

# KONUT TİPİ RÜZGAR TÜRBİNİ KANATLARININ TEORİK MODELLENMESİ VE GÜÇ ÜRETİMİNİ ETKİLEYEN BELİRLİ AERODİNAMİK ÖZELLİKLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

F.Mertkan Arslan<sup>1</sup>, Halil Tuzcu<sup>2</sup>, Hüseyin Günerhan<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir

<sup>2</sup> Uşak Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, Uşak

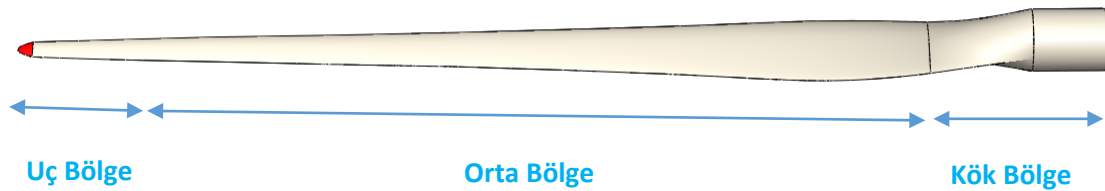
<sup>1</sup>mertkan.arslan@gmail.com, <sup>2</sup>halil.tuzcu@gmail.com, <sup>3</sup>huseyingunerhan@gmail.com

## ÖZET

Rüzgar enerjisinden elde edilen güç üretiminde yaygın olarak kullanılan 3 kanatlı, yatay eksenli rüzgar türbinlerine ait kanat tasarımı, teorik olarak bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Rotor yarıçapı 2 metre olan 3 farklı kanat profili ele alınarak, konut tipi rüzgar türbinlerine etki eden farklı aerodinamik özellikler karşılaştırılmıştır. Sırasıyla (i) S1210 kanat profili (burulma açılı), (ii) S1210 kanat profili (burulma açısız) ve (iii) farklı kanat profili NACA0015 (burulma açılı) kullanılarak, burulma açısının ve farklı kanat profillerinin güç üretimine olan etkileri incelenmiştir. Rüzgar enerjisi çalışması, İzmir ilinde Foça ilçesinde değerlendirilmeye alınmış olup ortalama rüzgar hızı 5m/s olarak kabul edilmiştir. Bu çalışma sonucunda burulma açısı kullanılarak tasarlanan türbine ait enerji verimliliğinin %6,20 arttığı ve S1210 (burulma açılı) kanat profiline sahip türbinin, NACA0015 (burulma açılı) kanat profiline sahip türbine göre %2,55 daha verimli olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak rüzgar türbini kanatlarının tasarımında burulmanın, rotorun verimliliği açısından önemli bir parametre olduğu bu çalışma kapsamında gösterilmiştir.

## 1.GİRİŞ

Rüzgar türbini kanatları, rüzgardan elde ettikleri kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren türbin elemanlarıdır. Kanatlar kök, orta ve uç bölge olarak 3 farklı bölgeye ayrılır. Kanat kök bölgesi, kanadın türbin rotoruna bağlanan kısmı ile kanat profilinin başladığı orta bölge arasında kaldığı için, bu bölge diğer bölgelere göre daha çok zorlanmaya maruz kalmaktadır. Kanadın orta ve uç bölgesi, enerji üretimi için önemli bölgelerdir ve bu bölgeler için aerodinamik hesaplamalar önemli hale gelmektedir [1].



Şekil 1. S1210 kanat profili ile modellenen rüzgar türbini kanadının bölümleri

Türbine gelen rüzgarın brüt gücü (1) ile hesaplanmaktadır;

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

$P$  (W) rüzgar türbini rotoruna gelen rüzgardan elde edilebilecek brüt güç,  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) ortam sıcaklığı ile değişebilen havanın yoğunluğu,  $A$  ( $\text{m}^2$ ) rotorun tarama alanı ve  $V$  (m/s) rotora gelen rüzgarın hızı olarak tanımlanabilir. Türbine gelen rüzgarın brüt gücü, rüzgar hızının 3. dereceden üssü ile doğru orantılı olduğu görülmektedir [2]. Bu yüzden rüzgar hızı, bu gücün arttırılması için önemli bir değişkendir. Uygulama esnasında rüzgar türbinine gelen rüzgarın hızı sifıra düşürülemez. Bu nedenle boyutsuz güç katsayısı  $C_p$  tanımlanmıştır. Güç katsayısı, türbinden elde edilebilecek net gücün, rüzgardan elde edilebilecek brüt güce bölünmesi ile belirlenir ve (2) ile belirlenir.

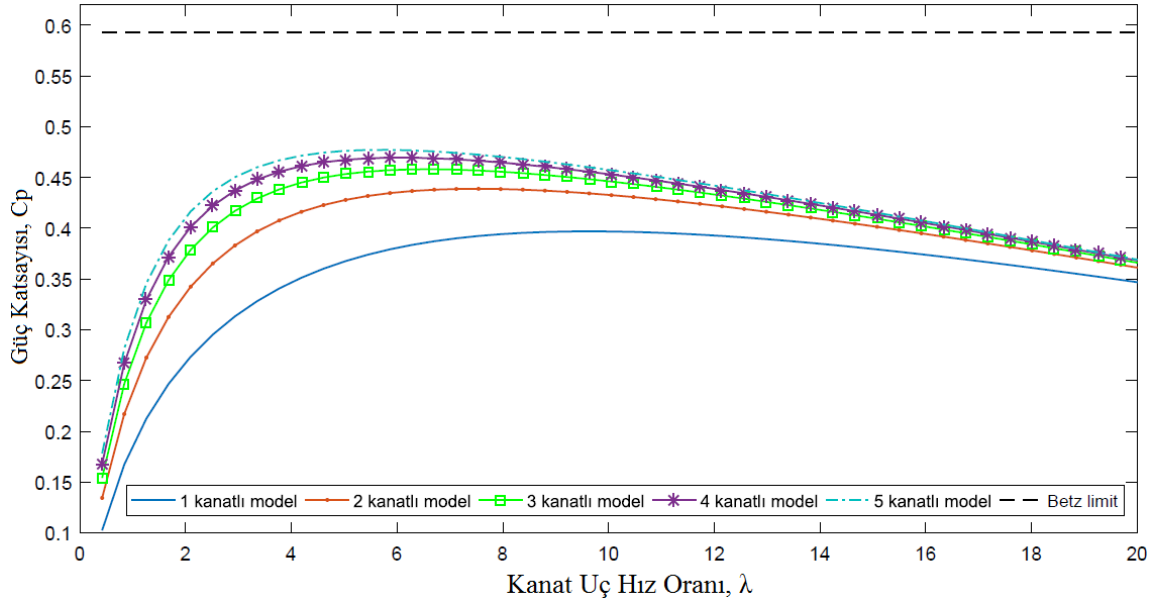
$$C_p = \frac{P_{\text{çıkış}}}{\frac{1}{2} \rho V^3 A} \quad (2)$$

Denklemden  $P_{\text{çıkış}}$  (W) rotordan elde edilen toplam güçtür. Teorik olarak bu oranın maksimum değeri;  $C_{p,max} = 0,593$  olmaktadır ve bu maksimum değer Betz limiti olarak tanımlanmaktadır [3]. Dikey eksenli ve yatay eksenli olmak üzere iki çeşit rüzgar türbin sistemi vardır. Yatay eksenli rüzgar türbinleri, dikey eksenli rüzgar türbinlerine göre rüzgar enerjisinden daha fazla yararlanabilmektedir. Bunun sebebi, yatay eksenli rüzgar türbinleri kanatlarının sistemin çalışması esnasında her zaman rüzgarın geliş yönüne dik olması ve türbinin süpürme alanında, rüzgarın enerjisinden daha yüksek oranda yararlanabilmesidir [4]. Tablo 1 ile verildiği gibi yatay eksenli rüzgar türbinleri, kanatların çaplarına göre mikro, küçük, orta ve büyük ölçekli olarak sınıflandırılmışlardır ve rotorların sahip oldukları süpürme alanlarına göre standart güç miktarları gösterilmiştir [5].

**Tablo 1.** Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin rotor çaplarına göre sınıflandırılması [5]

		Rotor çapı (m)		Süpürme alanı ( $\text{m}^2$ )		Standart güç (kW)	
<b>Küçük ölçekli</b>	Mikro	0,5	1,25	0,2	1,2	0,004	0,25
	Mini	1,25	3	1,2	7,1	0,25	1,4
	Konut tipi	3	10	7	79	1,4	16
Küçük ölçekli ticari tip		10	20	79	314	25	100
Orta ölçekli ticari tip		20	50	314	1963	100	1000
Büyük ölçekli ticari tip		50	100	1963	7854	1000	3000

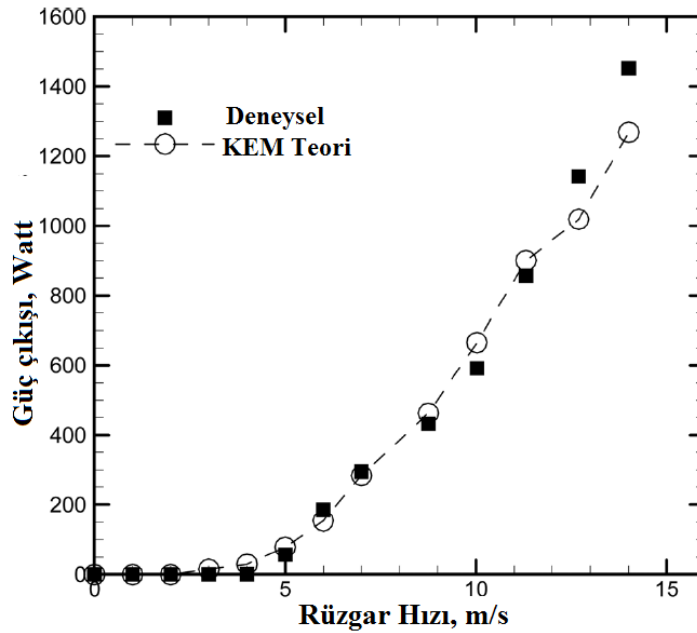
Türbinin yüksek verimle güç üretebilmesi için, düşük kanat ağırlığı ve yüksek kanat hızına ihtiyaç vardır. Kanat sayısının az olması rotorun daha yüksek hızlarda çalıştırılması anlamına gelmektedir. Teknik olarak tek kanatlı rüzgar türbini uygulamaları mümkündür ancak ses hızını aşan kanat uç hızı ve rotorun aşırı titreşiminden dolayı geniş ölçekli sistemler için uygun değildir. Üç kanatlı tasarımlar iki kanatlı tasarımlara göre daha dengeli bir jiroskop kuvvetine sahiptir. Ayrıca üç kanatlı tasarımlar iki kanatlı tasarımlara göre %5 daha verimlidir [2]. Çalışma kapsamında, burulma açılı S1210 kanat profilinin aynı kanat uç hız oranında 3 kanatlı rotor ile 2 kanatlı rotor arasındaki verimlilik farkı %4,68 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada kullanılan S1210 burulmalı kanat profilinin farklı kanat sayılarında, kanat hız oranına göre güç katsayılarının değerleri grafiği Şekil 2 ile verilmiştir.



Şekil 2. S1210 burulmalı kanat profilli rotorun farklı kanat sayılarında kanat uç oranına göre güç katsayısı

## 2. KANAT TASARIMI VE PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Rüzgâr türbinlerinin performans analizleri için kanat element momentum teorisi, Vortex Wake Method, Acceleration Potantia gibi farklı türde matematiksel modeller geliştirilmiştir. Ancak kanat element momentum teorisi, farklı rotor tipleri için doğruya yakın sonuçlar verebilmesi ve kolay uygulanabilmesi nedeniyle en yaygın olarak kullanılan modeldir. Kanat element momentum teorisi verileri ile deneysel verilerin karşılaştırılması Şekil 3 ile gösterilmiştir. [6].



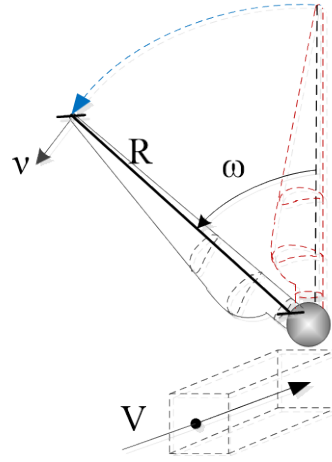
Şekil 3. Rüzgâr hızına göre rotordan elde edilen güç çıkışının deneysel verileri ile KEM teorisi verileri ile karşılaştırılması [6]

Bu çalışma kapsamında kanatların optimum geometrilerinin belirlenmesi ve rotorların güç katsayılarının hesaplanabilmesi için kanat element momentum teorisi kullanılmıştır.

## 2.1 Kanat Uç Hız Oranının Belirlenmesi

Rüzgar türbininin performans analizinde kanat uç hız oranı önemli bir parametredir. Kanat uç hız oranı,  $\lambda$ , Şekil 4 ile gösterilen rotor kanadının uç kısmındaki çevresel hız ile rotora gelen rüzgar hızına bölünmesi ile elde edilmektedir. Kanat uç hız oranı (3) ile hesaplanabilmektedir [7].

$$\lambda = \frac{\text{Kanat uç hızı}}{\text{Rüzgar hızı}} = \frac{\Omega R}{V} \quad (3)$$



Şekil 4. Rüzgar türbini üzerindeki hızların gösterimi [8]

Şekil üzerinde,  $V$  (m/s) kanada gelen rüzgar hızı,  $v$  (m/s) kanadın çevresel hızı,  $\omega$  (rad/s) kanadın açılma hızıdır. Rüzgar türbinlerinin kurulacağı yer Foça ilçesi seçilmiştir ve bu bölgenin ortalama rüzgar hızının belirlenmesi için çalışma [9] verilerinden yararlanılarak, en fazla 10m yükseklikte kurulduğu kabul edilmesi durumunda rüzgar hızı 5 m/s olarak seçilmiştir.

## 2.2 Kanat Profili Seçimi

Rüzgar türbinleri kanatlarında kullanılan kanat profilleri, kanatların üst ve alt yüzeyleri arasında basınç farkından kaynaklanan, kaldırma kuvveti ile türbinde güç üretmek için kullanılan yapılardır [10]. Kanat profillerinin amacı üst yüzeyde emme kuvveti yaratarak kaldırma kuvveti üretmektir. Aynı zamanda kaldırma kuvvetine dik bir şekilde istenmeyen bir sürüklenme kuvveti de üretilmektedir. Maksimum güç ve tork elde edebilmek için  $L/D$  oranının yani katsayı olarak ifade edilirse  $C_L/C_D$  oranının maksimum olması gerekmektedir. Kaldırma ve sürüklenme katsayıları sırası ile (4) ve (5) ile hesaplanabilir.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (4)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (5)$$

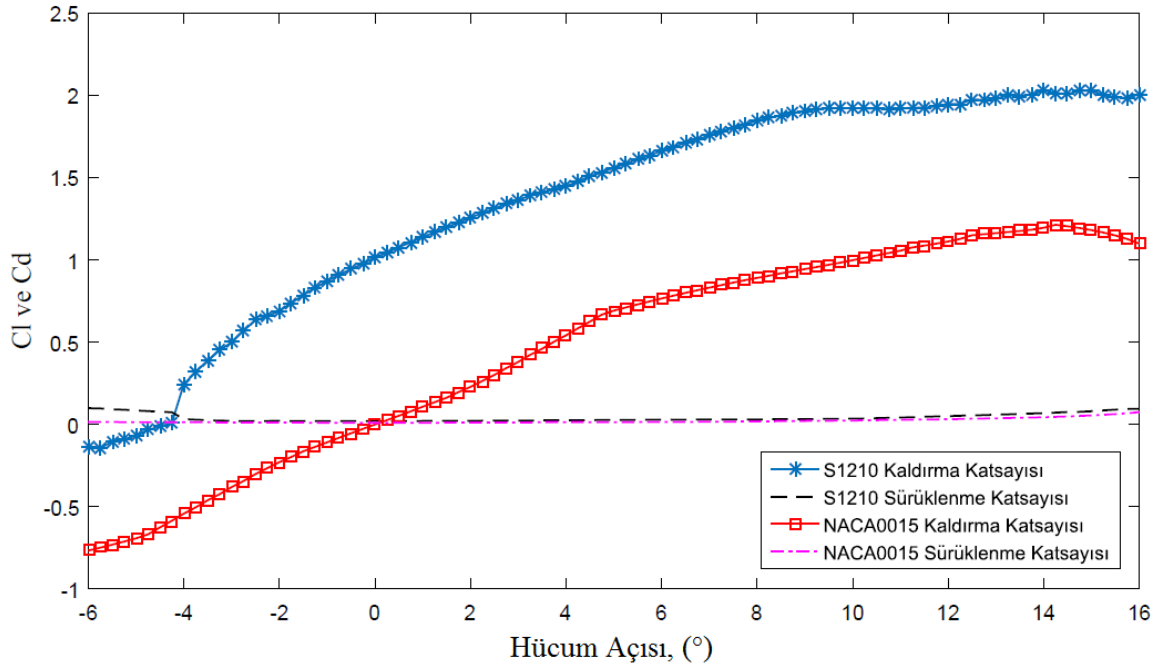
Denklemlerde,  $L$  kaldırma kuvveti,  $D$  sürüklenme kuvveti,  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) hava yoğunluğu,  $V$  rüzgar hızı ( $\text{m/s}$ ),  $A$  ( $\text{m}^2$ ) kanat profilinin kare alanı yani kanat profilinin eni ile uzunluğunun çarpımıdır [11]. Kanat profilinin kaldırma ve sürüklenme katsayıları, Reynold numarasına bağlıdır ve hücum açısı kadar önemli bir değişkendir [12]. Kanat uç hız oranı sabit tutulduğunda düşük Reynold sayılarında güç katsayısı düşmektedir [13]. Kanat profilinin performansına etki eden  $Re$  numarasının hesaplanması (6, 7, 8) ile gösterilmiştir. Reynold sayısı hesaplamaları kanadın orta noktasındaki verilere göre hesaplanmıştır. Ancak kanadın herhangi bir noktasındaki veriler kullanılarak da Reynold sayısı hesaplanabilir.

$$Re = \rho U_{bağil} c_{ort} / \mu \quad (6)$$

$$U_{bağil} = \sqrt{v_{ort}^2 + V^2} \quad (7)$$

$$V_{ort} = v / 2 \quad (8)$$

Denklemlerde,  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) hava yoğunluğu,  $U_{bağil}$  ( $\text{m/s}$ ) rüzgar hızı ile kanadın çevresel hızının bağlı hızı,  $V$  ( $\text{m/s}$ ) rüzgar hızı,  $v$  ( $\text{m/s}$ ) kanadın ortasındaki çevresel hızı,  $c_{ort}$  ( $\text{m}$ ) kanadın ortasındaki en uzunluğu,  $\mu$  ( $\text{kg/ms}$ ) havanın dinamik viskozitesi olarak tanımlanabilir [14]. Sonraki adımda hesaplanan  $Re$  numarasına göre kanat profilinin  $C_L$ - $\alpha$  ve  $C_D$ - $\alpha$  verileri, güç katsayısı hesaplamaları için kullanılabilir.

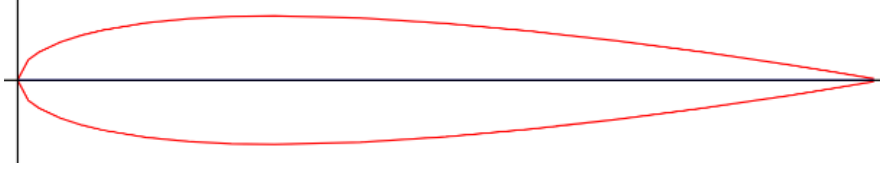


Şekil 5. S1210 100 000 Re ve NACA0015 Re 200 000 sayısındaki hücum açısına göre  $C_L$  ve  $C_D$  verileri

Bu çalışma kapsamındaki karşılaştırmada kullanılacak olan iki farklı kanat profillerinden ilki, yüksek kaldırma kuvveti ve düşük sürüklenme katsayısına sahip, küçük boyutlu rüzgar türbinlerinde kullanılan S1210 profilidir. Şekil 6 ile gösterilen S1210 kanat profilinin 100 000 Re sayısında maksimum  $C_L/C_D$  oranı 59,3 ve bu orana karşılık gelen dizayn hücum açısı,  $\alpha_{dizayn}$ , 8 derecedir. İkinci kanat profili ise simetrik bir yapıya sahip olan NACA0015 kanat profilidir. Şekil 7 ile gösterilen NACA0015 kanat profili, 200 000 Re numarasında maksimum  $C_L/C_D$  oranı 43,6 ve dizayn hücum açısı,  $\alpha_{dizayn}$ , 6,25 derecedir [15].



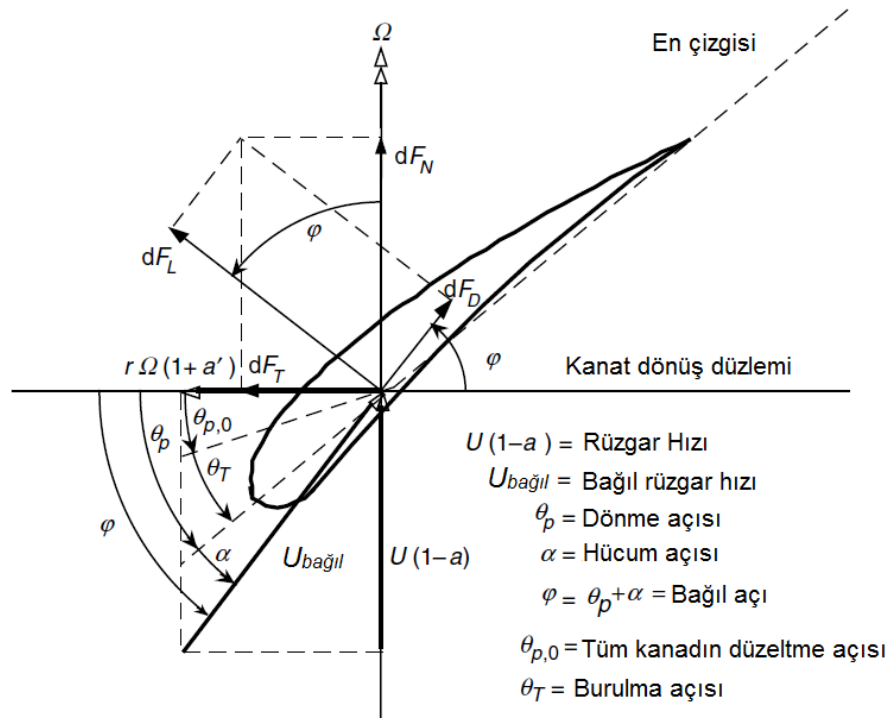
Şekil 6. S1210 Kanat profili şekli [15]



Şekil 7. NACA0015 Kanat profili şekli [15]

### 2.3 Rüzgar Türbini Kanadının Performans Analizi

Hesaplamalarda kanat element momentum teorisi gereği kanat 10 eşit parçaya bölünmüş olup her bir kanadın %20'lik kısmı kanat kökünün içinde kaldığı kabulü yapılmıştır. Güç katsayısı hesaplamalarında grafik yöntemi ve iterasyon yöntemi olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır. Burulma açılı olan S1210 ve NACA0015 kanat profilleri için grafik yöntemi ve burulma açılı olmayan S1210 kanat profili için ise iteratif yöntem kullanılmıştır. Kanat profili üzerindeki tüm açılar ve kanat üzerine etki eden kuvvetler Şekil 8 ile gösterilmiştir. Şekil 8 üzerinde tanımlanan  $F_L$  (N) kaldırma kuvveti,  $F_D$  (N) sürüklenme kuvveti,  $F_N$  (N) kanat dönüş düzlemine dik oluşan kuvvettir bu kuvvet itmeye katkıda bulunur.  $F_T$  (N) kanadın süpürdüğü çevreye teğetsel kuvvettir ve asıl yararlı torku üreten kuvvettir [7].



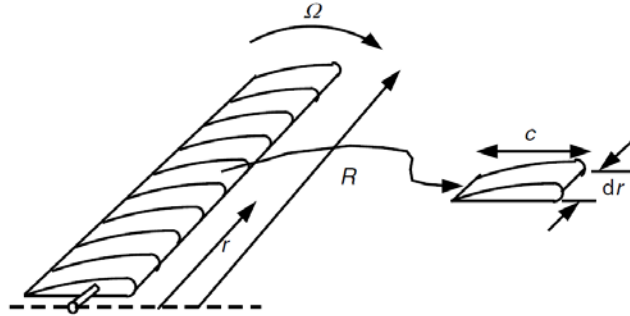
Şekil 8. Kanat profili üzerindeki açıların ve kuvvetlerin gösterimi [7]

Kanadın açılma hızı  $\Omega$  ile gösterilmektedir. Eksenel indüksiyon faktörü,  $a_i$ , rüzgar hızının rüzgar türbininin kanadına ulaştığında oluşan kayıp olarak tanımlanabilir. Eksenel indüksiyon faktörünün maksimum değeri 1/3 olarak tanımlanır ve bu değerde türbinin güç katsayısı maksimumdur yani Betz limitindedir. Çalışma [16] ile eksenel indüksiyon faktörünün Bernolli denklemlerinden elde edilme adımları geniş kapsamlı olarak gösterilmiştir. Rotorun arkasında kanadın dönüş yönüne ters yönde bir akış yani iz oluşur (wake rotation) ve bu durum torkun harcanmasına sebep olur [7]. Bu durumda güç ve tork hesapları için bu izin açılma hızının belirlenmesi gerekmektedir. Açılma indüksiyon faktörü,  $a'$  rotorun arkasında oluşan izin açılma hızı ile rotor kanadının açılma hızının fonksiyonudur [17].

### 2.3.1 Kanat geometrisinin belirlenmesi

Kanat geometrisinin belirlenmesindeki ilk adım kanat uç hız oranını belirlemektir. Hesaplamalara herhangi bir kanat uç hız oranı ile başlanabilir. Çünkü optimum kanat uç hızı güç katsayısı hesaplamaları bittikten sonra hesaplanabilecektir. Kanadın her bir elemanındaki kanat uç hızı oranı,  $\lambda_{r,i}$ , (9) ile belirlenir.  $i$  indisi, her bir kanat elemanı için hesaplamaların tekrarlanacağını belirtmektedir.

$$\lambda_{r,i} = \lambda(r_i / R) \quad (9)$$



Şekil 9. Kanat yapısının elemanlara bölünmesi [7]

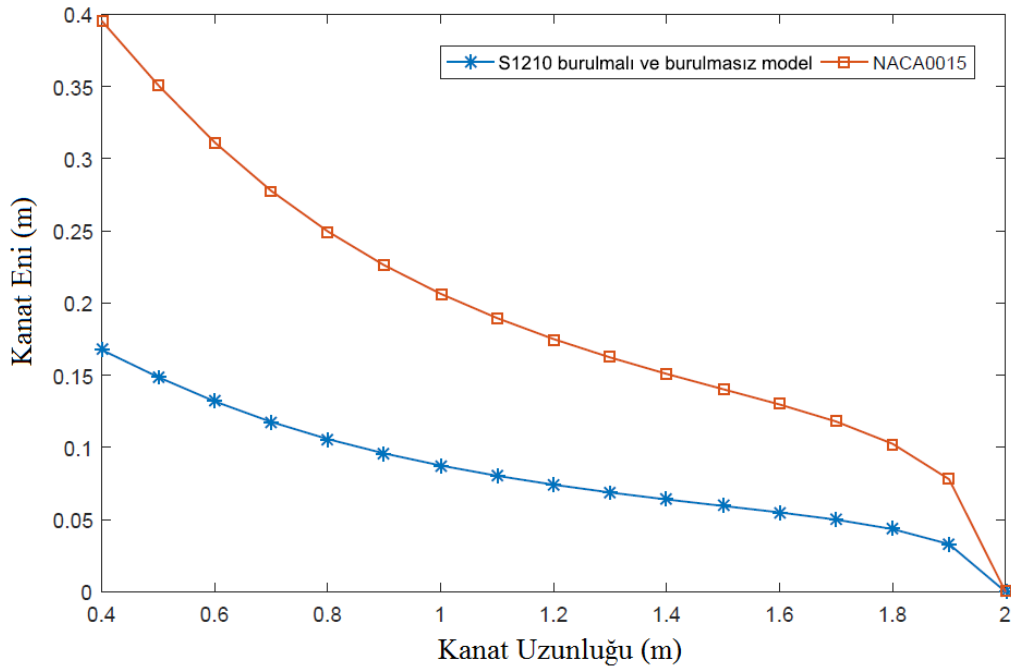
Her bir eleman üzerindeki bağıl hızın dönme eksenine yaptığı açı,  $\varphi_i$ , (10) formülü ile belirlenir. Kanadın üst kısmında yani vakum kısmındaki basınç, kanadın alt kısmındaki basınçtan daha düşük basınçta olduğu için hava, kanat ucu etrafında alt yüzeyden üst yüzeye akmaya eğilim gösterir. Böylelikle kanat ucu yakınlarında kaldırma kuvveti ve enerji üretimi azaltılır. Prandtl tarafından geliştirilen bu etkiye kanat uç kaybı denmektedir ve (11) denklemi ile hesaplanabilmektedir [7]. Çalışma [18] ile verilen her bir elemanındaki kanadın en uzunluğu  $c_1$  (m), uç kaybı hesaba katılarak (12) ile veya en uzunluğu çalışma [7] kapsamında yer alan  $c_2$  (m), (13) denklemiyle de hesaplanabilir. Kanat uç kısmı (12) ile dikdörtgen, (13) ile sivri bir şekil almaktadır. Çalışma kapsamında denklem (12) kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. S1210 ve NACA0015 kanat profilleri kullanılarak, kanat hattı boyunca oluşturulan kanat en uzunluğu Şekil 10 ile grafik haline getirilmiştir.

$$\varphi_i = \left(\frac{2}{3}\right) \tan^{-1} (1 / \lambda_{r,i}) \quad (10)$$

$$F_i = \left( \frac{2}{\pi} \right) \cos^{-1} \left\{ \exp \left[ \frac{-(B/2) \left[ 1 - \left( \frac{r_i}{R} \right) \right]}{\left( \frac{r_i}{R} \right) \sin \varphi_i} \right] \right\} \quad (11)$$

$$c_{1,i} = \frac{8\pi r_i F_i \sin \varphi_i (\cos \varphi_i - \lambda_{r,i} \sin \varphi_i)}{BC_{L,dizayn} (\sin \varphi_i + \lambda_{r,i} \cos \varphi_i)} \quad (12)$$

$$c_{2,i} = \frac{8\pi r_i}{BC_{L,dizayn,i}} (1 - \cos \varphi_i) \quad (13)$$



Şekil 10. S1210 ve NACA0015 Kanat profilleri ile oluşturulan kanadın en uzunluğu dağılımı

$B$  rüzgâr türbini rotorundaki toplam kanat sayısı,  $C_{L,dizayn}$  kanat profili verilerindeki en yüksek  $C_L/C_D$  oranındaki kaldırma katsayısıdır. Güç katsayısı hesaplamalarında diğer bir önemli parametre ise dayanıklılık oranıdır ve kanadın yüzey alanının, kanadın taradığı tüm alana bölümü ile elde edilir. Her bir kanat elemanı için dayanıklılık oranı (14) ile hesaplanabilir.

$$\sigma_i' = Bc_i / 2\pi r_i \quad (14)$$

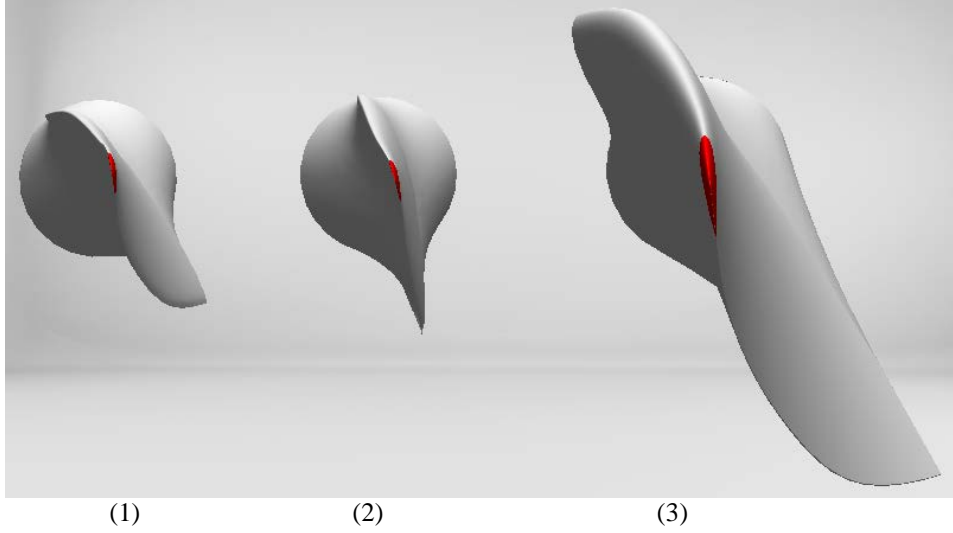
Her bir kanat elemanı için dönme açısı (15) ile hesaplanabilir.  $\theta_{T,i}$ , burulma açısı ise (16) ile elde edilir.

$$\theta_{p,i} = \varphi_i - \alpha_{dizayn,i} \quad (15)$$

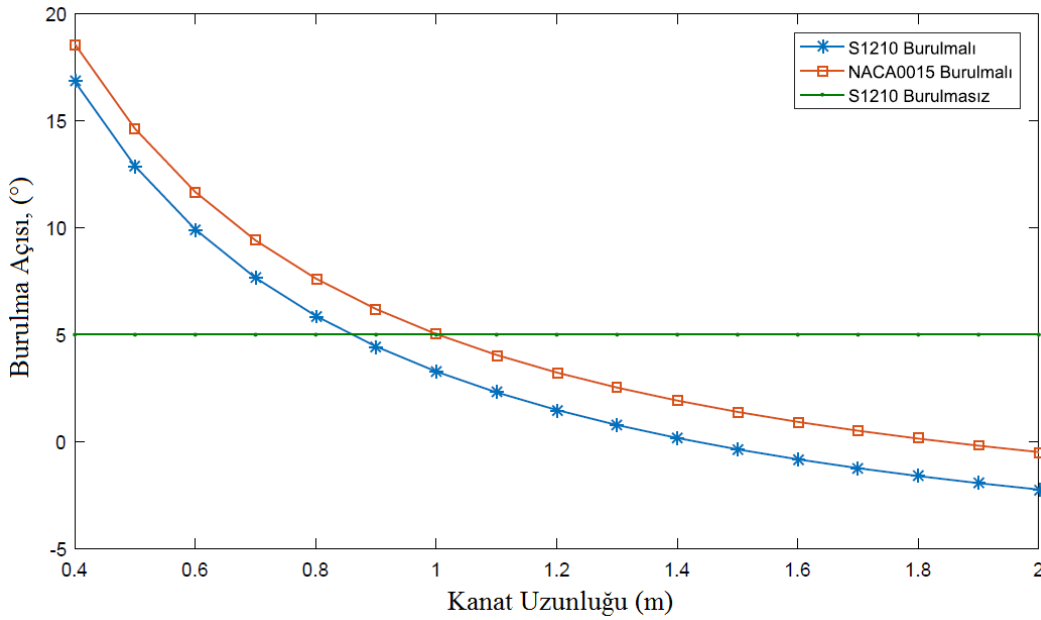
$$\theta_{T,i} = \theta_{p,i} - \theta_{p,0} \quad (16)$$



Denklemlerdeki,  $\alpha_{dizayn,i}$ , her bir elemandaki kanat profili deneysel verilerine göre en yüksek  $C_L/C_D$  oranına denk gelen hücum açısı (radyan),  $\theta_{p,0}$  (radyan) kanat dönme eksenine göre düzeltme açısı olarak tanımlanabilir. Burulmalı kanatlar için,  $\theta_{p,0}$ ,  $0^\circ$  olarak kabul edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan kanatların burulmalı ve burulmasız yapıları Şekil 11 ile gösterilmiştir ve Şekil 12 ile grafik haline getirilmiştir.



Şekil 11. (1) S1210 Burulmalı, (2) S1210 Burulmasız, (3) NACA0015 Burulmalı kanatlarının üst görünüşleri



Şekil 12. Kanatların burulma açılarının kanat hattı üzerindeki dağılımı

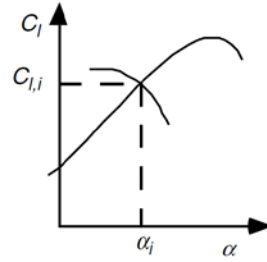
### 2.3.2 Grafik yöntemi

Kanat geometrisi değişkenleri belirlendikten sonra her bir elemanlardaki dönme açılarının değerleri Şekil 13 ile gösterilen her bir hücum açısı için  $\varphi_{i,j}$  (17) ile hesaplanması gerekmektedir. Denklemlerdeki  $j$  indisi her bir eleman için iterasyon sayısını belirlemektedir. Örnek olarak hücum açısı değerleri 1'den başlatılarak 10'a kadar istenilen oranda artırılarak

(17) denkleminde yerleştirilebilir. Ayrıca  $\varphi_{i,j}$  her bir eleman için de tekrarlanmalıdır. Sonraki işlemde kanat profilinin deneysel verileri,  $C_L$ -  $\alpha$  ile denklem (18) ile her bir eleman için hesaplanan kaldırma katsayısı eğrisi grafik yardımıyla kesiştirilir ve kesişen noktadaki  $\alpha_i$  ve bu değere karşılık gelen kanat profili verilerindeki  $C_L$  ve  $C_D$  değerleri güç katsayısı formülünde (32) kullanılmak üzere elde edilir.

$$\varphi_{i,j} = \theta_{p,i} - \alpha_{i,j} \quad (17)$$

$$C_{L,i} = 4F_i \sin \varphi_i \frac{(\cos \varphi_i - \lambda_{r,i} \sin \varphi_i)}{\sigma'_i (\sin \varphi_i + \lambda_{r,i} \cos \varphi_i)} \quad (18)$$



**Şekil 13.** Kanat profilinin deneysel verileri ile hesaplanan kaldırma katsayısı eğrisinin kesişimi

Sonraki adımda elde edilen veriler, her bir kanat elemanı için eksenel indüksiyon faktörü olarak tanımlanan (19) numaralı formüle yerleştirilir ve 0,4 değerinden küçük değerler için sonuç geçerli kabul edilir. Aksi durumda iterasyon yöntemi kullanılması gerekmektedir.

$$a_i = 1 / \left[ 1 + 4 \sin^2 \varphi_i / \left( \sigma'_i C_{L,i} \cos \varphi_i \right) \right] \quad (19)$$

### 2.3.3 İterasyon yöntemi

Denklem (9) - (12) ile kanat geometrisi belirlendikten sonra ilk iterasyon için, çalışma [7] ile verilen dönme açısı (20) kullanılır. Eksenel indüksiyon faktörü ise çalışma [7] kapsamında yer alan kanat uç kaybı hesaba katılmadan (21) ile veya çalışma [18] ile verilen, kanat uç kaybı eklenerek (22) ile de bulunabilir. Çalışma kapsamında (22) numaralı denklem kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Çalışma [7] kapsamında her bir elemandaki açısal indüksiyon faktörü (23) ile hesaplanır. Denklemlerdeki  $I$  indisi, ilk iterasyonu temsil etmektedir.

$$\varphi_{i,1} = \left( \frac{2}{3} \right) \tan^{-1} (1 / \lambda_{r,i}) \quad (20)$$

$$a_{i,1} = \frac{1}{\left[ 1 + \frac{4 \sin^2(\varphi_{i,1})}{\sigma'_{i,design} C_{L,design} \cos \varphi_{i,1}} \right]} \quad (21)$$

$$a_{i,1} = \frac{1}{\left[ 1 + \frac{4F \sin^2(\varphi_{i,1})}{\sigma'_{i,design} C_{L,design} \cos \varphi_{i,1}} \right]} \quad (22)$$

$$a'_{i,1} = \frac{1 - 3a_{i,1}}{(4a_{i,1}) - 1} \quad (23)$$

İkinci ve sonraki iterasyonlar için bağıl dönme açısı (24) ile hesaplanır.

$$\tan \varphi_{i,j} = \frac{1 - a_{i,j}}{(1 + a'_{i,j}) \lambda_{r,i}} \quad (24)$$

Bir sonraki adımda ise her bir iterasyon için uç hız kaybı faktörü (25) denklemi kullanılır.

$$F_{i,j} = \left( \frac{2}{\pi} \right) \cos^{-1} \left\{ \exp \left[ \frac{-(B/2) \left[ 1 - \left( \frac{r_i}{R} \right) \right]}{\left( \frac{r_i}{R} \right) \sin \varphi_{i,j}} \right] \right\} \quad (25)$$

Her bir iterasyon için hesaplanan hücum açısı (26) ile elde edilir ve bu değere karşılık gelen kanat profilinin deneysel verilerinden  $C_L$  ve  $C_D$  katsayıları elde edilir.

$$\alpha_{i,j} = \varphi_{i,j} - \theta_{p,i} \quad (26)$$

İtme katsayısı aynı güç katsayısına benzer bir şekilde itme kuvveti ile dinamik kuvvetin oranıdır ve (27) formülü ile daha iyi açıklanabilir. Eksenel indüksiyon faktörünün değeri maksimum yani 1/3 olması durumunda  $C_T = 8/9$  değerinde olmaktadır. Her bir kanat elemanındaki itme katsayısı (28) ile hesaplanır.

$$C_T = \frac{\frac{1}{2} \rho V^2 A [4a(1-a)]}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (27)$$

$$C_{T,i,j} = \frac{\sigma'_i (1 - a_{i,j})^2 (C_{L,i,j} \cos \varphi_{i,j} + C_{D,i,j} \sin \varphi_{i,j})}{\sin^2 \varphi_{i,j}} \quad (28)$$

Bir sonraki iterasyon için yeni eksenel indüksiyon faktörü hesabı (29) ve (30) ile şarta bağlanmıştır. Bir sonraki iterasyon için açısız indüksiyon faktörü (31) denklemi ile hesaplanır.

Eğer  $C_{T,i,j} < 0,96$ :

$$a_{i,j+1} = \frac{1}{\left[ 1 + \frac{4F_{i,j} \sin^2(\varphi_{i,j})}{\sigma' C_{L,i,j} \cos \varphi_{i,j}} \right]} \quad (29)$$

Eğer  $C_{T,i,j} > 0,96$ :

$$a_{i,j+1} = \left( 1 / F_{i,j} \right) \left[ 0,143 + \sqrt{0,0203 - 0,6427 (0,889 - C_{T,i,j})} \right] \quad (30)$$

$$a'_{i,j+1} = \frac{1}{\frac{4F_{i,j} \cos \varphi_{i,j}}{\sigma C_{L,i,j}} - 1} \quad (31)$$

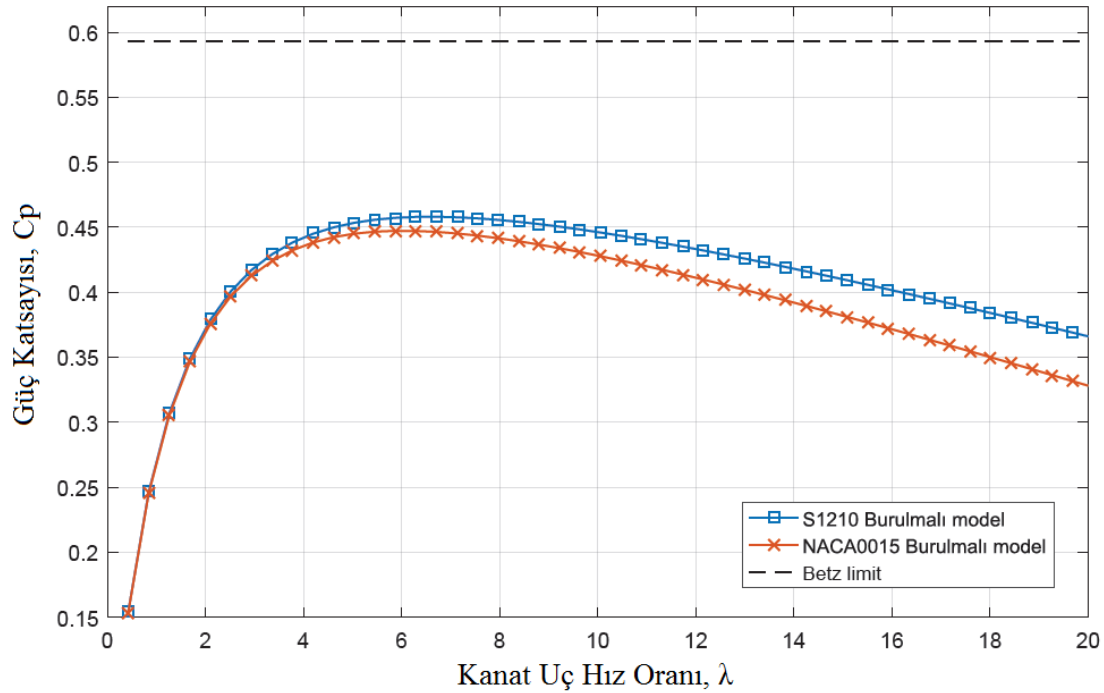
Çıkan yeni  $a_{i,1}$  ve  $a'_{i,1}$  değerleri (24) denkleminde yerleştirilir ve kabul edilebilir tolerans içinde olana kadar iterasyon tekrar edilir. İterasyon sonuçlandığında, denklem (26) ile son iterasyondaki hücum açısına göre  $C_L$  ve  $C_D$  katsayıları kanat profili verilerinden elde edilir ve güç katsayısı formülüne yerleştirilir.

### 2.3.4 Güç katsayısının hesaplanması

Rüzgâr türbini kanadının parçalara ayrılan her bir elemanı için hesaplanan değerler sonucunda her eleman için güç katsayısı (32) hesaplanır ve toplanır.

$$C_p = \frac{8}{\lambda N} \sum_{i=k}^N F_i \sin^2 \varphi_i (\cos \varphi_i - \lambda_{r,i} \sin \varphi_i) (\sin \varphi_i + \lambda_{r,i} \cos \varphi_i) \left[ 1 - \left( \frac{C_D}{C_L} \right) \cot \varphi_i \right] \lambda_{r,i}^2 \quad (32)$$

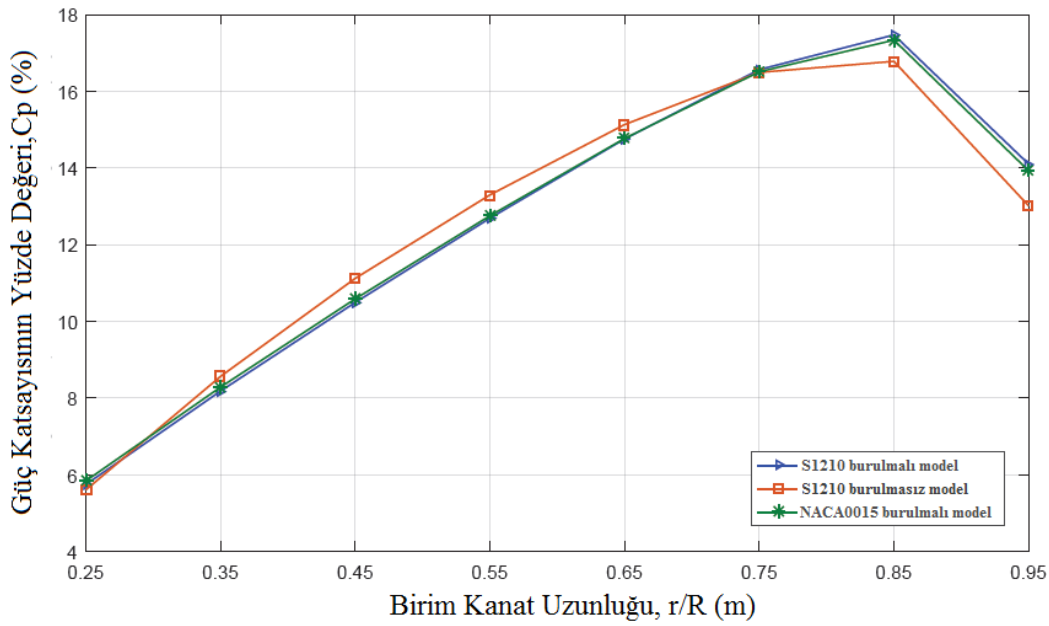
Güç katsayısının tüm hesaplamaları tamamlandıktan sonra rotorun performans analizinde kullanılacak olan optimum uç hız oranının belirlenmesi için şekil 14 ile gösterildiği gibi güç katsayısı ve kanat uç hızı eğrisi,  $C_p - \lambda$ , oluşturulur. Maksimum güç oranına denk gelen uç hız oranı rotor tasarımı için kullanılabilir ve tüm hesaplamalar belirlenen kanat uç hız oranı ile tekrardan yapılmalıdır.



Şekil 14. Güç katsayısı ve uç hız oranı eğrisi

## SONUÇ

Çalışma kapsamında optimum kanat tasarımının aşamaları sırası ile gösterilmiştir. Aerodinamik performansları karşılaştırılmak üzere 3 farklı kanat tasarımı yapılmıştır. Tüm kanatların aynı kanat uç hızı oranında ve aynı çevresel koşullarda dizayn edildiği kabul edilmiştir. Kanatların karşılaştırılabilmesi için, güç katsayısı ve kanat uç hızı eğrisi,  $C_p - \lambda$ , dikkate alınarak tüm kanatların uç hız oranları 6,576 olarak belirlenmiştir. Bildiri kapsamında sonuç olarak karşılaştırılan üç rotor için güç katsayıları, S1210 burulmasız tasarımı için 0,431, S1210 burulmalı tasarımı için 0,458 ve NACA0015 burulmalı tasarımı için ise 0,447 olarak bulunmuştur. Ayrıca güç katsayısının, kanat hattı boyunca bölgesel etkinliğinin daha iyi anlaşılabilmesi için kanat birim hat uzunluğunda, her üç kanat için üretilen yüzdesel olarak bölgesel güç katsayısı oranları gösterilmiştir (Bkz. Şekil 15).



**Şekil 15.** Kanat hattı birim uzunluğuna göre her üç kanat için güç katsayısının bölgesel yüzde değerleri.

Hesaplamalar sonucunda burulma açısının eklenmesi kanat performansını arttırdığı ve kanat profili seçiminin de önemli bir etken olduğu güç katsayıları hesaplanarak gösterilmiştir. S1210 burulma açılı ve burulma açısız tasarımların güç katsayısı farkının %6,20 ve S1210 burulma açılı kanat profiline sahip rotorun, NACA0015 burulma açılı kanat profiline göre %2,55 daha yüksek güç katsayısına sahip olduğu gösterilmiştir. Ayrıca aerodinamik performansı yüksek olan S1210 kanat profiline sahip kanat ile NACA0015 kanat profiline sahip kanadın boyutsal farklılığı çalışma kapsamında gösterilmiştir (Bkz Şekil 11). Buna göre kanatların üretilmesi durumunda, aynı yarıçapta S1210 kanat profiline sahip kanadın, NACA0015 kanat profiline sahip kanada göre çok daha az malzeme kullanılacağı görülmektedir. Bu sonuçlara göre kanat profili seçiminin, rotor verimliliği ve maliyeti açısından önemli bir unsur olduğu ve burulma açısının eklenmesi de kanat verimliliğini arttıracakları gösterilmiştir. Sonuç olarak rüzgâr enerjisi sürekli bir kaynak olduğu için burulma açılı ve yüksek performanslı kanat profilli rüzgâr türbinleri her geçen saniye üretilen güce katkı sağlayacak ve rotorun verimliliğini önemli ölçüde arttıracaktır.

**KAYNAKLAR**

- [1] **Kaya K., Koç E.**, 2015. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinde Kanat Profil Tasarımı ve Üretim Esasları, *Mühendis ve Makine* 56, s. 38-48.
- [2] **Patel, M.R.**, 2005. Wind and Solar Power Systems Analysis, and Operation second edition, *U.S. Merchant Marine Academy Kings Point*, New York, U.S.A.
- [3] **Martin O.L.H.**, 2008, Aerodynamics of Wind Turbines Second Edition, London, Sterling, VA.
- [4] **Chi J. B., Wei C. W.**, 2016, Review of computational and experimental approaches to analysis of aerodynamic performance in horizontal-axis wind turbines(HAWTs), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 63, s. 506–519.
- [5] **Tummala A., Ratna K. V., Dipankur K. S., Indrajaya V., Hari Krishna V.**, 2016, A review on small scale wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56, s. 1351–1371.
- [6] **Maryam R., Horia H.**, 2012, Aerodynamic Performance of a Small Horizontal Axis Wind Turbine, *Journal of Solar Energy Engineering* 134
- [7] **Manwell J. F. Manwell , McGowan J. G., Rogers A. L.**, 2009, Wind Energy Explained Theory, Design and Application Second Edition, *Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Massachusetts*, USA.
- [8] **Tuzcu H.**, 2017, Binalar için Yenilenebilir Hibrit Enerjili Sistemlerin Ekserji ve Eksergoekonomik Analizleri, Doktora Tezi.
- [9] **Salmanoğlu F., Çetin N.S.**, 2012, İzmir İlinin DMİ ve REPA Kaynaklı Rüzgâr Hızı Verilerinin İlçeler Bazında Karşılaştırılması, *Tesisat Mühendisliği* 131, s. 53-60.
- [10] **Koç E., Kaya K.**, 2015, Yatay Eksenli Rüzgar Türbin Kanatlarının Mekanik Tasarım Esasları Teorik Model, *İzmir Rüzgâr Sempozyumu* 3.
- [11] **Ronit K. S., Rafiuddin M. A., Mohammad A. Z., Young H. L.**, 2012, Design of a low Reynolds number airfoil for small horizontal axis wind turbines, *Renewable Energy* 42, s. 66-76.
- [12] **Lissaman P. B. S.**, 1983, Low-Reynolds Number Airfoils, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 15, s. 223-239.
- [13] **Qing'an L., Yasunari K., Takao M., Junsuke M., Yusuke N.**, Effect of turbulent inflows on airfoil performance for a Horizontal Axis Wind Turbine at low Reynolds numbers (part I: Static pressure measurement) , *Energy* 111, s. 701-712.
- [14] **Xiongwei L., Lin W., Xinzi T.**, Optimized linearization of chord and twist angle profiles for fixed-pitch fixed-speed wind turbine blades, *Renewable Energy* 57, s. 111-119.
- [15] [www.airfoiltool.com](http://www.airfoiltool.com)
- [16] **John M.**, 2012, Design and Optimization of a Small Wind Turbine, *Rensselaer Polytechnic Institute Hartford*, Connecticut.
- [17] **Habali S. M., Saleh I. A.**, 2000, Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced plastics Part I: Design of the blade and root, *Energy Conversion & Management* 41, s. 249-280.
- [18] **Klunk E., Yilmaz N.**, 2009, HAWT Rotor Design and Performance Analysis, *Proceedings of the ASME 2009 3rd International Conference of Energy Sustainability*.