

YATAY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KANAT PROFİL TASARIMI VE ÜRETİM ESASLARI

Kadir Kaya*

Arş. Gör.,

Ondokuz Mayıs Üniversitesi,
Makina Mühendisliği Bölümü, Samsun
kadir.kaya@omu.edu.tr

Erdem Koç

Prof. Dr.,

Ondokuz Mayıs Üniversitesi,
Makina Mühendisliği Bölümü, Samsun
erdemkoc@omu.edu.tr

ÖZ

Bu çalışmada, günümüzde yaygın olarak kullanılan yatay eksenli rüzgâr türbinleri, rüzgâr türbin kanatları, kanat profili ve kanatların özellikleri incelenmiştir. Ayrıca kanatların imalatında kullanılan malzemeler ile imalat yöntemleri araştırılmış ve yatay eksenli rüzgâr türbin kanatları hakkında genel değerlendirme yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr enerjisi, yatay eksenli rüzgâr türbinleri, kanat profil tasarımı ve üretimi

BLADE PROFILE DESIGN AND MANUFACTURING PRINCIPLES OF HORIZONTAL AXIS WIND TURBINES

ABSTRACT

In this study, horizontal axis wind turbines being commonly used nowadays, blades, blade profiles and blade properties were examined. Moreover blade manufacturing methods and materials were investigated and a general evaluation about wind turbine blades has been conducted.

Keywords: Wind energy, horizontal axis wind turbines, blade profile design and manufacturing

* İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 10.07.2015

Kabul tarihi : 05.10.2015

Kaya, K., Koç., E. 2015. "Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Kanat Profil Tasarımı ve Üretim Esasları," Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 670, s. 38-48.

1. GİRİŞ

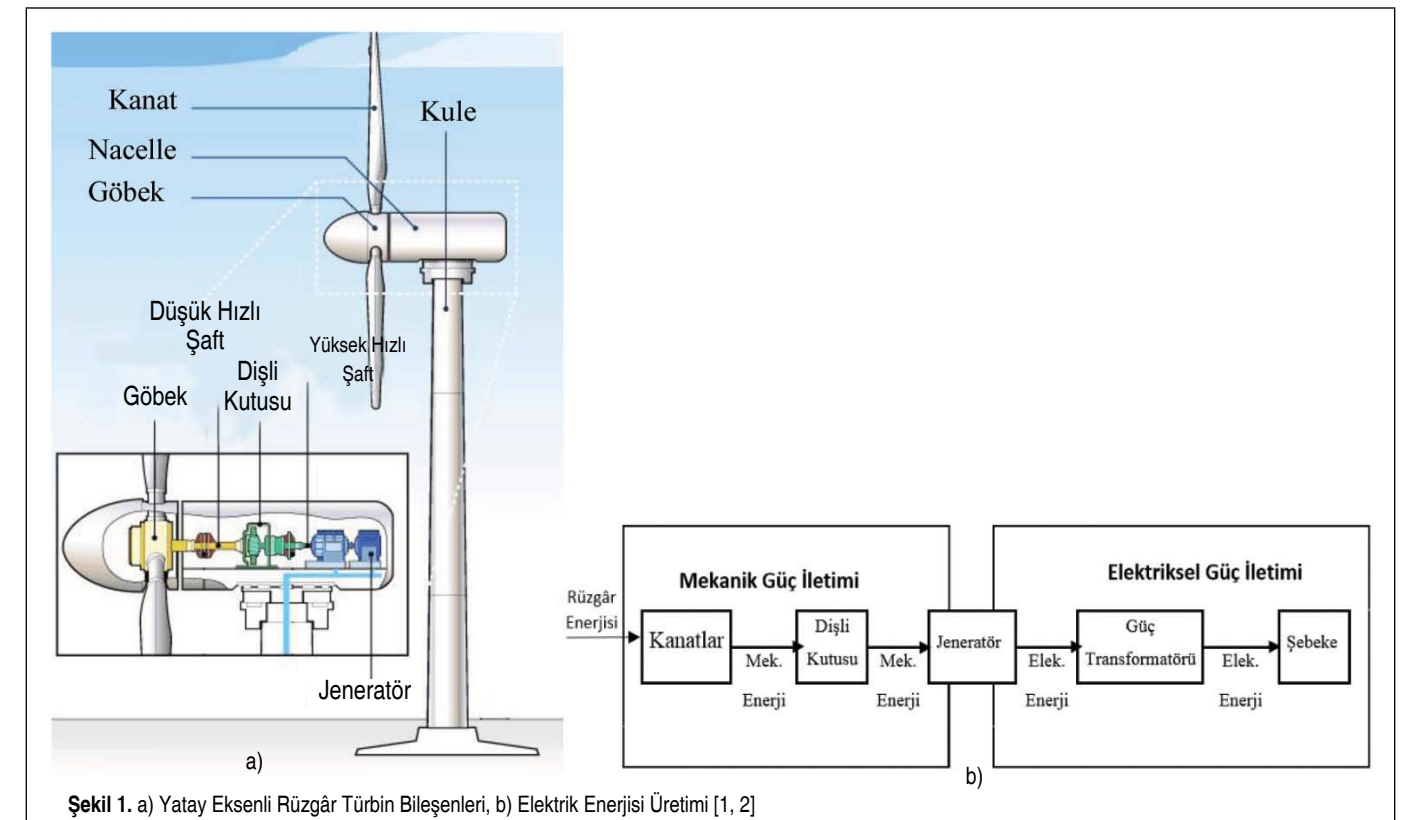
Rüzgâr enerjisi, güneş radyasyonunun yer yüzeyini farklı ısıtmasından kaynaklanmaktadır. Bu ısınma farkı denizler ve kara arasında bir basınç farkının oluşmasına yol açmakta ve bu basınç farkı da havanın hareketine neden olmaktadır. Yüksek basınçtan alçak basınca doğru olan havanın hareketi rüzgâr olarak tanımlanmaktadır. Rüzgâr enerjisi, mekanik enerji veya elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılmaktadır.

Rüzgâr türbinleri, dönme eksenine göre, yatay ve düşey eksenli olarak sınıflandırılmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yatay eksenli rüzgâr türbinleri, genel olarak kule, jeneratör, dişli kutusu, göbek, elektrik-elektronik elemanlar ve kanattan oluşmaktadır (Şekil 1a). Elektrik enerjisi üretimi amacıyla kullanılan modern rüzgâr türbinlerinin çalışma prensibi, genel olarak kinetik enerji, mekanik enerji ve elektrik enerjisi döngüsüne dayanmaktadır. Buna göre, rüzgârın kinetik enerjisi, kanatlar yardımıyla alınıp mekanik enerjiye dönüştürülerek düşük hızlı şafta iletilmektedir. Düşük hızlı şafta gelen mekanik enerji, dişli kutusu yardımıyla dönüş hızı artırılıp momenti azaltılarak yüksek hızlı şafta, oradan da jeneratöre iletilmektedir. Jeneratör ünitesinde ise mekanik enerji, elektrik enerjisine dönüştürülerek şebekeye iletilmektedir (Şekil 1b) [1].

Modern rüzgâr türbin kanatlarının tasarımında aerodinamik

ve mekanik bazı özellikler dikkate alınmaktadır. Kanadın aerodinamik özellikleri türbinden elde edilecek güç miktarını; mekanik özellikleri ise türbin elemanlarının mekanik davranışını etkilemektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yatay eksenli rüzgâr türbinleri ticari ürünler olduğundan yatay eksenli rüzgâr türbin kanatları ile ilgili bilgiler sınırlıdır. Kanat tasarım bilgileri, geçmiş yıllarda yürütülen DOWEC (Hollanda deniz üstü rüzgâr enerjisi dönüştürücüsü), Upwind (AB'nin rüzgâr enerjisi araştırma-geliştirme projesi) gibi projelerden ve DOE/NREL (ABD enerji departmanı/Ülusal yenilenebilir enerji laboratuvarı), Sandia laboratuvarları (ABD enerji departmanının araştırma-geliştirme laboratuvarları) tarafından yürütülen çalışmalardan elde edilmektedir.

DOWEC, büyük boyutlu ve ekonomik deniz üstü rüzgâr santrali geliştirilmesi amacıyla yürütülmüştür. Bu proje ile 64,5 m uzunluğunda rüzgâr türbin kanadı tasarlanarak, kanadın profil veter hattı uzunlukları, profil yerleşimleri ile kanadın geometrik ve rijitlik özellikleri belirlenmiştir [3]. NREL tarafından yürütülen çalışmada, 5 MW'lık bir rüzgâr türbini için kule, kanatlar, nacelle, güç iletim ve türbin kontrol mekanizmasını içeren aeroelastik bir model geliştirilerek kanadın yapısal ve aerodinamik özellikleri değerlendirilmiştir [4]. Upwind projesi, 20 MW'lık ekonomik bir rüzgâr türbini geliştirilmesi projesidir [5]. Sandia çalışmasında, büyük boyutlardaki kanatların iyi ve kötü yönleri araştırılmış olup, 100 m'lik bir kanadın tasarımı yapılarak kanadın geometrik ve malzeme özellikleri



belirlenmiştir [6]. Yürütülen başka bir çalışmada ise rüzgâr türbin kanatlarının tasarım metodolojisi değerlendirilerek 2 MW'lık bir kanadın tasarımı yapılmış olup, tasarlanan kanadın akışkan-yapı etkileşim analiziyle kanadın farklı rüzgâr hızlarındaki aerodinamik performansı ve mekanik davranışı incelenmiştir [7].

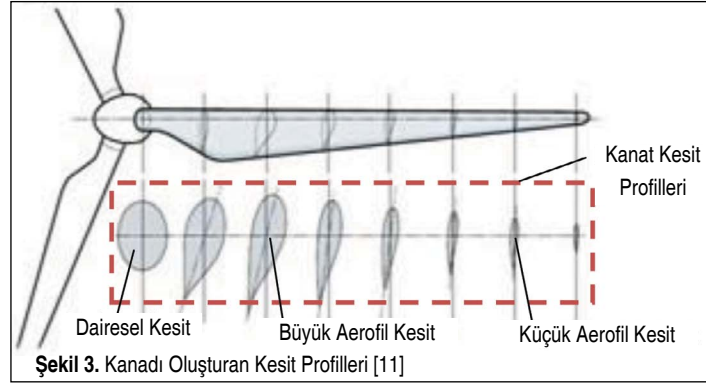
Günümüzde yaygın olarak yatay eksenli 3 kanatlı rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yatay eksenli rüzgâr türbinleri ve rüzgâr türbin kanadı, kanadın imalat yöntemleri ve kanat tasarımında kullanılan malzemeler hakkında genel bir değerlendirme yapılmıştır.

2. RÜZGÂR TÜRBİN KANATLARI

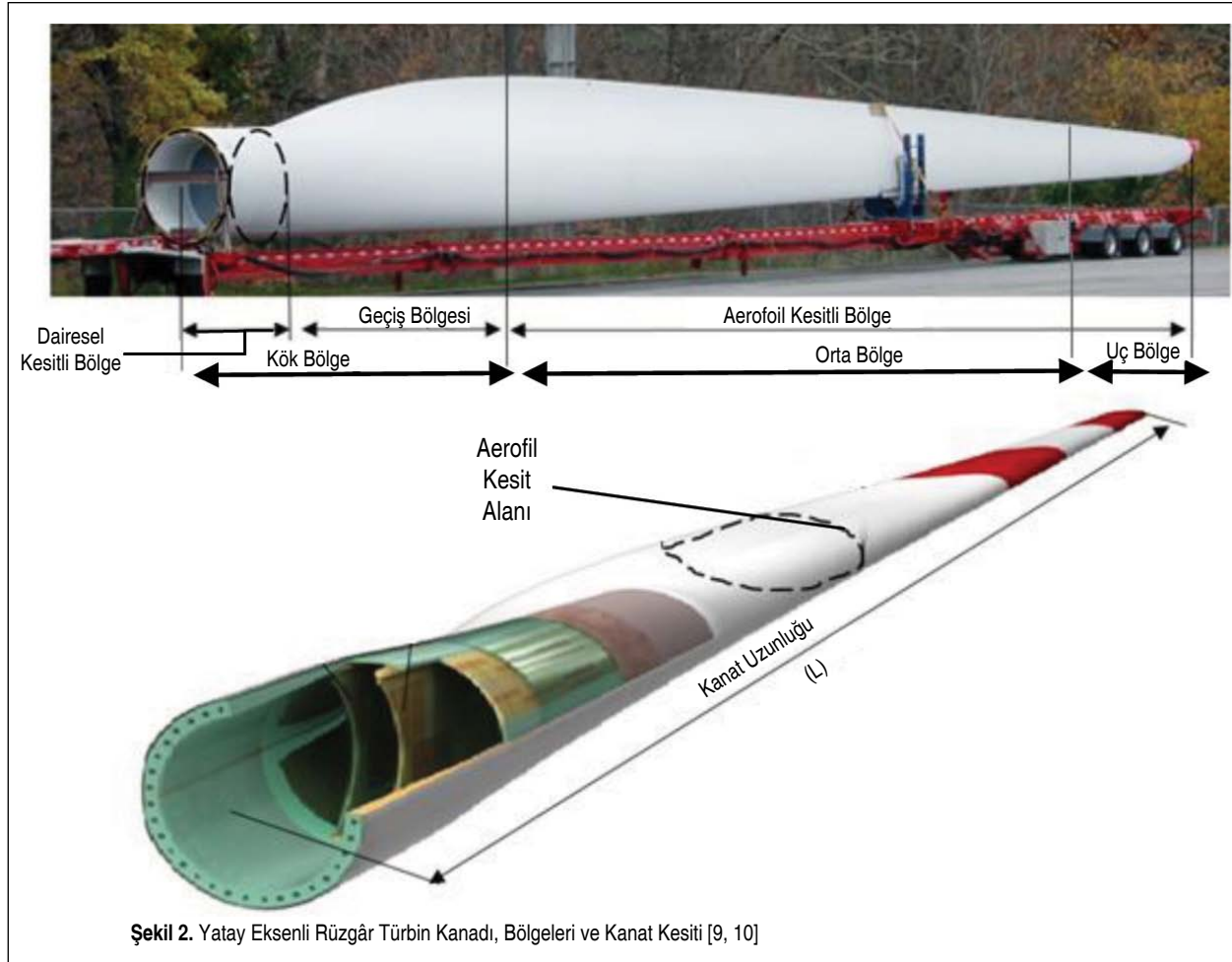
Rüzgâr türbin kanatları, rüzgârın kinetik enerjisini alıp mekanik enerjiye dönüştürerek şafta ileten bileşendir. Rüzgâr türbin kanatları aerodinamik ve yapısal fonksiyonuna göre, kök bölge, orta bölge ve uç bölge olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır (Şekil 2). Kanat kök bölgesi, kanat bağlantı noktası ile kanadın aerofoil (kanat profili) şeklini aldığı kısım arasında kalan bölge olup, kanadın en fazla zorlanmaya maruz kalan bölgesidir. Bu kısmın başlarında kanat dairesel bir kesit

alanına sahiptir. Kanat orta bölgesi, kanadın güç üretiminde en önemli bölge olup, bu kısmın tasarımında aerodinamik parametreler göz önünde bulundurulmaktadır. Kanat uç bölgesi ise kanadın narın bir tasarıma sahip olup, güç üretimi için kritik bir bölgedir [8].

Modern rüzgâr türbinlerinde kanat, farklı büyüklüklerde dairesel kesitli kısımlar ve aerofoil kesitli kısımlardan oluşmaktadır. Kanat, kök kısmından uç kısmına doğru dairesel kesitten büyük aerofoil kesite, daha sonra ise küçük aerofoil kesite



Şekil 3. Kanadı Oluşturan Kesit Profilleri [11]



Şekil 2. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Kanadı, Bölgeleri ve Kanat Kesiti [9, 10]

doğru değişim göstermektedir. Şekil 3'te, 3 kanatlı bir rüzgâr türbininde kanadı oluşturan dairesel ve aerofoil profiller gösterilmiştir.

2.1 Kanat Profili (Aerofoil)

Rüzgâr türbin kanatlarında kullanılan aerofoil bir kiriş hattı üzerinde ve altında tanımlanmış 2 özel eğrinin birleşiminden oluşmaktadır. Bu eğrilerden üst eğrinin eğrilik yarıçapının alt eğrininkinden küçük olması, kamburluk olarak tanımlanmaktadır. Kamburluk, kanadın her iki yüzeyinde farklı akış hızlarının oluşmasını sağlamaktadır. Kanat yüzeylerindeki farklı akış hızları, kanadın üst ve alt yüzeyi arasında basınç farkı ortaya çıkararak kanadın alt kısmından üst kısmına doğru

ru kaldırma veya taşıma kuvveti olarak tanımlanan kuvveti oluşturmaktadır. Bu kuvvet, rüzgâr türbininden enerji elde edilmesini sağlayan kuvvettir. Şekil 4'te, havanın aerofoil etrafındaki hareketi ve kaldırma kuvveti oluşumu şematik olarak gösterilmiştir.

Rüzgâr türbinlerinde Delft Teknoloji Üniversitesinin DU, ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarının SERI, İsveç Havacılık Araştırmaları Kurumunun FFA-W, Althaus ve Wortmann tarafından geliştirilen FX, Danimarka Riso Ulusal Laboratuvarının RISO ve ABD Ulusal Havacılık ve Danışma Komitesinin NACA aerofoilleri kullanılmaktadır [12].

Bu profillerden günümüzde en yaygın kullanılanı ise aerofoil NACA'dır. Tipik bir NACA aerofoili ve temel büyüklükleri

Şekil 5'te verilmiştir. NACA aerofoil serisi; aerofoil veter uzunluğu (c), maksimum kamburluk (f), maksimum kamburluğun konumu (x_c), maksimum kalınlık (d), maksimum kalınlığın konumu (x_d), aerofoil hücum kenarının eğrilik yarıçapı (r_n), aerofoil üst eğri formu $y_u(x)$ ve aerofoil alt eğri formu $y_a(x)$ ile karakterize edilmektedir.

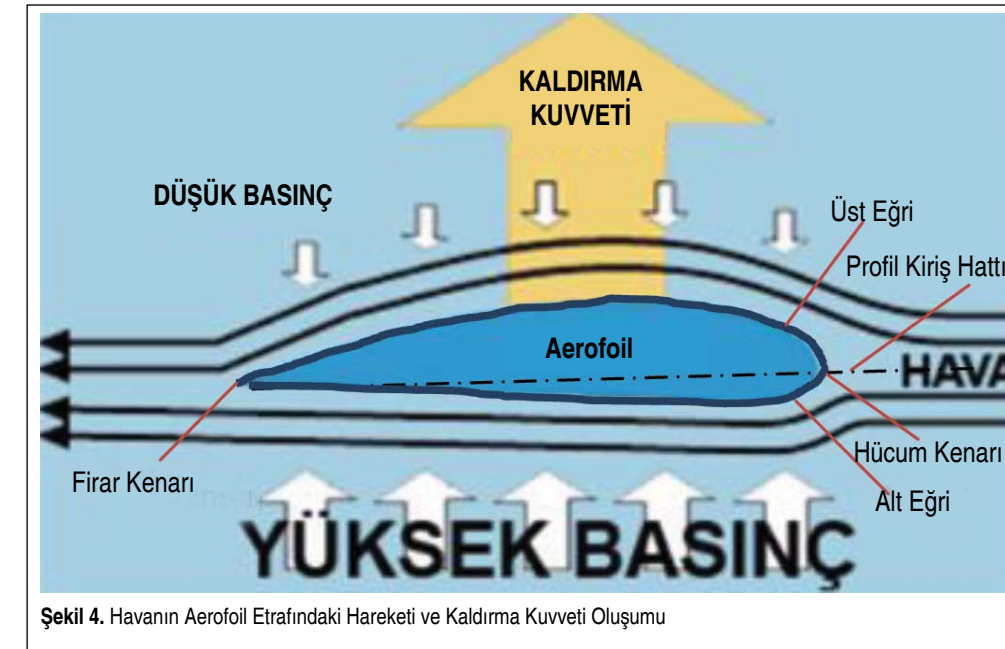
Bu aerofoilde boyutsuz maksimum kamburluk oranı (\bar{f}) ve boyutsuz maksimum kalınlık oranı (\bar{d}) sırasıyla;

$$\bar{f} = \frac{f}{c} \quad (1)$$

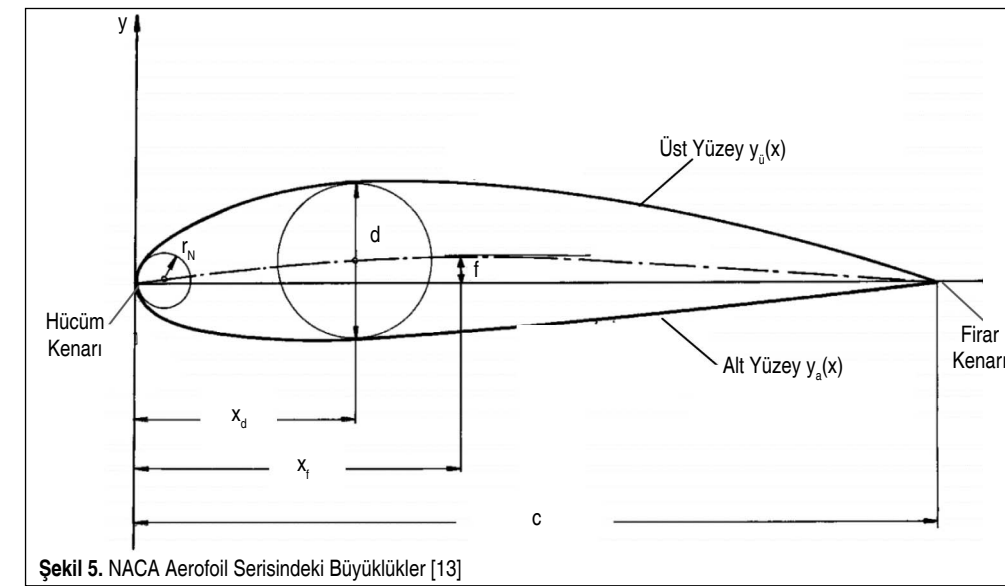
$$\bar{d} = \frac{d}{c} \quad (2)$$

şeklinde tanımlanmaktadır [1].

NACA aerofoil kodları genel olarak çok basamaklı sayılar kullanılarak ifade edilmektedir (NACA 0008, NACA4415 vb.). Buradaki her bir sayının özel bir anlamı vardır. Bunlardan birinci sayı, yüzde olarak maksimum kamburluk oranını (\bar{f}) ikinci sayı, on katının yüzde olarak maksimum kamburluğun hücum kenarından itibaren konumunu; üçüncü ve dördüncü sayı ise yüzde olarak maksimum kalınlık oranını göstermektedir [1]. Tablo 1'de



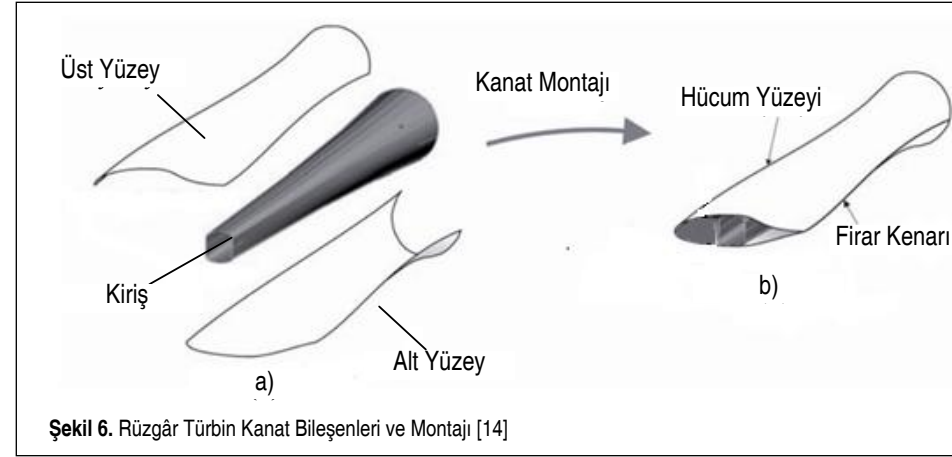
Şekil 4. Havanın Aerofoil Etrafındaki Hareketi ve Kaldırma Kuvveti Oluşumu



Şekil 5. NACA Aerofoil Serisindeki Büyüklükler [13]

Tablo 1. Çeşitli NACA Aerofoil Kodları

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



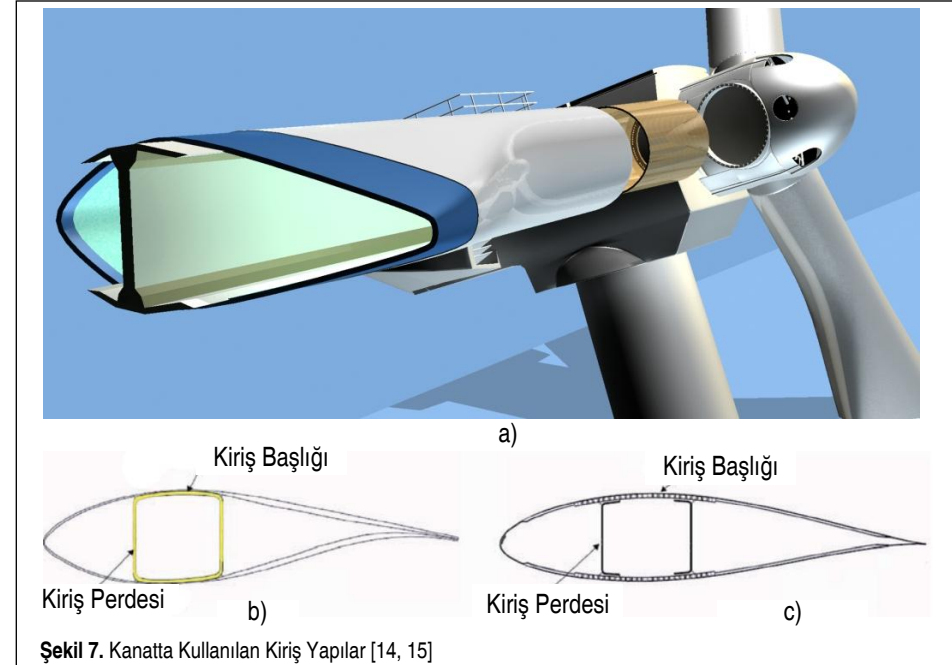
Şekil 6. Rüzgâr Türbin Kanat Bileşenleri ve Montajı [14]

NACA 0008, NACA 2415 ve NACA 4415 aerofoil kodları verilmiştir.

2.2 Kanat Bileşenleri

Günümüzde yaygın olarak kullanılan modern rüzgâr türbinlerinde kanat, dış yapı (kabuk yapı) ve kiriş olmak üzere iki bileşenden meydana gelmektedir. Bu bileşenlerden dış yapı, kanat veya palanın aerodinamik formunu oluşturmakta olup, üst yüzey ve alt yüzey olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Kiriş ise kanadın maruz kalman yüklerle karşı dayanımını sağlamaktadır. Şekil 6'da, kanadı oluşturan bileşenler ve kanat montajı şematik olarak gösterilmiştir.

Kanat kirişi, dış yapıdan aldığı yükleri göbeğine ileten eleman olup, kanadın dayanımını arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Kirişteki düşey eleman, kiriş perdesi ve yatay eleman ise kiriş başlığı olarak isimlendirilmektedir. Kanat kirişi, kanadın rotora bağlantı noktasına yakın bir konumdan başlayıp kanadın uç noktasına kadar uzanmaktadır. Bu bileşen, kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan yüklerle rüzgâr kaynaklı yüklerle maruz kalmaktadır. Rüzgâr türbin kanatlarında kiriş yapı olarak genellikle dikdörtgen kiriş ve I kiriş kullanılmaktadır. Şekil 7a'da, kana-

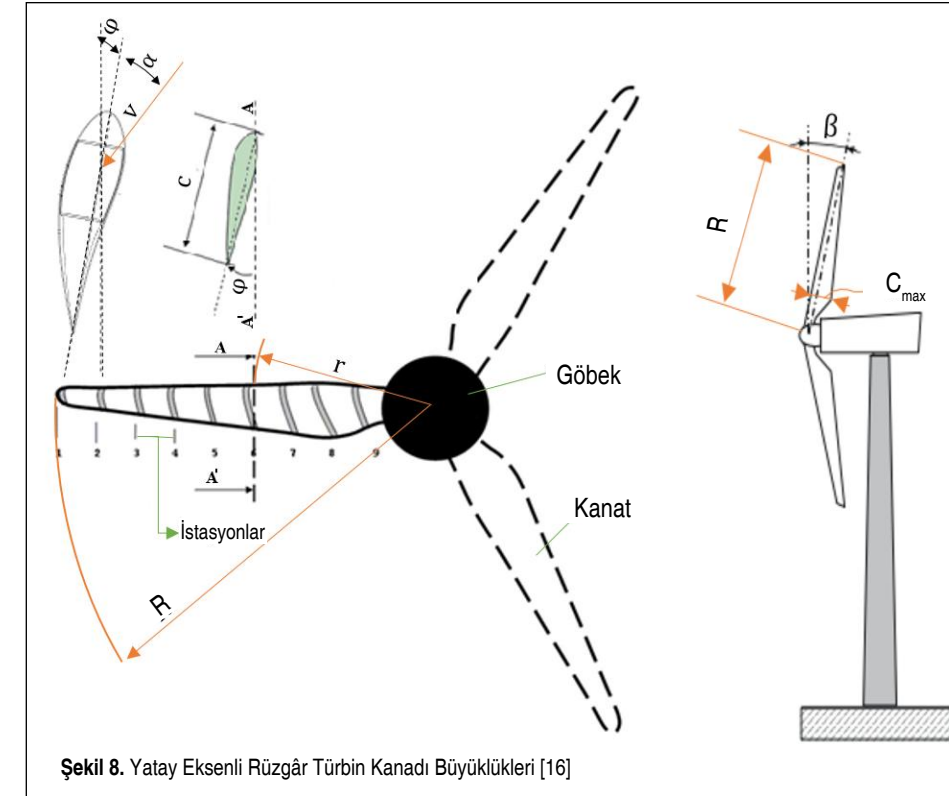


Şekil 7. Kanatta Kullanılan Kiriş Yapılar [14, 15]

dın yapısında kullanılan bir I kiriş elemanı; Şekil 7b ve 7c'de ise sırasıyla, kanat kesiti üzerinde kullanılan dikdörtgen kiriş ve I kiriş gösterilmektedir.

3. KANAT KATI MODELLENMESİ

Katı model, bir parçanın geometrik modelini tanımlamak için gerekli olan kafes ve yüzey geometrisini ifade etmektedir. Bu çalışmada, yatay eksenli üç kanatlı rüzgâr türbinleri için kanat katı modellenmesi ele alınıp kanat tasarım parametreleri belirlenerek ANSYS Workbench yazılımında 2 MW'lık bir rüzgâr türbin kanadının katı modeli oluşturulmuştur.



Şekil 8. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Kanadı Büyüklükleri [16]

Kanadın katı modelinin oluşturulması için nominal güç (N_n), nominal açısal hız (ω_n), koniklik açısı (β), uç-hız oranı (λ), kanadı dilimlere ayıran istasyon sayısı ile bu istasyonlardaki aerofoilin profil uzunluğu (c) ve hatve açıları (ϕ) gibi kanadın tasarım parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 8'de, tipik bir kanatta kullanılan istasyon noktaları ile kanat üzerinden alınan AA kesiti ve yatay eksenli bir rüzgâr türbininde kanat katı modellenmesinde kullanılan temel parametreler şematik olarak gösterilmiştir.

Kanadın, belirlenen istasyonlardaki hatve açısı (ϕ) ile veter boyu (c) sırasıyla;

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

$$c = \frac{8 * \pi * R * \sin \phi}{3 * B * C_L * \lambda} \quad (4)$$

denklemlerinden yararlanılarak belirlenmektedir. Burada r , kanat elemanın kanat kök kısmına olan uzaklığı; α , hücum açısı; λ , uç-hız oranı; R , rotor yarıçapı; B , kanat sayısı ve C_L , kaldırma kuvveti katsayısıdır [17].

Bu çalışmada, örnek olarak yatay eksenli 3 kanatlı bir rüzgâr türbinine ait 2 MW'lık bir kanadın katı modeli oluşturulmuş-

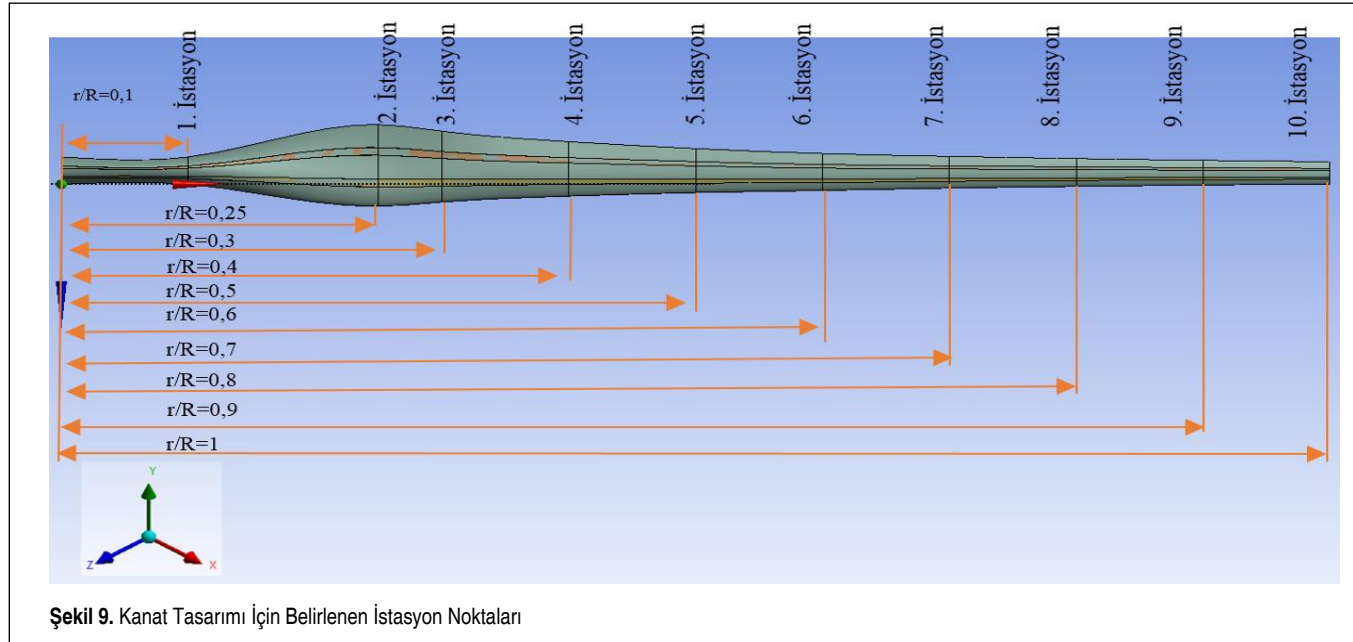
Tablo 2. D49 Kanadının Teknik Özellikleri [18]

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

tur. Bu amaçla, Blade Dynamics firmasının D49 kanadı katalog bilgilerinden yararlanılmış olup, bu büyüklükler Tablo 2'de verilmiştir. Bu çalışmada, kanat uzunluğu (L), rotor yarıçapı (R) olarak alınmıştır.

Kanadın 10 istasyon noktasından oluştuğu kabul edilmiş olup, bu noktalar Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu çalışmada, istasyon noktaları olarak kanat uzunluğunun %10, %25, %30, %40, %50, %60, %70, %80, %90, %100'ü belirlenmiştir.

Kanadın katı modelinin oluşturulması amacıyla, tablodaki katalog bilgileri ile denklem 3 ve 4'ten yararlanılarak istasyon noktalarındaki profil uzunlukları (c) ve hatve açıları (ϕ) belirlenmiş ve Tablo 3'te verilmiştir. Belirlenen aerofoil profil uzunluğu (c) ile hatve açıları (ϕ) kanat uzunluğu boyunca azaldığı görülmektedir.



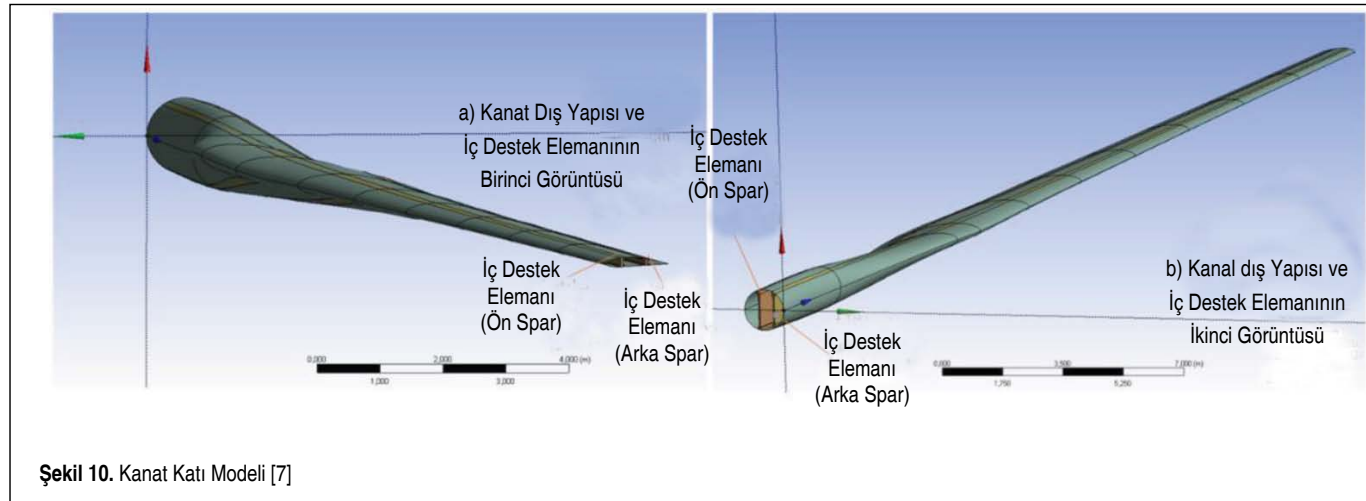
Şekil 9. Kanat Tasarımı İçin Belirlenen İstasyon Noktaları

Tablo 3. Modellenen Kanadın Tasarım Parametreleri [7]

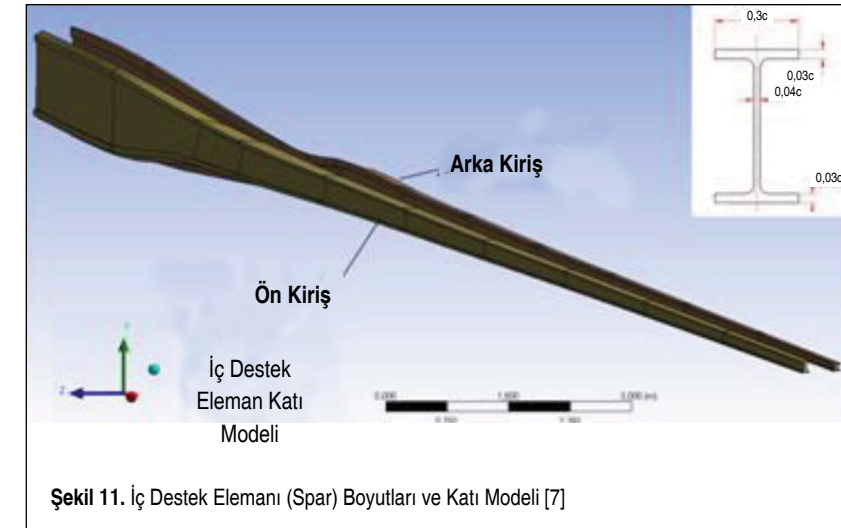
Profil İstasyonu	r/R	r	Hatve Açısı φ (°)	Profil Uzunluğu c (m)
2	0,25	12,1575	15,84	3,7284
3	0,3	14,589	9,24	3,1556
4	0,4	19,452	6,00	2,4057
5	0,5	24,315	4,02	1,9383
6	0,6	29,178	2,68	1,6230
7	0,7	34,041	1,73	1,3943
8	0,8	38,904	1,01	1,2225
9	0,9	43,767	0,45	1,0873
10	1	48,63	0,00	0,9786

2 MW'lık kanadı oluşturan istasyon noktaları ile yukarıdaki büyüklükler kullanılarak oluşturulan kanat katı modeli Şekil 10'da verilmiştir. Şekildeki kanat katı modeli, 48,63 m uzunluğunda olup, dış yapı ve iç destek elemanlarından oluşmaktadır. Burada kanat, kök kısmından başlayarak 4,863 m ($r/R=0,1$) uzunluğa kadar dairesel kesite, 4,863 m uzunluktan 12,1575 m uzunluğa kadar geçiş kesitine (dairesel kesitten aerofoil kesite geçiş), 12,1575 m'den kanat ucuna (48,63 m) kadar aerofoil kesite sahiptir. Kanat katı modeli, aerofoil kesitin başladığı noktada (12,1575 m) 15,84°'lik hatve açısına sahiptir. Bu açı, kanat ucuna doğru giderek azalmakta ve en uçtaki istasyonda 0°'dir.

Şekildeki kanat katı modelinde iç destek elemanı (spar) olarak I kirişler kullanılmış olup, iç destek elemanının katı modeli Şekil 11'de verilmiştir. İç destek elemanlarının konumu ve boyutları literatürdeki çalışmalardan yararlanılarak be-



Şekil 10. Kanat Katı Modeli [7]



Şekil 11. İç Destek Elemanı (Spar) Boyutları ve Katı Modeli [7]

Tablo 4. Rüzgâr Türbin Kanat Malzemelerin Rijitlik ve Mukavemet Parametreleri [21, 22]

	Özgül Ağırlık (γ) g/cm^3	Kopma Mukavemeti (σ_k) N/mm^2	Elastiklik Modülü (E) kN/mm^2	Yorulma Mukavemeti $\pm \sigma_A$ $10^7 N/mm^2$
Çelik (St52)	7,85	520	210	60
Alüminyum Alaşımı (AlZnMgCu)	2,7	480	70	40
Alüminyum Alaşımı (AlMg ₂)	2,7	236	70	20
Cam Elyaf/Epoksi Kompozit	1,7	420	15	35
Karbon Elyaf/Epoksi Kompozit	1,4	550	44	100
Ağaç (Sitka Spruce)	0,38	≈ 65	≈ 8	≈ 20

lirlenmiştir [14, 19, 20]. Bu çalışmada, iç destek elemanları aerofoilin 0.25c ve 0.65c'lik profil uzunluklarında konumlandırılmıştır. İç destek elemanlarının boyutları ise profil uzunluğuna bağlı olarak değişmekte olup, Şekil 11'de verilmiştir.

4. KANAT TASARIMINDA KULLANILAN MALZEMELER

Rüzgâr türbin kanadının tasarımı için önemli olan parametrelerden biri de kanat malzemesidir. Rüzgâr türbin kanat malzemelerinin;

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

istenmektedir. Rüzgâr türbin kanatlarında genel olarak çelik, alüminyum, cam veya karbon takviyeli kompozit malzemeler ile ağaç kullanılmaktadır. Günümüzde küçük boyutlardaki

rüzgâr türbin kanatlarında çelik ve alüminyum, modern rüzgâr türbin kanatlarında ise cam fiber ve karbon fiber kompozitler yaygın olarak kullanılmaktadır. Rüzgâr türbin kanatlarında kullanılan bazı malzemelerin bazı mekanik özellikleri Tablo 4'te verilmiştir. Tablodan rüzgâr türbin kanadı imalatı için en uygun malzemelerin kompozitler olduğu görülmektedir.

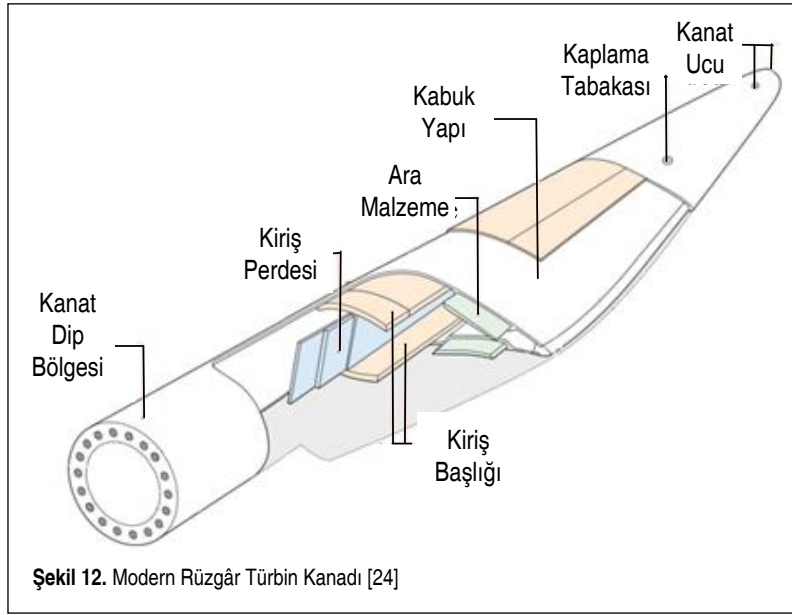
Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla malzemenin makroskobik düzeyde birleşimi olarak tanımlanmaktadır. Kompozit malzemelerin geliştirilmesindeki amaç, yapıyı oluşturan malzemelerin kompozit yapı öncesinde sahip olmadığı özelliklerin bu malzemeleri birleştirerek elde edilmesidir. Kompozit malzemeler, matris ve takviye malzemesi olmak üzere en az iki farklı malzemenin birleşiminden oluşmaktadır. Takviye malzemeler yapıya gelen yükleri taşıyıcı görev üstlenmekte olup, etrafında bulunan matris yapı ise takviye elemanları bir arada tutmaya, onları desteklemeye yaramakta ve dış etkilerden korumaktadır.

Kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak elyaflar kullanılmaktadır. Rüzgâr türbin kanatlarında ekonomik olması ve istenilen özellikleri sağlaması nedeniyle cam elyaf (E-Cam) tercih edilmektedir. Karbon elyaf ise yalnız veya karbon elyaf, cam elyaf hibrit yapı şeklinde büyük boyutlardaki rüzgâr türbinlerinde kullanılmaya başlanmıştır [21].

Kompozit malzemelerde yük taşıyan takviye elemanlarının fonksiyonlarını yerine getirmeleri için matris malzemelerinden yararlanılmakta olup, matris malzeme takviye malzemesine göre düşük mukavemetli ve esnekler. Rüzgâr türbin kanatlarında üstün mekanik özellikleri, korozyon dayanımları, elektriksel özellikleri ve yüksek sıcaklıklara dayanım gibi özellikleri nedeniyle epoksi reçineler tercih edilmektedir [23].

Modern rüzgâr türbin kanatlarında ayrıca sandviç kompozitler de kullanılmaktadır. Sandviç kompozitlerde matris ve takviye malzemelerinin yanında, ara (core) malzemeler de kullanılmakta olup, bu malzemeler kanadın eğilme dayanımını ve rijitliğini arttırmaktadır. Sandviç yapılarda ara malzeme olarak PVC veya PET köpük ile balsa ağacı kullanılmaktadır [23].

Modern rüzgâr türbin kanatlarında (Şekil 12), kanat kök bölgesi ile kanat dış yapısı cam elyaf ya da karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerden, iç destek yapı olarak bilinen kiriş perdesi ile kiriş başlığı ise sandviç kompozit malzemelerden imal edilmektedir. Kanatta kullanılan sand-



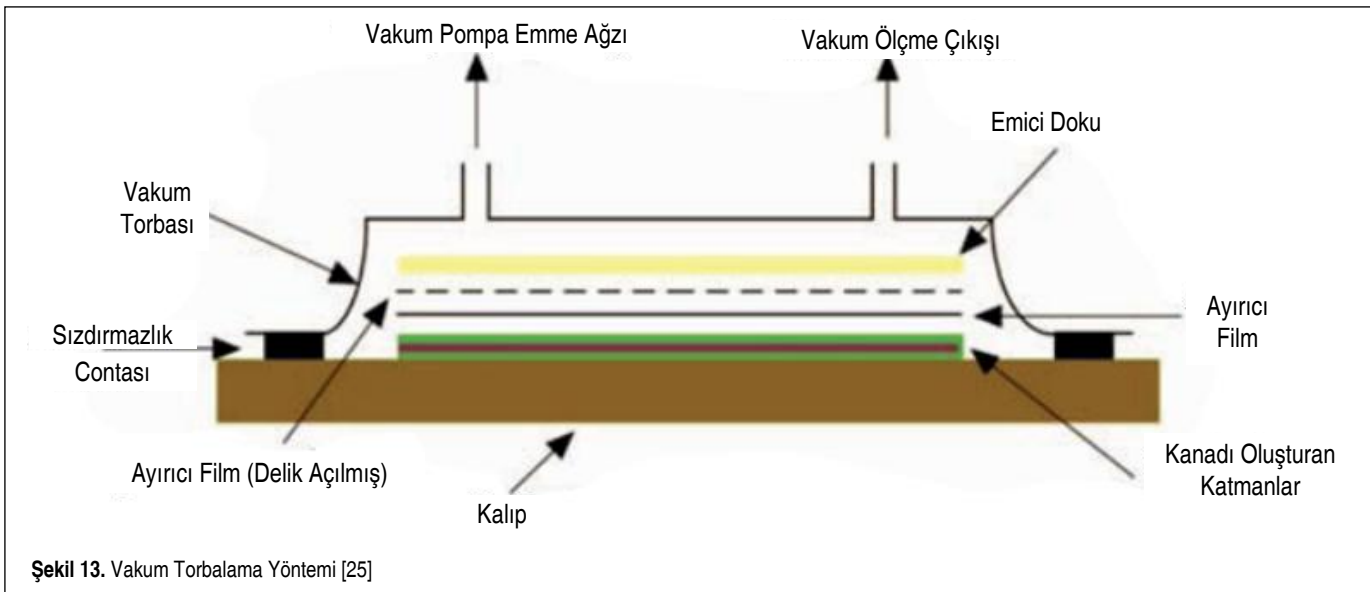
Şekil 12. Modern Rüzgâr Türbin Kanadı [24]

sonucu, aşağıda, kısaca izah edilen el yatırma, vakum torbalama ve vakum infüzyon yöntemleri geliştirilmiştir.

5.1 El Yatırma Yöntemi

Kompozit malzemelerin temel imalat yöntemlerinden biri olan el yatırma yöntemi, takviye malzemenin kalıplara yatırılıp kalıp üzerine sıvı reçine uygulanması şeklindedir [23].

Bu yöntemde ilk olarak, hazırlanan kanat kalıbına kaplama tabakası sprey tabancası, fırça ya da rulo ile uygulanır. Kaplama tabakası yeterince sertleştiğinde üzerine takviye malzemesi, takviye malzemesinin üzerine ise reçine uygulanır. Daha sonra, bir rulo ile reçinenin takviye malzemesi üzerine iyice yayılması ve reçinenin takviye tabakasına daha iyi nüfuz etmesi sağlanır. Takviye elemanı ve reçine arasında



Şekil 13. Vakum Torbalama Yöntemi [25]

viç kompozit malzemelerde en üst tabakadan en alt tabakaya doğru sırasıyla, cam ya da karbon elyaf takviyeli kompozit, ara (çekirdek) malzeme (balsa ağacı ya da köpük) ve cam ya da karbon elyaf takviyeli kompozit malzeme bulunmaktadır. Ayrıca kanadın en dış kısmında poliüretan boya ya da jel coat kaplama tabakası bulunmaktadır.

5. KANAT İMALATI

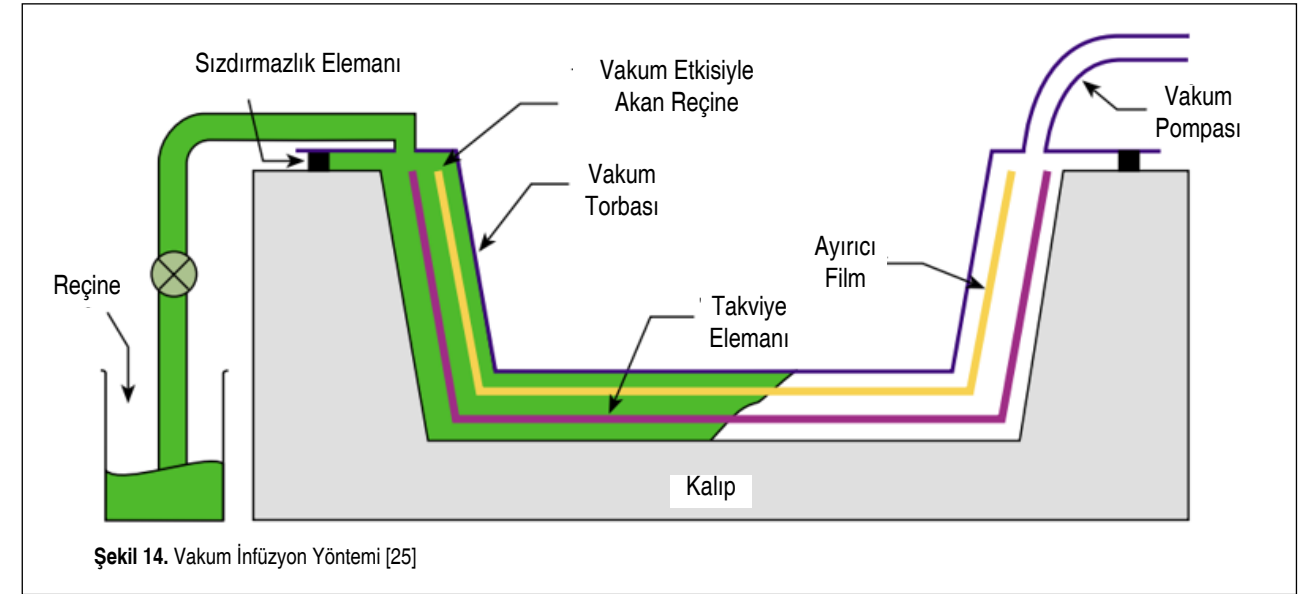
Kanadın imalatında ilk olarak, bir kanat kalıbı hazırlanır ve aşağıdaki üretim yöntemlerinden biri kullanılarak kanat dış yapısı (kabuk yapı) imal edilir. Dış yapı ile destek yapı (kiriş eleman) uygun yapıştırıcılar kullanılarak birleştirilir ve kanadın imalatı tamamlanır. Rüzgâr türbin kanadı imalatında açık kalıp yöntemi ilk zamanlar kullanılırken, yapılan çalışmalar

boşluk kalmaması için reçine yeterli sertliğe ulaşana kadar rulolama işlemine devam edilir. Kanat üst ve alt dış yapıları bu işlem tekrarlanarak elde edilir.

Bu metodun olumsuz yanlarından biri, çalışanların alerjik rahatsızlıklara neden olmasıdır. Bu nedenle, bu yöntemin kullanıldığı yerlerde gelişmiş havalandırma sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu metodun diğer bir dezavantajı ise üretilen mamulün kalitesinin çalışanın el becerisine bağlı olmasıdır [14].

5.2 Vakum Torbalama Yöntemi

Bu teknolojiye el yatırma yönteminden farklı olarak, reçine kalıp yüzeyine serildikten sonra, reçine reaksiyonu hızlanıp jelleşme kıvamına gelmeden önce, kalıp iç kısmı sıcaklığa ve



Şekil 14. Vakum İnfüzyon Yöntemi [25]

basınca dayanıklı vakum torbası ile kapatılarak sızdırmazlığın sağlanmasının ardından sisteme vakum uygulanır (Şekil 13). Bu vakumlama işleminin amacı, el yatırma yöntemiyle üründen alınamayan hava kabarcıklarının vakum vasıtasıyla uzaklaştırılması ve reçinenin lifler arasında daha kolay nüfuz etmesidir. [23].

Bu yöntem ile kaliteli bir ürün elde etmek için ürün tamamen sertleşene kadar vakum işlemi sürdürülmelidir. Bu işlem gerçekleştirilirken, sağlık açısından zararlı olabilecek uçucu maddelerin solunmasını engelleyen kapalı bir ortam oluşturulmaktadır. Bu yöntemin tek dezavantajı üretim maliyetlerinin yüksek olmasıdır [14].

5.3 Vakum İnfüzyon Yöntemi

İnfüzyon, reçinenin kalıba aktarılması işlemidir. Bu yöntemin temel prensibi, vakum altına alınmış kuru takviye ve dolgu malzemelerinin oluşan basınç farkından yararlanılarak sıvı reçine ile doyurulması şeklindedir (Şekil 14). Bu yöntemin en önemli özelliği, takviye elemanının düzgün bir şekilde reçine ile kaplanması sonucu ürün içindeki hava boşluklarının el yatırma yönteminden daha iyi uzaklaştırmasıdır [14].

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

- Takviye malzemeler bir kalıp içerisine serilir.
- Serilen takviye malzemesi vakum torbalama yönteminde olduğu gibi plastik bir vakum filmi ve sızdırmazlık elemanları ile dış ortamdan izole edilir.

- İzole edilen ortamın içinde bulunan hava, bir vakum pompası yardımıyla boşaltılır.
- İzole edilen ortama reçine gönderilerek takviye malzemenin reçineye doyumu sağlanır.
- Takviye malzemesi reçineye doyduğunda reçine girişi kapatılarak reçinenin sertleşmesi beklenir [14].

Vakum infüzyon yönteminin rüzgâr türbin kanatlarında kullanılmaya başlanması ile birlikte kalıp yapım teknolojileri oldukça gelişmiştir. Kendinden ısıtmalı, vakum girişleri hazır, izolasyon yapılarak ısı kayıplarının minimum seviyeye indirildiği kalıplar geliştirilerek ürün kalitesinin daha da artması sağlanmıştır [23]. Vakum torbalama yöntemiyle daha iyi mekanik özelliklere sahip rüzgâr türbin kanatları imal edilmesine rağmen, imalat maliyetinin daha uygun olması nedeniyle, günümüzde yaygın olarak vakum infüzyon yöntemi kullanılmaktadır. Rüzgâr türbin kanatlarının boyutları arttıkça, vakum torbalama yöntemiyle kanat imalatı yapan üreticilerin de vakum infüzyon yöntemini tercih etmesi beklenmektedir [14].

6. SONUÇ

Bu çalışmada, günümüzde yaygın olarak kullanılan, gelecekte Türkiye ve dünyada daha fazla kullanılması beklenen rüzgâr türbini bileşenlerinden kanatlar ile ilgili genel bir değerlendirme yapılmış olup, elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Rüzgâr türbin kanatlarında DU, SERI, FFA-W, FX, RISO, NACA gibi aerofoiller kullanılmakta olup, bu aerofoiller arasında yaygın olarak NACA profilleri tercih edilmektedir.
2. Rüzgâr türbin kanatları kök kısmından uç kısmına doğru

daireesel kesitten büyük aerofoil kesite, daha sonra ise küçük aerofoil kesite doğru değişim gösteren bir geometriye sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır.

3. Kanatların iç kısmında, kanada etki eden yüklerle karşı kanadın dayanımını arttırmak amacıyla dikdörtgen kiriş ve I kiriş şeklinde destek elemanlar kullanılmaktadır.
4. Kanadın katı modelinin oluşturulması için nominal güç (N_n), nominal açısal hız (ω_n), koniklik açısı (β), uç-hız oranı (λ), kanadı dilimlere ayıran istasyon sayısı ile bu istasyonlardaki aerofoilin profil uzunluğu (c) ve hatve açıları (ϕ) gibi kanadın tasarım parametrelerinin belirlenmesi gerekmekte olup, bu parametrelerin bir kısmı türbin üreticilerinin katalog bilgileri, bir kısmı ise literatürdeki bilgilerden yararlanılarak elde edilebilmektedir.
5. Rüzgâr türbin kanatlarında, ekonomik olması ve istenilen özellikleri sağlaması nedeniyle cam elyaf (E-Cam) epoksi kompozit malzeme kullanılmaktadır.
6. Rüzgâr türbin kanatların mekanik davranışı, kullanılan üretim yöntemine de bağlı olarak değiştiğinden kanadın imalat yöntemi de önemlidir. Günümüzde, vakum torbalama yöntemiyle daha iyi mekanik özelliklere sahip rüzgâr türbin kanatları imal edilmesine rağmen, imalat maliyetinin daha uygun olması nedeniyle, yaygın olarak vakum infüzyon yöntemi kullanılmaktadır.

KAYNAKÇA

1. **Şenel, M. C.** 2012. "Rüzgâr Türbinlerinde Güç İletim Mekanizmalarının Tasarım Esasları – Dinamik Davranış," Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, s. 183.
2. www.bilgiustam.com, son erişim tarihi: 10.10.2015.
3. **Hendriks, H. B., Lindenburg, C., Kooijman, H. J. T., Bulder, H. B., Bozelie, J., Madsen, J. B., Halfschepel, R., Molenaar, W., Van den Berg, R., Zaaijer, M.** "Application of an Advanced Cost Model in Different Design Phases of an Offshore Wind Turbine," Energy Research Center of Netherlands. www.ecnl.nl, son erişim tarihi: 05.11.2015.
4. **Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., Scott, G.** 2009. "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report," National Renewable Energy Laboratory, www.nrel.gov, son erişim tarihi: 10.10.2015.
5. **Peerigna, J., Brood, R., Ceyhan, O., Engels, W., Winkell, D. D.** 2011. "Upwind 20 MW Wind Turbine Pre-Design: Blade Design and Control," Energy Research Centre of Netherlands, www.ecn.nl, son erişim tarihi: 10.10.2015.
6. **Griffith, T., Ashwill, T. D.** 2011. "The Sandia 100-meter All-Glass Baseline Wind Turbine Blade: SNL100-00, Sandia National Laboratories," www.windpower.sandia.gov, son erişim tarihi: 10.10.2015.
7. **Kaya, K.** 2014. "Rüzgâr Türbini Kanadının Mekanik Tasarım Esasları," Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, s. 191.
8. **Schubel, P. J., Crossley, R. J.** 2012. "Wind Turbine Blade Design," *Energies*, vol. 5, p. 3245-3449.
9. <http://www.reinforcedplastics.com>, son erişim tarihi: 11.10.2015.
10. <http://turbinatop.net>, son erişim tarihi: 11.10.2015.
11. <http://www.cleanenergybrands.com>, son erişim tarihi: 11.10.2015.
12. **Emniyetli, G.** 2007 "Evsel Elektrik İhtiyacının Karşılama İçin Rüzgâr Türbin Tasarımı," Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, s. 134.
13. **Hau, E.** 2006. *Wind Turbines Fundamentals, Technology, Application, Economics*. Second Edition, ISBN 10-3-540-24240-5, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.
14. **Höyland, J.** 2010. "Challenges for Large Wind Turbine Blades," Philosophiae Doctor Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norwegian.
15. www.hexcel.com, son erişim tarihi: 18.10.2015.
16. www.warlock.com, son erişim tarihi: 11.10.2015.
17. **Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L.** 2002. *Wind Turbine Explained, Theory Design And Application*, John Wiley&Sons, ISBN 0-471-49972-2, England.
18. *Blade Dynamics D49 2 MW Datasheet*, <http://www.bladedynamics.com/>, son erişim tarihi: 12.10.2015.
19. **Griffin, D. A., M. D. Zuteck.** 2001. "Scaling of Composite Wind Turbine Blades for Rotors of 80 to 120 meter Diameter," *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME*, vol. 123 (4), p. 310-318.
20. **Locke, J., Valencia, U.** 2004. "Design Studies for Twist-Coupled Wind Turbine Blades," Sandia National Laboratories, www.windpower.sandia.gov, son erişim tarihi: 12.10.2015.
21. **Uysal, A.** 2008. "Rüzgâr Türbini Kanat Malzemelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, s. 95.
22. **Berthelot, J. M.** 1999. *Composite Materials Mechanical Behaviour and Structural Analysis*, Springer, ISBN 978-1-4612-0527-2, p. 646.
23. **Karabağ, S.** 2011. "Rüzgâr Türbini Kanadı İmalatı," İzmir Rüzgâr Sempozyumu ve Sergisi, 23-24 Aralık 2011, İzmir.
24. www.windpowermonthly.com, son erişim tarihi: 12.10.2015.
25. "SP Systems Guide to Composites," www.compositesurgentbe.com, son erişim tarihi: 12.10.2015