics Congress, Boston, Mass., Aug. 29-Sept. 3,1969, p.297. , p.p.297.

Schubel, P.J. and Crossley, R.J., 2012. Wind Turbine Blade Design. *Energies*, 5(12), pp.3425–3449.

Sun, J. and Bhushan, B., 2012, The structure and mechanical properties of dragonfly wings and their role on flyability, Comptes Rendus Mécanique, 340(1-2), pp.3–17.

Sunada, S., Zeng, L. and Kawachi, K., 1998, The relationship between dragonfly wing structure and torsional deformation, Journal of Theoretical Biology, pp.39–45.

Thompson, D.W., 1942, On growth and form.

Thorstensson, E., 2009, Small-scale wind turbines: introductory market study for Swedish conditions.

Vanderplaats, G., 2006, Structural optimization for statics, dynamics and beyond, Journal of the Brazilian Society of Mechanical, XXVIII(3), pp.316–322.