

Konut Tipi Rüzgar Türbini Kanatlarının Teorik Modellenmesi ve Güç Üretimini Etkileyen Belirli Aerodinamik Özelliklerin Karşılaştırılması

Mak. Müh. Feyzullah Mertkan Arslan Dr. Halil Tuzcu Doç. Dr. Hüseyin Günerhan

1. Giriş

• 5 m/s rüzgar hızında, rotor yarıçapı 2 metre olan 3 farklı rotor ele alınarak, konut tipi rüzgar türbinlerine etki eden farklı aerodinamik özellikler karşılaştırılmıştır.

- 1. S1210 Kanat profil yapılı Burulmalı rotor.
- 2. S1210 Kanat profil yapılı Burulmasız rotor.
- 3. NACA0015 Kanat profil yapılı Burulmalı rotor.
- Kanatlardaki burulmanın, rotorun enerji verimliliğine etkisi güç katsayısı hesaplanarak gösterilmiştir.
- Kanat profili (airfoil) seçiminin kanat tasarımında ne derece önemli olduğu çalışma kapsamında yer almaktadır.
- Kanatların tasarlanabilmesi ve aerodinamik analizinin yapılabilmesi için Kanat Element Momentum (KEM) kullanılmıştır.
- Hesaplamalarda hiçbir ekonomik veya aerodinamik kısıtlama yapılmamıştır.





2.RÜZGAR TÜRBİNİNİN TEMEL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

2.1 EKSEN TİPİNİN BELİRLENMESİ

- 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.



2.2 KANAT SAYISININ BELİRLENMESİ

• 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.

• Üç kanatlı tasarımlar iki kanatlı tasarımlara göre %5 daha verimlidir.

• 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.



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

2.3 RÜZGAR KANADI BOYUTUNUN BELİRLENMESİ

• Temel olarak rüzgar türbinin çapının belirlenmesindeki ilk adım kurulacak konutun veya bölgenin enerji arzını belirlemektir.

• Türbine gelen rüzgarın brüt gücü (1) nolu denklem ile hesaplanmaktadır ve P (W) rüzgar türbini rotoruna gelen rüzgardan elde edilebilecek brüt güç, ρ (kg/m³) ortam sıcaklığı ile değişebilen havanın yoğunluğu, A (m²) rotorun tarama alanı ve V (m/s) rotora gelen rüzgarın hızı olarak tanımlanabilir.

• Aşağıdaki ölçümlendirmeye göre dizayn edilecek tüm kanatların yarıçapları 2m olarak belirlenmiştir.

	_			Rotor	çapı (m)	Süpürme a	ılanı (m ²)	Standart g	üç (kW)
1	_	Küçük ölçekli	Mikro	0,5	1,25	0,2	1,2	0,004	0,25
$P = \frac{1}{2}\rho A V^3$	(1)		Mini	1,25	3	1,2	7,1	0,25	1,4
			Konut tipi	3	10	7	79	1,4	16
		Küçük ölçel	kli ticari tip	10	20	79	314	25	100
		Orta ölçel	kli ticari tip	20	50	314	1963	100	1000
		Büyük ölçel	kli ticari tip	50	100	1963	7854	1000	3000

3. GÜÇ KATSAYISI TANIMI VE BETZ LİMİTİ

• Uygulama esnasında rüzgar türbinine gelen rüzgarın hızı sıfıra düşürülemez. Bu nedenle boyutsuz güç katsayısı C_p tanımlanmıştır. **Güç katsayısı**, türbinden elde edilen net gücün, rüzgardan elde edilen brüt güce bölünmesi ile belirlenir ve (2) nolu denklem ile belirlenir.

- Denklemde P_{cikis} (W) rotordan elde edilen toplam güçtür. Teorik olarak bu oranın maksimum değeri; $C_{p,max} = 0,593$
- Bu maksimum değeri düşüren 3 farklı etmen vardır.
- 1. Rotorun arkasında dönen iz (girdap)
- 2. Sonlu sayıdaki kanat sayısı ve kanat uç kaybı
- 3. Sıfırlanamayan aerodinamik sürüklenme





$$C_{p} = \frac{P_{cikis}}{\frac{1}{2}\rho V^{3}A} \qquad (2)$$

3.1 Tek Boyutlu Momentum Teorisi



Türbine gelen ve giden akışa sırasıyla Bernoulli Denklemleri uygulanır;

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_+ + \frac{1}{2}\rho v^2$$
 (3) ve $p_+ - \Delta p + \frac{1}{2}\rho v^2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho v_3^2$ (4)

İki denklem birbirinden çıkartıldığında 5 nolu denklem denklem olurşmaktadır;

$$\Delta p = \frac{1}{2}\rho(\nu_1^2 - \nu_3^2)$$
 (5)

Lineer momentumdaki ν_1^{\prime} den ν_3^{\prime} 'e olan değişime bağlı olarak basınçtaki değişim (Δp) 6 nolu denklemdeki gibi de ifade edilebilir;

$$\Delta p = \rho \nu (\nu_1 - \nu_3) \tag{6}$$

Elde edilen iki Δp denklemi çözülür ise 7 nolu denkleme ulaşılır.

$$\nu = \frac{1}{2}(\nu_1 + \nu_3)$$
 (7)

Rüzgar türbini rotorda üretilen enerji, havanın kinetik enerjisine eşittir ve 8 nolu denklem ile ifade edilir;

$$P = \frac{1}{2}\rho\nu(\nu_1^2 - \nu_3^2)$$
 (8)

Rüzgar hızındaki kayıp olarak tanımlayabileceğimiz eksenel indüksiyon faktörü, a, 9 ve 10 nolu denklemlere yerleştirilir.

$$(1-a)v_1 = v$$
 (9)
 $(1-2a)v_{1=}v_3$ (10)

Eksenel indüksiyon faktörü güç denklemine yerleştirilirse 11 nolu denklemdeki formül elde edilir;

$$P = 2\rho a (1-a)^2 v_1^3 A \tag{11}$$

Böylelikle güç katsayısı 12 nolu denklemdeki gibi ifade edilir;

$$C_p = 4a(1-a)^2$$
 (12)

- *Cp* denkleminin türevi alınıp sıfıra eşitlendiğinde eksenel indüksiyon faktörünün en yüksek değeri 1/3 olmaktadır ve bu değer yerine koyulduğunda güç katsayısının maksimum değeri 16/27 yani 0,593 olmaktadır.
- Ancak yapılan bu çıkarımlarda rotorun arkasındaki dönen izin (wake rotation) etkileri hesaba katılmamıştır. Rotorun arkasındaki dönen iz (wake rotation) hesaba katılır ise hesaplamalar genişleyecek ve güç katsayısı düşecektir.



3.2 Girdap etkisi ile İdeal Yatay Eksenli Rüzgar Türbini

- Rüzgarın gücü rotorda üzerinde bir tork oluşturmaktadır. Oluşan bu tork eşit miktarda ve ters yönlü olarak hava üzerinde bir tork oluşturmak zorundadır.
- Bu nedenle rüzgar türbini dönerken rotorun arkasında, rotorun döndüğü yönün ters istikametinde dönen bir girdap oluşmaktadır.
- Üretilen bu girdapın bir kinetik enerjisi olduğu için maksimum elde edilebilecek enerji miktarını yani betz limitini düşecektir.
- Rotorun bağıl açısal hızı, Ω , ve rotorun arkasında oluşan girdabın açısal hızı, ω , aynı yönlü olduğu için $\Omega + \omega$ olarak denklemlere katılabilir.
- Böylelikle **açısal indiksiyon faktörü**, **a**', yandaki formül ile türetilebilir.

$$\Omega r + (\omega/2)r \quad \text{(13)}$$
veya
$$\Omega r (1 + a') \quad \text{(14)}$$

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad \text{(15)}$$







4- YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN KANAT GEOMETRİSİ DEĞİŞKENLERİNİN BELİRLENMESİ VE TASARIMI

- Rüzgar türbinlerinin performans analizleri için kanat element momentum teorisi (KEM), Vortex Wake Method, Accelaration Potantial 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.
- Çalışma kapsamında kanatların optimum geometrilerinin belirlenmesi ve rotorların güç katsayılarının hesaplanabilmesi için **kanat element momentum teorisi (KEM)** kullanılmıştır.



Deneysel verileri ile KEM teorisi verileri ile karşılaştırılması

4.1 Kanat Uç Hız Oranının Belirlenmesi

- Rüzgar türbininin performans analizinde kanat uç hız oranı önemli bir değişkendir. Kanat uç hız oranı, λ , aşağıdaki sekilde gösterildiği gibi rotor kanadının uç kısmındaki çevresel hız ile rotora gelen rüzgar hızına bölünmesi ile elde edilmektedir. Kanat uç hız oranı (16) nolu formül ile hesaplanabilmektedir.
- Şekil üzerinde, V (m/s) kanada gelen rüzgar hızı, v (m/s) kanadın çevresel hızı, ω (rad/s) kanadın açısal hızıdır.
- Rotorun geometrik değişkenlerinin ve güç katsayısının hesaplamalarında herhangi bir kanat uç hız oranı belirlenebilir. Ancak hesaplamalar tamamlandığında **Cp-** λ eğrisi oluşturulacak ve maksimum güç katsayısına denk gelen kanat uç hızı tasarım için kullanılabilecektir.



4-2 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.
- 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.
- Denklemlerde, *L* kaldırma kuvveti, *D* sürüklenme kuvveti, ρ (kg/m³) hava yoğunluğu, $V_{bağıl}$ bağıl rüzgar hızı (m/s), *A* (m²) kanat profilinin kare alanı yani kanat profilinin eni ile uzunluğunun çarpımıdır.

$$C_{L} = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V_{bağl}^{2}A} \quad (17) \qquad C_{D} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V_{bağl}^{2}A} \quad (18)$$



- Kanat profilinin kaldırma ve sürüklenme katsayıları, Reynold numarasına bağlıdır.
- *Cl/Cd* oranı Re numarasına göre kanat profili verilerinden elde ededilir.

Hücum Açısı, α (°)

- Kanat uç hız oranı sabit tutulduğunda artan Re sayılarında, güç katsayısı artmaktadır.
- Reynold sayısı kanadın orta noktasına göre hesaplanmıştır. Ancak kök ve uç bölgelerinde farklılıklar göstermektedir.
- Grafiklerde S1210 kanat profilinin faklı Re numaralarında Cl/Cd ve Hücum açısı, α (°) eğrisi verileri görülmektedir.

$$Re = \rho V_{bagd} c_{ort} / \mu \text{ (19)} \quad V_{bagtl} = \sqrt{V_{ort}^2 + V^2} \text{ (20)} \quad V_{ort} = V/2 \text{ (21)}$$

$$RE = 100 \ 000$$

$$\int_{00}^{00} \frac{1}{100}$$

- Çalışma kapsamındaki karşılaştırmada kullanılan iki farklı kanat profillerinden ilki, yüksek kaldırma kuvveti ve düşük sürüklenme katsayısına sahip, küçük boyutlu rüzgar türbinlerinde kullanılan S1210 profilidir.
- S1210 kanat profilinin 100 000 Re sayısında maksimum C_L/C_D oranı 59,3 ve bu orana karşılık gelen dizayn hücum açısı, α_{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 49,6 ve dizayn hücum açısı, α_{dizayn}, 6,25 derecedir.



S1210 Kanat profili



NACA0015 kanat profili





NACA0015 kanat profilinin 200 000 Re sayısındaki verileri

S1210 kanat profilinin 100 000 Re sayısındaki verileri





4.3 Kanat Geometrisinin Belirlenmesi

- Hesaplamalarda kanat element momentum teorisi gereği kanat 10 eşit parçaya bölünmüştür.
- Her bir kanadın %20'lik kısmı kanat kökünün içinde kaldığı kabulü yapılmıştır.
- Kanat geometrisinin belirlenmesindeki ilk adım bölgesel kanat uç hız oranını belirlemektir.
- Kanadın her bir elemanındaki bölgesel kanat uç hızı oranı, $\lambda_{r,i}$, 22 nolu denklem ile belirlenir. *i* indisi, her bir kanat elemanı için hesaplamaların tekrarlanacağını belirtmektedir.
- Her bir eleman üzerindeki bağıl hızın dönme ekseni ile yaptığı açı, φ_{i} , 23 nolu denklemdeki formül ile belirlenir.

$\lambda_{r,i} = \lambda(r_i / R)$ (22)		Birim kanat uzunluğu	Kanat uzunluğu	Kanat uç hız oranı	Bağıl açı	
	Element	r/R	r(m)	λ	φ (derece)	Durum
(2/), $-1(1/2)$	-	0,1	0,2	0,66	37,78	Göbek içinde
$\varphi_i = \left(\frac{2}{3}\right) \tan \left(1 / \lambda_{r,i}\right)$ (23)	-	0,15	0,3	0,99	30,26	Kök içinde
(7 3)	N2	0,25	0,5	1,64	20,87	Hesaba dahil
0	N3	0,35	0,7	2,30	15,66	Hesaba dahil
	N4	0,45	0,9	2,96	12,45	Hesaba dahil
\Box	N5	0,55	1,1	3,62	10,30	Hesaba dahil
	N6	0,65	1,3	4,27	8,78	Hesaba dahil
R	N7	0,75	1,5	4,93	7,64	Hesaba dahil
	N8	0,85	1,7	5,59	6,76	Hesaba dahil
	N9	0,95	1,9	6,25	6,06	Hesaba dahil
	-	1	2	6,576	5,76	Kanat ucu

4.3.1 Kanat Uç Kaybı

- 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 aşağıdaki denklem ile hesaplanabilmektedir.
- Kanat uç kaybının etkisi, analiz sonucunda aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi kanat ucunda basınçın düşmesine yol açmaktadır.

$$F_{i} = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cos^{-1} \left\{ \exp\left[\frac{-\left(B/2\right)\left[1 - \left(\frac{r_{i}}{R}\right)\right]}{\left(\frac{r_{i}}{R}\right) \sin \varphi_{i}}\right] \right\}$$
(24)





4.3.2 Kanat En Uzunluğunun Hesaplanması

• Her bir elemanındaki kanadın en uzunluğu c_I (m), uç kaybı hesaba katılarak aşağıdaki denklem ile hesaplanır. 25 nolu formül ile kanat ucu sivri olmaktadır.

$$c_{1,i} = \frac{8\pi r_i F_i \sin \varphi_i}{BC_{L,dizayn}} \frac{\left(\cos \varphi_i - \lambda_{r,i} \sin \varphi_i\right)}{\left(\sin \varphi_i + \lambda_{r,i} \cos \varphi_i\right)}$$
(25)

• Aynı şekilde uzunluğu c_2 (m), aşağıdaki denklem ile de hesaplanabilir. **26 nolu formül ile kanat ucu dikdörtgen bir form almaktadır**.

$$c_{2,i} = \frac{8\pi r_i}{BC_{L,dizayn,i}} (1 - \cos \varphi_i) \qquad (26)$$

• *B* rüzgar 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 27 nolu denklem ile hesaplanabilir.

$$\sigma_i = Bc_i / 2\pi r_i \tag{27}$$

• Her bir kanat elemanı için dönme açısı hesaplanabilir.

$$\theta_{p,i} = \varphi_i - \alpha_{dizayn,i}$$
 (28)

• Burulma açısı ise 28 nolu formül ile elde edilir.







(1) S1210 Burulmalı (2) S1210 Burulmasız (3) NACA0015 Burulmalı

5. Kanadın Performans Analizi

5.1 Grafik yöntemi

• Kanat geometrisi değişkenleri belirlendikten sonra her bir elemanlardaki dönme açıları değerleri 30 nolu formül ile hesaplanabilir.

$$\varphi_{i,j} = \theta_{p,i} - \alpha_{i,j} \tag{30}$$

• Ayrıca herbir eleman için teorik kaldırma katsayısı 31 nolu denklem ile hesaplanabilmektedir.

$$C_{L,i} = 4F_i \sin \varphi_i \frac{\left(\cos \varphi_i - \lambda_{r,i} \sin \varphi_i\right)}{\sigma_i' \left(\sin \varphi_i + \lambda_{r,i} \cos \varphi_i\right)}$$
(31)

- Hesaplanan teorik kaldırma katsayısı eğrisi ile belirlenen kanat profilinin deneysel verileri grafik yardımı ile kesiştirilir.
- Her bir kanat elemanı için eksenel indüksiyon faktörü 0,4 değerinden küçük değerler için sonuç geçerli kabul edilir. Aksi durumda iterasyon yöntemi kullanılması gerekmektedir.

$$a_{i} = 1/\left[1 + 4\sin^{2}\varphi_{i}/\left(\sigma_{i}'C_{L,i}\cos\varphi_{i}\right)\right]$$
(32)



S1210 Kanat profilinin grafik yöntemi sonucu

N=2 r/R=0,25									
α (Derece)	λ	θ (Radyan)	φ (radyan)	f	σ	Cl (Teorik)	Cl(Deneysel)	а	
1	1,64	0,22	0,24	0,9999979	0,14	2,121	1,139	0,560	
1,25	1,64	0,22	0,25	0,9999979	0,14	2,125	1,169	0,551	
1,5	1,64	0,22	0,25	0,9999979	0,14	2,129	1,201	0,543	
1,75	1,64	0,22	0,26	0,9999979	0,14	2,131	1,227	0,535	
2	1,64	0,22	0,26	0,9999979	0,14	2,133	1,259	0,526	
2,25	1,64	0,22	0,26	0,9999979	0,14	2,133	1,285	0,518	
2,5	1,64	0,22	0,27	0,9999979	0,14	2,132	1,313	0,509	
2,75	1,64	0,22	0,27	0,9999979	0,14	2,130	1,343	0,501	
3	1,64	0,22	0,28	0,9999979	0,14	2,127	1,365	0,493	
3,25	1,64	0,22	0,28	0,9999979	0,14	2,123	1,392	0,484	
3,5	1,64	0,22	0,29	0,9999979	0,14	2,118	1,412	0,476	
3,75	1,64	0,22	0,29	0,9999979	0,14	2,112	1,429	0,467	
4	1,64	0,22	0,29	0,9999979	0,14	2,104	1,449	0,459	
4,25	1,64	0,22	0,30	0,9999979	0,14	2,096	1,476	0,451	
4,5	1,64	0,22	0,30	0,9999979	0,14	2,087	1,510	0,442	
4,75	1,64	0,22	0,31	0,9999979	0,14	2,076	1,532	0,434	
5	1,64	0,22	0,31	0,9999979	0,14	2,065	1,561	0,426	
5,25	1,64	0,22	0,32	0,9999979	0,14	2,053	1,584	0,417	
5,5	1,64	0,22	0,32	0,9999979	0,14	2,039	1,613	0,409	
5,75	1,64	0,22	0,33	0,9999979	0,14	2,025	1,635	0,400	
6	1,64	0,22	0,33	0,9999979	0,14	2,009	1,665	0,392	
6,25	1,64	0,22	0,33	0,9999979	0,14	1,993	1,684	0,384	
6,5	1,64	0,22	0,34	0,9999979	0,14	1,975	1,715	0,375	
6,75	1,64	0,22	0,34	0,9999979	0,14	1,956	1,733	0,367	
7	1,64	0,22	0,35	0,9999979	0,14	1,937	1,756	0,359	
7,25	1,64	0,22	0,35	0,9999979	0,14	1,916	1,783	0,351	
7,5	1,64	0,22	0,36	0,9999979	0,14	1,895	1,800	0,342	
7,75	1,64	0,22	0,36	0,9999979	0,14	1,872	1,823	0,334	
8	1,64	0,22	0,36	0,9999979	0,14	1,848	1,848	0,326	
8,25	1,64	0,22	0,37	0,9999979	0,14	1,824	1,863	0,317	
8,5	1,64	0,22	0,37	0,9999979	0,14	1,798	1,878	0,309	
8,75	1,64	0,22	0,38	0,9999979	0,14	1,771	1,894	0,301	

5.2 İterasyon yöntemi

İlk İterasyon

• Kanat geometrisi değişkenleri belirlendikten sonra ilk iterasyon için herbir elemandaki **dönme açısı** 33 nolu denklem ile hesaplanır.

$$\varphi_{i,1} = \left(\frac{2}{3}\right) \tan^{-1}\left(1/\lambda_{r,i}\right) \tag{33}$$

• İlk iterasyon için eksenel indüksiyon faktörü formülü uç faktörü katılmadan ve katılarak hesaplanabilen iki farklı formül vardır. Çalışma kapsamında uç faktörü katılarak hesaplamalar yapılmıştır.

$$a_{i,1} = \frac{1}{\left[1 + \frac{4\sin^2(\varphi_{i,1})}{\sigma'_{i,design}C_{L,design}\cos\varphi_{i,1}}\right]}$$
(34)
$$a_{i,1} = \frac{1}{\left[1 + \frac{4F\sin^2(\varphi_{i,1})}{\sigma'_{i,design}C_{L,design}\cos\varphi_{i,1}}\right]}$$
(35)

• İlk iterasyon için açısal indüksiyon faktörü 36 nolu formül ile hesaplanmaktadır:

(36)

$$a_{i,1}' = \frac{1 - 3a_{i,1}}{\left(4a_{i,1}\right) - 1}$$

İkinci ve Sonraki İterasyonlar

• İkinci ve sonraki iterasyonlar için bağıl dönme açısı 37 nolu denklem ile hesaplanır:

$$\tan \varphi_{i,j} = \frac{1 - a_{i,j}}{\left(1 + a_{i,j}'\right)\lambda_{r,i}}$$
(37)

• Bir sonraki adımda ise **her bir iterasyon için uç hız kaybı faktörü** 38 nolu denklem ile hesaplanabilir.

$$F_{i,j} = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cos^{-1} \left\{ \exp\left[\frac{-\left(\frac{B}{2}\right)\left[1 - \left(\frac{r_i}{R}\right)\right]}{\left(\frac{r_i}{R}\right) \sin \varphi_{i,j}}\right] \right\}$$
(38)

• Her bir iterasyon için hesaplanan hücum açısı 39 nolu formül ile elde edilir ve bu değere karşılık gelen kanat profilinin deneysel verilerinden C_L ve C_D katsayıları elde edilir.

$$\alpha_{i,j} = \varphi_{i,j} - \theta_{p,i} \tag{39}$$

- Sonraki adımda itme katsayısının bulunması gerekmektedir.
- İtme katsayısı aynı güç katsayısına benzer bir şekilde itme kuvveti ile dinamik kuvvetin oranıdır ve 40 nolu formül ile daha iyi açıklanabilir:

$$C_{T} = \frac{\frac{1}{2}\rho V^{2}A \left[4a(1-a)\right]}{\frac{1}{2}\rho V^{2}A}$$
(40)

- Eksenel indüksiyon faktörünün değeri maksimum yani 1/3 olması durumunda $C_T = 8/9$ değerinde olmaktadır.
- Her bir kanat elemanındaki itme katsayısı 41 nolu formül ile hesaplanır:

$$C_{T,i,j} = \frac{\sigma_i' (1 - a_{i,j})^2 (C_{L,i,j} \cos \varphi_{i,j} + C_{D,i,j} \sin \varphi_{i,j})}{\sin^2 \varphi_{i,j}}$$
(41)

• Bir sonraki iterasyon için yeni eksenel indüksiyon faktörü hesabı 42 ve 43 nolu formüller ile şarta bağlanmıştır.

Eğer;
$$C_{T,i,j} < 0,96$$
:
 $a_{i,j+1} = \frac{1}{\left[1 + \frac{4F_{i,j}\sin^2(\varphi_{i,j})}{\sigma'C_{L,i,j}\cos\varphi_{i,j}}\right]}}$
(42)
$$a_{i,j+1} = \left(1/F_{i,j}\right) \left[0,143 + \sqrt{0,0203 - 0,6427(0,889 - C_{T,i,j})}\right]$$
(43)

• Bir sonraki iterasyon için açısal indüksiyon faktörü 44 nolu formül ile hesaplanır.

$$a_{i,j+1}' = \frac{1}{\frac{4F_{i,j}\cos\varphi_{i,j}}{\sigma C_{L,i,j}} - 1}$$
(44)

• Çıkan yeni $a_{i,1}$ ve $a'_{i,1}$ değerleri bir sonraki iterasyonda kullanılmak üzere bağıl dönme açısı denklemine yerleştirilir ve **kabul edilebilir tolerans içinde olana kadar iterasyon tekrar edilir**. İterasyon sonuçlandığında, son iterasyondaki hücum açısına göre C_L ve C_D katsayıları kanat profili verilerinden elde edilir ve güç katsayısı formülüne yerleştirilir.

N3 r/R= 0,35									а	a'	İterasyon	
σ	λ	φ (radyan)	θ (Radyan)	α (Radyan)	α (Derece)	f	Cl	Cd	СТ	0,329107	0,0400696	1
0,08	2,30	0,27	0,09	0,19	10,6551	0,999998	1,94659	0,0384631	0,93528	0,340642	0,0422898	2
0,08	2,30	0,27	0,09	0,18	10,3676	0,999998	1,936353	0,0370345	0,93278	0,347931	0,041997	3
0,08	2,30	0,27	0,09	0,18	10,2097	0,999998	1,930363	0,0363456	0,92854	0,351984	0,0418288	4
0,08	2,30	0,26	0,09	0,18	10,1218	0,999998	1,926915	0,0359904	0,92613	0,354256	0,0417329	5
0,08	2,30	0,26	0,09	0,18	10,0726	0,999998	1,924946	0,0357998	0,92477	0,355534	0,0416784	6
0,08	2,30	0,26	0,09	0,18	10,0448	0,999998	1,923827	0,0356951	0,92399	0,356256	0,0416475	7
0,08	2,30	0,26	0,09	0,18	10,0292	0,999998	1,923191	0,0356369	0,92355	0,356663	0,04163	8
0,08	2,30	0,26	0,09	0,17	10,0203	0,999998	1,922831	0,0356043	0,9233	0,356894	0,0416201	9
0,08	2,30	0,26	0,09	0,17	10,0153	0,999998	1,922627	0,0355859	0,92316	0,357024	0,0416145	10
0,08	2,30	0,26	0,09	0,17	10,0125	0,999998	1,922511	0,0355755	0,92308	0,357098	0,0416113	11
0,08	2,30	0,26	0,09	0,17	10,0109	0,999998	1,922446	0,0355697	0,92304	0,35714	0,0416095	12
0,08	2,30	0,26	0,09	0,17	10,01	0,999998	1,922409	0,0355664	0,92301	0,357164	0,0416085	13
0,08	2,30	0,26	0,09	0,17	10,0095	0,999998	1,922388	0,0355645	0,923	0,357177	0,0416079	14
0,08	2,30	0,26	0,09	0,17	10,0092	0,999998	1,922376	0,0355634	0,92299	0,357185	0,0416076	15
0,08	2,30	0,26	0,09	0,17	10,009	0,999998	1,922369	0,0355628	0,92299	0,357189	0,0416074	16
0,08	2,30	0,26	0,09	0,17	10,0089	0,999998	1,922365	0,0355625	0,92298	0,357191	0,0416073	17
0,08	2,30	0,26	0,09	0,17	10,0089	0,999998	1,922363	0,0355623	0,92298	0,357193	0,0416072	18
0,08	2,30	0,26	0,09	0,17	10,0088	0,999998	1,922362	0,0355622	0,92298	0,357193	0,0416072	19
0,08	2,30	0,26	0,09	0,17	10,0088	0,999998	1,922361	0,0355621	0,92298	0,357194	0,0416072	20
0,08	2,30	0,26	0,09	0,17	10,0088	0,999998	1,922361	0,0355621	0,92298	0,357194	0,0416071	21
0,08	2,30	0,26	0,09	0,17	10,0088	0,999998	1,922361	0,0355621	0,92298	0,357194	0,0416071	22

5.3 Güç katsayısının hesaplanması

$$C_{p} = \frac{8}{\lambda N} \sum_{i=k}^{N} F_{i} \sin^{2} \varphi_{i} \left(\cos \varphi_{i} - \lambda_{r,i} \sin \varphi_{i} \right) \left(\sin \varphi_{i} + \lambda_{r,i} \cos \varphi_{i} \right) \left[1 - \left(\frac{C_{D}}{C_{L}} \right) \cot \varphi_{i} \right] \lambda_{r,i}^{2}$$
(45)

- Rüzgar türbini kanadının parçalara ayrılan her bir elemanı için hesaplanan değerler sonucunda her eleman için güç katsayısı 45 nolu denklem ile hesaplanır ve tüm değerler toplanır.
- Güç katsayısının tüm hesaplamaları tamamlandıktan sonra rotorun performans analizinde kullanılacak olan optimum uç hız oranının belirlenmesi için yandaki şekilde gösterildiği gibi **güç katsayısı ve kanat uç hızı eğrisi,** C_P - λ , oluşturulur.
- Maksimum güç oranına denk gelen uç hız oranı rotor tasarımı için kullanılabilir ve tüm hesaplamalar belirlenen kanat uç hız oranı ile tekrardan yapılmalıdır.
- Çalışma kapsamında tüm kanatların kanat uç hızları 6,576 olarak belirlenmiştir.



• 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 aşağıdaki şekil ile gösterilmiştir.



Kanat Üzerindeki Kuvvetlerin gösterilmesi

Kanat profili üzerindeki tüm açılar ve kanat üzerine etki eden kuvvetler;

- F_L (N) kaldırma kuvveti
- F_D (N) sürüklenme kuvveti
- F_N (N) kanat dönüş düzlemine dik oluşan kuvvettir bu kuvvet itmedir.
- F_T (N) kanadın süpürdüğü çevreye teğetsel kuvvettir ve asıl yararlı torku üreten kuvvettir.

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho V_{ba\breve{g}l}^2 (C_L \cos\varphi + C_D \sin\varphi) c dr$$

$$dF_T = B \frac{1}{2} \rho V_{bağıl}^2 (C_L \sin\varphi - C_D \cos\varphi) c dr$$

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho V_{ba\breve{g}l}^2 (C_L \sin\varphi - C_D \cos\varphi) crdr$$



6. Sonuç

Kanat Tipi	Rüzgar Hızı	Kanat Uç Hız Oranı	Güç Katsayısı	Güç	Tork	Tork Kuvveti	İtme Kuvveti
	Vrüzgar (m/s)	λ	Ср	P (Watt)	Q (Nm)	FN (N)	FT(N)
S1210 (burulmalı)	5	6,58	0,458	440,74	26,81	23,18	151,58
S1210 (burulmasız)	5	6,58	0,431	414,99	25,21	22,02	128,58
NACA0015	5	6,58	0,447	429,79	26,14	22,68	151,66

	Cp Farkı	En Uzunluğu Farkı
S1210 Burulma açılı ve burulma açısız	6,20%	-
S1210 Burulma açılı ve NACA0015 burulma açılı	2,55%	136%

S1210









TEŞEKKÜR EDERİZ..





KAYNAKLAR

- http://www.cleantechnica.com
- http://www.en.wind-turbine-models.com
- <u>http://www.thenewecologist.com</u>
- http://www.arising.com.au
- <u>https://renewableteacher.wordpress.com</u>
- http://energyeducation.ca
- 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.
- Martin O.L.H., 2008, Aerodynamics of Wind Turbines Second Edition, London, Sterling, VA.
- Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E., 2001, Wind Energy Handbook, Wiley, UK.
- 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.
- Tummala A., Ratna K. V., Dipankur K. S., Indraja V., Hari Krishna V., 2016, A review on small scale wind turbines, Renewable and Sustainable Energy Reviews 56, s. 1351–1371.
- Maryam R., Horia H., 2012, Aerodynamic Performance of a Small Horizontal Axis Wind Turbine, Journal of Solar

- 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.
- Tuzcu H., 2017, Binalar için Yenilenebilir Hibrit Enerjili Sistemlerin Ekserji ve Eksergoekonomik Analizleri, Doktora Tezi.
- Salmanoğlu F., Çetin N.S., 2012, İzmir İlinin DMİ ve REPA Kaynaklı Rüzgâr Hızı Verilerinin İlçeler Bazında Karşılaştırılması, Tesisat Mühendisliği 131, s. 53-60.
- Koç E.,Kaya K., 2015, Yatay Eksenli Rüzgar Türbin Kanatlarının Mekanik Tasarım Esasları Teorik Model, İzmir Rüzgâr Sempozyumu 3.
- 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.
- Lissaman P. B. S., 1983, Low-Reynolds Number Airfoils, Ann. Rev. Fluid Mech. 15, s. 223-239.
- 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.

- 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.
- www.airfoiltool.com
- John M., 2012, Design and Optimization of a Small Wind Turbine, Rensselaer Polytechnic Institute Hartford, Connecticut.
- 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.
- Klunk E., Yılmaz N., 2009, HAWT Rotor Design and Performance Analysis, Proceedings of the ASME 2009 3rd International Conference of Energy Sustainability.
- Brondsted P., Nijssen P.L. Rogier, 2013, Advances In Wind Turbine Blade Design and Materials, First published 2013, Woodhead Publishing Limited, UK.