

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin dinamik davranışı-teorik bir model

Mahmut Can ŞENEL*, Erdem KOÇ

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 55210, Samsun

Özet

Bu çalışmada, yatay eksenli üç kanatlı rüzgâr türbinlerinde, türbin elemanlarının temel dinamik davranışları için enerji dönüşümleri esas alınarak teorik yeni bir model oluşturulmuştur. Bu model ile tasarım parametreleri, kanat fiziksel ve geometrik büyüklükleri değerlendirilip, moment eşitliklerinden faydalanılarak türbinin dinamik davranışı belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca boyutlu parametreler boyutsuzlaştırılarak birçok parametrenin etkisi geniş bir aralıkta analiz edilmiştir. Rüzgar gücünün ne oranda jeneratöre iletiildiğini tahmin etmek amacıyla; yeni boyutsuz bir parametre olan türbin etkinlik katsayısı tanımlanarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar türbini, dinamik analiz, teorik model.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Mahmut Can ŞENEL. mahmutcan.senel@omu.edu.tr; Tel: (362) 312 19 19 (1315)

Dynamic behaviour of horizontal axis wind turbines-a theoretical model

Extended abstract

Within renewable energy sources, wind energy is a natural, clean energy source being observed that there is increasing use in recent years. Wind turbines are used to generate electricity energy from wind energy. Kinetic energy in wind turbine blades is converted into mechanical energy via power transmission systems, then, electrical energy is obtained from generator. They are classified as horizontal axis and vertical axis wind turbines according to the axis of rotation.

In horizontal axis wind turbines, various power transmission mechanisms have been developed in order to obtain torque and power. These are direct drive, integrated, and conventional power transmission mechanisms. In a direct drive power transmission mechanism, torque and power are transmitted to the generator through a rotor. In an integrated power transmission mechanism, a gearbox and rotor are both used. In this study, conventional power transmission mechanism was used.

Moreover, aerodynamic theories are used to determine the effect that wind has on the forces, torque, and power of blades of horizontal axis wind turbines. There are three main aerodynamic theories (one-dimensional linear momentum theory, actuator disc momentum theory and blade element theory) related to wind turbine aerodynamics. One-dimensional momentum theory examines the force on the disc in the air flow tube. It is assumed that the disc consists of an infinite number of blades. The maximum power coefficient is limited to 0.593 based on Betz' Law. Actuator disc momentum theory assumes that the disc consists of an infinite number of blades. Additionally, friction caused by the blade is neglected but the vortex effect of the flow is considered. Blade element theory is used to determine the forces and torque that affect on aerofoil. In present study, two different aerodynamic theories (actuator disc momentum theory, blade element theory) investigated in order to define the amount of torque affecting on the blades

In this study, a new theoretical model was designed based on energy conversion for basic dynamic behaviour of the three blades-horizontal axis wind turbines. By this model, dynamic behaviour of wind turbine was assessed by evaluating design parameters, geometrical and physical sizes of the blade in accordance with torque equations. In addition, dimensional parameters were converted to dimensionless parameters. Thus, effect of many parameters such as wind speed, blade radius, mass of the blades, power coefficient, tip-speed ratio, axial induction factor and angular induction factor were analyzed.

By this model, various dimensional torques could be estimated by changing m_R , R , V and α_G in the same nondimensional torque. Consequently, it was found that N_{G1} is very close to the nominal power of the referenced wind turbine (2 MW).

Different dimensionless parameters so called as the coefficient of effectiveness (K_{i1} , K_{i2}) were defined in order to estimate the wind power transmitted to the generator and they were used for analyzing the wind turbines. It was determined that the dimensional parameters (wind speed (V), blade radius (R), the mass of the blades (m_R)) and the non-dimensional parameters (tip-speed ratio (λ), blade angle (θ), power coefficient (C_P)) directly affected the coefficient of effectiveness (K_i).

In conclusion, K_{i1} and K_{i2} could be 0.38 and 0.37 respectively if the wind turbine parameters being as $m_R=19500$ kg, $R=39.5$ m, $i=100$. In addition, it was approximately determined that 38% of wind power was transmitted to the generator. When K_i values were compared to C_P values (when $C_P=0.40-0.45$), the K_i values were less than the C_P values.

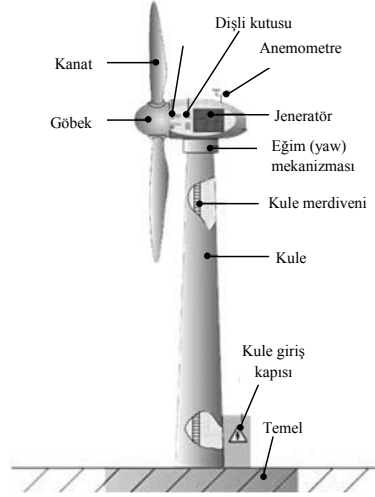
Finally, this theoretical model presents a more realistic approach in terms of estimating the main parameters of wind turbine. Consequently, it is suggested that this theoretical study is used as a model for designing horizontal axis wind turbines.

Keywords: Wind turbine, dynamic analysis, theoretical model.

Giriş

Enerji, ekonomik, sosyal ve kültürel kalkınmanın temel girdilerden biri konumundadır. Artan dünya nüfusu, modern hayatın getirdiği yenilikler, teknolojinin gelişimiyle birlikte üretilen enerjinin kullanılacağı yeni alanların ortaya çıkması enerjiye olan bağımlılığımızın artmasına sebep olmaktadır. Bu durumda sürdürülebilir bir dengenin oluşturulabilmesi için enerji kaynak çeşitliliğinin sağlanması ve fosil yakıtlı enerji kaynaklarının yanında, yenilenebilir enerji kaynaklarının da kullanıma sunulması büyük önem arz etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında elektrik üretimi konusunda en fazla ümit veren enerji kaynağı rüzgar enerjisi olarak görülmektedir. Rüzgâr enerjisi, güneş radyasyonunun yeryüzeyini farklı ısıtmasından kaynaklanmaktadır. Yeryüzeyinin farklı ısınması, havanın sıcaklığının, neminin ve basıncının farklı olmasına, bu basınç farkları da havanın hareketine neden olmaktadır. Yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru olan bu hava hareketi de rüzgârı oluşturmaktadır. Rüzgâr, güneş enerjisinin dolaylı bir ürünüdür. Güneş ışınları olduğu sürece rüzgâr olacaktır. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin yaklaşık %1-2'si rüzgâr enerjisine çevrilmektedir (Öztürk ve Çelik, 2006; Şenel, 2012).

Rüzgar enerjisinden faydalanarak elektrik enerjisi üretmek amacıyla rüzgar türbinleri kullanılmaktadır. Rüzgar türbinleri dönme eksenine göre; yatay ve düşey eksenli rüzgar türbinleri olarak sınıflandırılabilir. Enerji üretimi amacıyla günümüzde modern yatay eksenli rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Bu tip rüzgâr türbinlerinin ömrü, türbin kalitesine ve yerel iklim özelliklerine göre değişmekle beraber ortalama 20-25 yıldır. Yatay eksenli rüzgar türbinleri temel olarak; kanatlar, göbek, kule, dişli kutusu, jeneratör, yatak, kavrama, eğim (yaw) mekanizması, kanat döndürme (pitch) mekanizması ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır (Şenel, 2012).



Şekil 1. Yatay eksenli rüzgar türbini yapısı (Koç ve Şenel, 2011)

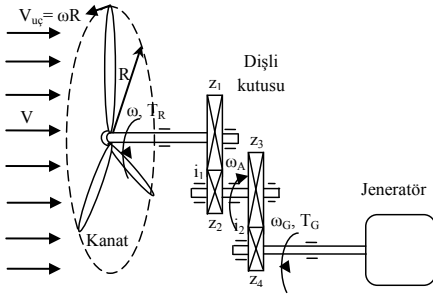
Rüzgar türbinlerinde moment ve güç iletimi amacıyla farklı tür güç iletim sistemleri geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın kullanılanı kanatlardan alınan moment ve gücü, dişli kutusu üzerinden jeneratöre ileten sistemlerdir. Ayrıca dişli kutusu bulundurmeyen kanatlardaki dönüş hızının doğrudan jeneratöre aktarıldığı doğrudan sürütlü güç iletim sistemleri de rüzgar türbinlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Rüzgar türbini tasarımı ve dinamik analiziyle ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur. Ata ve Çetin (2008), yürüttükleri çalışmada Celal Bayar Üniversitesi Kırkağaç Yerleşkesine yerleştirilmek üzere 3 kWh enerji kapasiteli şebeke bağlantısız (otonom) üç kanatlı bir rüzgâr türbini tasarlayıp mekanik olarak enerji verimini başka bir sistemle karşılaştırmışlardır. Yürütülen bir diğer çalışmada Gregg vd. (2010), kanat eleman teorisi, uç-hız oranı (λ), güç ve verim gibi temel eşitliklerden faydalanarak rüzgar türbini için teorik bir model oluşturup bu parametrelerin değişimini analiz etmişlerdir. Huiying vd. (2010), yürüttükleri çalışmada rüzgâr türbini güç iletim sistemi seçim prensipleri ve mühendislik uygulamalarındaki önemi üzerinde durmuşlardır.

Bu çalışmada ise; tasarım parametrelerine (i , λ , θ , C_p , C_Q), çalışma parametrelerine (V , ω , ω_G , α , α_G), türbin geometrik ve fiziksel büyüklüklerine (R , m_R) bağlı olarak türbin elemanlarının enerji dönüşümleri esas alınıp teorik yeni bir dinamik model oluşturulmuştur. Bu model ile türbinin dinamik davranışı analiz edilmiştir. Ayrıca rüzgâr gücünün ne oranda jeneratöre iletildiğini tahmin etmek amacıyla; türbin etkinlik katsayısı diye yeni boyutsuz bir parametre tanımlanarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Rüzgâr türbini tasarım esasları

Rüzgâr türbinlerinde, güç/enerji oluşumu rüzgâr hızı ile kanatlarda başlamaktadır. Kanatlar tarafından rüzgârdan elde edilen kinetik enerji mekanik enerjiye dönüştürülerek güç iletim elemanları yardımıyla dişli kutusuna aktarılmaktadır. Dişli kutusu, kanatlarda oluşan düşük hız yüksek torku, yüksek hız düşük torka dönüştürüp jeneratöre iletmektedir. Jeneratörde ise hızı artmış, torku düşürülmüş mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanıcıya gönderilmektedir. Kanatlar, iki kademeli alın dişli kutusu ve jeneratörden oluşan yatay eksenli bir rüzgâr türbin modeli Şekil 2’de sunulmuştur.



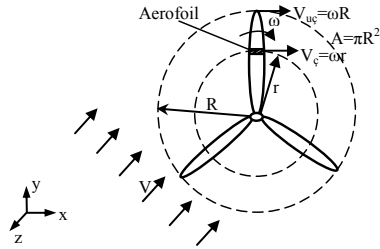
Şekil 2. Rüzgâr türbin güç/enerji iletimi

Rüzgâr türbini tasarımının gerçekleştirilebilmesi için öncelikle tasarım parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunlar; uç-hız oranı (λ), kanat açısı (θ), güç katsayısı (C_p), tork (moment) katsayısı (C_Q), itki katsayısı (C_T) ve çevrim oranı (i) gibi parametrelerdir. Bu parametreler kısaca aşağıda izah edilmiştir.

-Uç-hız oranı: Rüzgâr türbini performans analizinde önemli bir parametre olan uç-hız oranı, kanat uç hızının ($V_{uç}=\omega R$) rüzgâr hızına (V) oranıdır. Uç-hız oranı Eşitlik (1)’de verilmiş olup kanat yarıçapına (R), kanat açısına (ω) ve rüzgâr hızına (V) bağlıdır (Şekil 3).

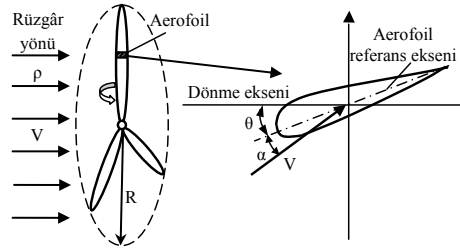
$$l = V_{uç} / V = \omega R / V \quad (1)$$

Tek kanatlı rüzgâr türbinlerinde kanatlar çok hızlı döndüğünden uç-hız oranı (λ) 6-20 arasıdayken, üç kanatlı rüzgâr türbinlerinde uç-hız oranı (λ) 5-8 civarındadır (Emniyetli, 2007).



Şekil 3. Rüzgâr türbini kanat uç-hız oranı

- Kanat açısı: Rüzgâr türbini kanatları aerofoil olarak tanımlanan özel kanat kesitlerinden oluşmaktadır. Kanadın kanat döndürme (pitch) mekanizmasıyla kendi eksenini etrafında döndürülmesi sonucunda aerofoil referans eksenine dönme eksenine arasında kalan açı kanat açısı (θ) olarak tanımlanmaktadır. Bu açı, kanat boyunca bir aerofoilden diğerine değişmektedir. Kanat açısı (θ) ve hücum açısı (α) Şekil 4’de gösterilmiştir.



Şekil 4. Rüzgâr türbini kanat açısı

- **Güç katsayısı:** Rüzgâr türbinlerinde rüzgâr gücünün hangi oranda kanatlara aktarıldığının belirlenmesi oldukça önemlidir. Güç katsayısı (C_p), en genel anlamda kanatların rüzgârdan elde ettiği gücün (N_R) rüzgâr gücüne (N) oranı şeklinde tanımlanmakta olup;

$$C_p = N_R / N = N_R / (0.5\rho R^2 V^3) \quad (2)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada V rüzgâr hızı, ρ havanın yoğunluğu, R kanat yarıçapı olarak verilmektedir. Maksimum güç katsayısı aerodinamik olarak lineer momentum teorisine göre betz limitini ($C_{pmax}=0.593$) aşmamaktadır. Modern yatay eksenli rüzgar türbinlerinde ise kanat uç kayıpları, kanat profil kayıpları v.b. kayıplar dikkate alındığında maksimum güç katsayısı 0.40-0.45 arasındadır.

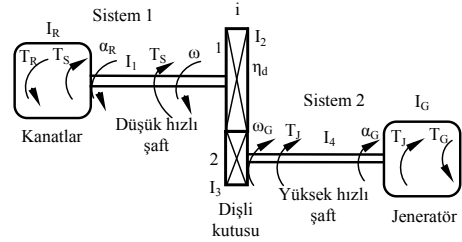
Rüzgar türbini tasarımında kullanılan diğer tasarım parametreleri (eksenel indüksiyon faktörü (a), açısall indüksiyon faktörü (a'), tork katsayısı (C_Q), itki katsayısı (C_T) ve çevrim oranı(i)) Tablo 1'de toplu halde verilmiştir.

Tablo 1. Rüzgâr türbini tasarım parametreleri

Parametre	Formül	Açıklama
Eksenel indüksiyon faktörü	$a = \frac{(V - V_2)}{V}$	Lineer momentum teorisine dayanmaktadır. V: Kanatların yeterince önündeki rüzgar hızı V ₂ : Kanatların hemen önündeki rüzgar hızı
Açısall indüksiyon faktörü	$a' = \frac{W}{2w}$	Dönen disk için momentum teorisine dayanmaktadır. Ω ve ω : Rüzgarın ve kanadın dönüş hızı
Tork katsayısı	$C_Q = C_p / i$	Güç katsayısının uç-hız oranına oranıdır.
İtki katsayısı	$C_T = C_Q / R$	Tork katsayısının, kanat yarıçapına oranıdır.
Çevrim oranı	$i = \frac{\omega_G}{\omega} = \frac{a_G}{a_R}$ $i > 1$	ω ve ω_G : Düşük ve yüksek hızlı şaftın açısal hızı a_R ve a_G : Düşük ve yüksek hızlı şaftın açısal ivmesi

Rüzgar türbini dinamik analiz-teorik model

Yatay eksenli üç kanatlı bir rüzgâr türbininde, türbin elemanlarının temel dinamik davranışları için enerji dönüşümleri esas alınarak Şekil 5'de şematik olarak gösterildiği gibi teorik yeni bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan teorik modelde rüzgar türbini temel olarak; kanatlar, düşük hızlı şaft, dişli kutusu, yüksek hızlı şaft ve jeneratörden oluşmaktadır. Teorik modelde kullanılan dişli kutusu i çevrim oranında silindirik düz alın dişlilerden oluşmaktadır. Ayrıca sistemde sincap kafesli asenkron bir jeneratör kullanılmıştır. Sistemde, düşük ve yüksek hızlı şaftların (transmisyon millerinin) kütlelerinden dolayı oluşan kütlelel atalet momenti (I_1 ve I_4) ve dişlilerin kütlelel atalet momentine (I_2 ve I_3), kanatların kütlelel atalet momentine (I_R) göre çok küçük olduğundan ihmal edilmiştir (Şenel ve Koç, 2013).



Şekil 5. Rüzgâr türbini teorik modeli

Rüzgar türbini tasarımında rüzgar hızından en verimli şekilde yararlanıp elektrik enerjisi elde edebilmek için türbin temel elemanlarının seçilmesi, boyutlandırılması, gerekli güç ve moment hesaplarının yapılması gerekmektedir.

-Rüzgar türbin kanatlarında oluşan moment:

Rüzgar türbinlerinde moment ve güç iletimi kanatlarda başlamaktadır. Kanatlarda oluşan moment farklı yaklaşımlarla belirlenebilmektedir. Kanat eleman teorisine dayanarak rüzgarın etkisiyle kanatlarda oluşan moment (T_{R1});

$$T_{R1} = 0.5\rho R^3 V^2 C_Q \quad (3)$$

şeklinde. Burada V rüzgar hızı (m/s), R kanat yarıçapı (m), ρ hava yoğunluğu (kg/m^3), C_Q tork katsayısıdır. Rüzgârın etkisiyle kanatlarda oluşan moment boyutsuzlaştırılırsa;

$$\bar{T}_{R1} = 0.5\pi C_P / \lambda \quad (4)$$

şeklinde elde edilir. Burada,

$$\bar{T}_{R1} = T_{R1} / (\rho V^2 R^3) \quad (5)$$

şeklinde tanımlanan boyutsuz rüzgar etkisiyle kanatlarda oluşan moment olup boyutlu parametreler ρ , V ve R 'ye bağlıdır. Boyutsuz moment ifadesi, C_P ve λ 'ya bağlı olarak bir defa tespit edildikten sonra Eşitlik (5) kullanılarak değişik hava yoğunluğu, rüzgar hızı ve kanat yarıçapında, geniş bir aralıkta boyutlu moment (T_{R1}) belirlenebilmektedir.

Dönen disk için momentum teorisine dayanarak $\lambda = \omega R / V$ tanımı kullanılıp rüzgârın etkisiyle kanatlarda oluşan moment (T_{R2});

$$T_{R2} = a'(1 - a)\rho V \omega R^4 \pi \quad (6)$$

şeklinde. Burada a aksel indüksiyon faktörü, a' açılmal indüksiyon faktörü olup boyutsuz moment;

$$\bar{T}_{R2} = a'(1 - a)\lambda \pi \quad (7)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada,

$$\bar{T}_{R2} = T_{R2} / (\rho V^2 R^3) \quad (8)$$

şeklinde ifade edilen boyutsuz momenttir.

- Rüzgar türbini jeneratör moment:

Rüzgar türbin teorik modelinde sistem 1 için kullanılan temel parametreler sırasıyla; T_R rüzgârın etkisiyle kanatlarda oluşan moment (Nm), T_S dişli kutusu giriş momenti (Nm), I_R kanatların kütleselele atalet momenti (kgm^2), ω kanatların açılmal hızı (rad/s), α_R kanatların açılmal ivmesi (rad/s^2), η_d dişli verimi şeklindedir. Sistem 1 için moment eşitliği;

$$T_R - T_S = I_R \alpha_R \quad (9)$$

şeklinde bulunur. Sistem 2 için kullanılan temel parametreler sırasıyla; T_J dişli kutusu çıkış momenti (Nm), T_G jeneratör momenti (Nm), I_G jeneratörün kütleselele atalet momenti (kgm^2), $I_{eş}$ kütleselele eşdeğer atalet momenti (kgm^2), ω_G yüksek hızlı şaftın açılmal hızı (rad/s), α_G yüksek hızlı şaftın açılmal ivmesi (rad/s^2) şeklindedir. Sistem 2 için moment eşitliği;

$$T_J - T_G = I_G \alpha_G \quad (10)$$

şeklinde belirlenmiştir. Dişli verimi (η_d) ve çevrim oranına (i) bağlı olarak dişli kutusu giriş momenti (T_S) ve dişli kutusu çıkış veya jeneratör giriş momenti (T_J) arasındaki ilişki;

$$T_J = T_S \eta_d / i \quad (11)$$

Sistem 1 ve sistem 2, birlikte değerlendirilip moment tek mile indirgenirse jeneratör momenti (T_G);

$$T_G = T_R \eta_d / i - I_{eş} \alpha_G \quad (12)$$

şeklinde elde edilir. Eşitlikte yer alan $I_{eş}$;

$$I_{eş} = I_R \eta_d / i^2 + I_G \quad (13)$$

sistemin kütleselele eşdeğer atalet momenti olarak tanımlanmaktadır. Burada, I_R kanatların kütleselele atalet momenti (kgm^2), I_G jeneratörün kütleselele atalet momenti (kgm^2), i çevrim oranı, η_d dişli verimi şeklinde ifade edilmektedir.

Dişli verimi (η_d), dişli kutusu çıkışındaki enerjinin dişli kutusu girişindeki enerjiye oranı olarak tanımlanabilmektedir. Bu durumda dişli verimi;

$$\eta_d = (0.5 I_G \omega_G^2) / (0.5 I_R \omega^2) = I_G i^2 / I_R \quad (14)$$

şeklinde belirlenmektedir. Kanatlar, kütlelerinden dolayı $I_R = m_R R_{eş}^2$ büyüklüğünde bir kütleselele atalet momentine (I_R) sahiptir. Tek bir kanadın kütlesi m_R ' olarak alındığında; kanatların toplam kütlesi $m_R = 3m_k$ olmaktadır. Kanatların geometrik yapısından dolayı kanatlar göbeğe yakın bölgelerde daha kalın kesitlidir. Bu nedenle kanat ağırlık merkezinin göbeğe olan uzaklığı ($R_{eş}$), kanat yarıçapının yaklaşık üçte

biri ($R/3$) olarak kabul edilmektedir (Morren vd., 2006). Bu durumda kanatların kütsel atalet momenti (I_R);

$$I_R = m_R R_{e_s}^2 = (m_R R^2)/9 \quad (15)$$

olarak bulunmaktadır. Burada m_R kanatların toplam kütselidir (kg). I_R karşılığı (Eşitlik (15)) kullanılarak sistemin kütsel eşdeğer atalet momenti (I_{e_s}) ifadesi;

$$I_{e_s} = (2m_R R^2 \eta_d)/(9i^2) \quad (16)$$

şeklinde yeniden düzenlenebilmektedir. Bu elde edilen büyüklükler (I_R , I_G , I_{e_s} , η_d) ve moment eşitlikleri (T_{R1} , T_{R2} , T_{R1} , T_{R2}) kullanılarak farklı yaklaşımlarla jeneratör momenti (T_G) bulunabilmektedir.

Jeneratör momenti genel ifadesinde (Eşitlik (12)), T_{R1} ve I_{e_s} ifadesi kullanılırsa jeneratör momenti (T_{G1});

$$T_{G1} = \frac{R^2 \eta_d}{18i} \left(9\rho\pi R V^2 C_Q - \frac{4m_R \alpha_G}{i} \right) \quad (17)$$

şeklinde bulunmaktadır. Bu ifade yardımıyla C_Q tork katsayısı, i dişli çevrim oranı, α_G yüksek hızlı şaftın açısız ivmesi, η_d dişli verimi, R kanat yarıçapı ve V rüzgar hızı cinsinden boyutlu olarak jeneratör momenti hesaplanabilmektedir.

Jeneratör momentini (T_G) boyutsuzlaştırmak amacıyla kullanılan yüksek hızlı şaft açısız ivmesinin (α_G), kanatların toplam kütselinin (m_R), kanat yarıçapının (R), yüksek hızlı şaft açısız hızının (ω_G) ve eşdeğer atalet momentinin (I_{e_s}) boyutsuz ifadeleri;

$$\bar{\alpha}_G = \alpha_G R^2 / V^2 \quad (18)$$

$$\bar{m}_R = m_R / \rho R^3 \quad (19)$$

$$\bar{R} = \rho V^2 R / (m_R \alpha_G) \quad (20)$$

$$\bar{\omega}_G = \omega_G R / V \quad (21)$$

$$\bar{I}_{e_s} = I_{e_s} / (m_R R^2) \quad (22)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Jeneratör momenti genel ifadesi (Eşitlik (12)) esas alınarak \bar{T}_{R1} ,

\bar{I}_{e_s} , $\bar{\alpha}_G$ ve \bar{m}_R ifadeleri değerlendirildiğinde boyutsuz jeneratör momenti (\bar{T}_{G1});

$$\bar{T}_{G1} = \bar{T}_{R1} \eta_d / (i \bar{m}_R) - \bar{I}_{e_s} \bar{\alpha}_G \quad (23)$$

şeklinde bulunup \bar{T}_{R1} karşılığı yerleştirilirse;

$$\bar{T}_{G1} = C_p \pi \eta_d / (2\lambda i \bar{m}_R) - \bar{I}_{e_s} \bar{\alpha}_G \quad (24)$$

şeklinde belirlenmiştir. Burada,

$$\bar{T}_{G1} = T_{G1} / m_R V^2 \quad (25)$$

şeklinde tanımlanan boyutsuz jeneratör momentidir.

Jeneratör momenti genel ifadesinde (Eşitlik (12)), T_{R2} ve I_{e_s} karşılıkları kullanılıp gerekli düzenlemeler yapılırsa jeneratör momenti (T_{G2});

$$T_{G2} = \frac{R^2 \eta_d}{i} \left(a'(1-a)\rho V \omega R^2 \pi - \frac{2m_R \alpha_G}{9i} \right) \quad (26)$$

şeklinde elde edilir. Bu ifade yardımıyla η_d dişli verimi, i çevrim oranı, R kanat yarıçapı, α_G yüksek hızlı şaftın açısız ivmesi, V rüzgar hızı, ω kanat dönüş hızı, ρ hava yoğunluğu, m_R kanatların toplam kütseli, a eksenel indüksiyon faktörü, a' açısız indüksiyon faktörü cinsinden jeneratör momenti boyutlu olarak hesaplanabilmektedir.

Jeneratör momenti genel ifadesi (Eşitlik (12)) esas alınarak \bar{T}_{R2} , \bar{I}_{e_s} , $\bar{\alpha}_G$ ve \bar{m}_R ifadeleri değerlendirildiğinde boyutsuz jeneratör momenti (\bar{T}_{G2});

$$\bar{T}_{G2} = \bar{T}_{R2} \eta_d / (i \bar{m}_R) - \bar{I}_{e_s} \bar{\alpha}_G \quad (27)$$

şeklinde bulunup \bar{T}_{R2} karşılığı yerleştirilirse;

$$\bar{T}_{G2} = \frac{a'(1-a)\lambda \pi \eta_d}{i \bar{m}_R} - \bar{I}_{e_s} \bar{\alpha}_G \quad (28)$$

şekline dönüşür. Burada,

$$\bar{T}_{G2} = T_{G2} / (m_R V^2) \quad (29)$$

şeklinde ifade edilen boyutsuz jeneratör momentidir.

-Rüzgâr türbinlerinde kanatlar tarafından rüzgârdan elde edilen güç:

Rüzgâr türbinlerinde kanatlarda oluşan moment (T_{R1}) ve açısal hız (ω) değerlendirilerek kanatlara iletilen güç kolaylıkla belirlenebilmektedir. Bu durumda kanatlar tarafından rüzgârdan elde edilen güç (N_{R1});

$$N_{R1} = T_{R1} \times \omega = 0.5\rho\pi R^2 V^3 C_p \quad (30)$$

olarak bulunabilmektedir. Bu ifadeden, R kanat yarıçapı, V rüzgâr hızı ve C_p güç katsayısının kanatlar tarafından rüzgârdan elde edilen gücü belirleyen temel parametreler olduğu görülmektedir. N_{R1} ifadesi esas alınarak, kanatlar tarafından rüzgârdan elde edilen boyutsuz güç (\bar{N}_{R1});

$$\bar{N}_{R1} = 0.5C_p\pi \quad (31)$$

şeklinde bulunmuştur. Burada,

$$\bar{N}_{R1} = N_{R1}/(\rho V^3 R^2) \quad (32)$$

şeklinde tanımlanan kanatlar tarafından rüzgârdan elde edilen boyutsuz güçtür.

Kanatlar tarafından rüzgârdan elde edilen moment (T_{R2}) ve kanatların dönüş hızı (ω) değerlendirilip gerekli düzenlemeler yapıldığında kanatlar tarafından rüzgârdan elde edilen güç (N_{R2});

$$N_{R2} = T_{R2} \times \omega = a'(1-a)\rho V \omega^2 R^4 \pi \quad (33)$$

şeklinde bulunabilmektedir. Bu ifade yardımıyla da a eksenel indüksiyon faktörü, a' açısal indüksiyon faktörü, V rüzgâr hızı, ω kanat dönüş hızı, R kanat yarıçapı gibi temel parametreler bilindiğinde kanatlardan üretilen güç boyutlu olarak bulunabilmektedir. N_{R2} esas alınarak, kanatlar tarafından rüzgârdan elde edilen boyutsuz güç (\bar{N}_{R2});

$$\bar{N}_{R2} = a'(1-a)\pi \quad (34)$$

olarak belirlenmiştir. Burada,

$$\bar{N}_{R2} = N_{R2}/(\rho V \omega^2 R^4) \quad (35)$$

şeklinde ifade edilen kanatlar tarafından rüzgârdan elde edilen boyutsuz güçtür.

-Rüzgâr türbinlerinde jeneratör gücü:

Jeneratör gücü (N_G), jeneratör momentinin (T_G) yüksek hızlı şaftın açısal hızıyla (ω_G) çarpımına eşittir. Bu durumda jeneratör gücü;

$$N_G = (T_R \eta_d \omega_G)/i - I_{e\varnothing} \alpha_G \omega_G \quad (36)$$

şeklini alır. Burada; ω_G yüksek hızlı şaftın açısal hızı (rad/s), α_G yüksek hızlı şaftın açısal ivmesi (rad/s²) şeklinde ifade edilmektedir. T_{R1} ve $I_{e\varnothing}$ karşılıkları yazıldığında jeneratör gücü (N_{G1});

$$N_{G1} = \frac{R^2 \eta_d \omega_G}{18i} \left(9\rho\pi R V^2 C_Q - \frac{4m_R \alpha_G}{i} \right) \quad (37)$$

Eşitlik (36) esas alınıp, \bar{T}_{R1} , $\bar{I}_{e\varnothing}$, $\bar{\omega}_G$ ve \bar{R} ifadeleri değerlendirildiğinde boyutsuz jeneratör gücü (\bar{N}_{G1});

$$\bar{N}_{G1} = (\bar{T}_{R1} \bar{R} \eta_d / i - \bar{I}_{e\varnothing}) \bar{\omega}_G \quad (38)$$

şeklinde bulunmuş olup \bar{T}_{R1} karşılığı yazılırsa;

$$\bar{N}_{G1} = \left((C_p \pi \eta_d \bar{R}) / (2\lambda i) - \bar{I}_{e\varnothing} \right) \bar{\omega}_G \quad (39)$$

şeklinde elde edilir. Burada

$$\bar{N}_{G1} = N_{G1} / (m_R R V \alpha_G) \quad (40)$$

şeklinde ifade edilen boyutsuz jeneratör gücüdür.

Jeneratör gücü (N_{G2}), benzer şekilde önceden elde edilen jeneratör momenti (T_{G2}) ve yüksek hızlı şaftın açısal hızı (ω_G) çarpılarak;

$$N_{G2} = \frac{R^2 \eta_d \omega_G}{i} \left(a'(1-a)\rho V \omega R^2 \pi - \frac{2m_R \alpha_G}{9i} \right) \quad (41)$$

şeklinde bulunur. Eşitlik (36) esas alınıp, \bar{T}_{R1} , $\bar{I}_{e\varnothing}$, $\bar{\omega}_G$ ve \bar{R} ifadeleri değerlendirildiğinde boyutsuz jeneratör gücü (\bar{N}_{G2});

$$\bar{N}_{G2} = (\bar{T}_{R2} \bar{R} \eta_d / i - \bar{I}_{e\varnothing}) \bar{\omega}_G \quad (42)$$

şeklinde olup T_{R_2} karşılığı yazılırsa;

$$\bar{N}_{G2} = (a'(1-a)\lambda\pi\eta_d\bar{R}/i - \bar{I}_{e\bar{s}})\bar{\omega}_G \quad (43)$$

şeklinde elde edilir. Burada

$$\bar{N}_{G2} = N_{G2}/(m_R R V \alpha_G) \quad (44)$$

şeklinde tanımlanan boyutsuz jeneratör gücüdür.

-Rüzgar türbinlerinde türbin etkinlik katsayısı:

Rüzgar gücü N'den hangi etkinlikte jeneratör gücü (N_G) elde edilebileceğini belirlemek amacıyla boyutsuz türbin etkinlik katsayısı (K_t) tanımlanabilmektedir. Bu bölümde, iki farklı türbin etkinlik katsayısı geliştirilmiştir.

Rüzgar gücü $N=0.5\rho\pi R^2 V^3$ ile N_{G1} türbin jeneratör şaftındaki güç (Eşitlik (37)) değerlendirilerek türbin etkinlik katsayısı (K_{t1});

$$K_{t1} = \frac{N_{G1}}{N} \quad (45)$$

güçler oranından gerekli düzenlemeler yapılarak;

$$K_{t1} = \left(\frac{RC_P}{\lambda} - \frac{4m_R\alpha_G}{9\rho\pi V^2 i} \right) \times \left(\frac{\eta_d\omega_G}{Vi} \right) \quad (46)$$

şeklinde belirlenmiştir. Burada türbin etkinlik katsayısı (K_{t1}) C_P , λ , ρ , R , V , m_R , α_G , i , η_d ve ω_G 'ye bağlı olarak değişmektedir. Benzer şekilde rüzgar gücü $N=0.5\rho\pi R^2 V^3$ ile N_{G2} türbin jeneratör şaftındaki güç (Eşitlik (41)) değerlendirilerek türbin etkinlik katsayısı (K_{t2});

$$K_{t2} = \frac{N_{G2}}{N} \quad (47)$$

güçler oranından gerekli düzenlemeler yapılarak;

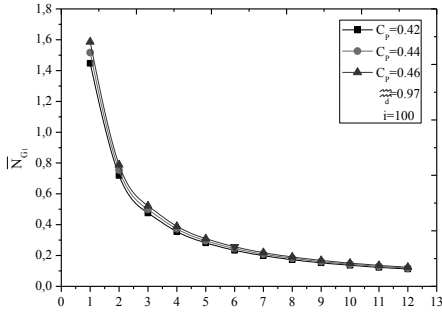
$$K_{t2} = \left(2a'(1-a)\lambda R - \frac{4m_R\alpha_G}{9\rho\pi V^2 i} \right) \times \left(\frac{\eta_d\omega_G}{Vi} \right) \quad (48)$$

şeklinde elde edilir. Bu ifadeden; a , a' , ρ , λ , R , V , m_R , α_G , i , η_d ve ω_G 'nin türbin etkinlik katsayısını belirleyen parametreler olduğu görülmektedir.

Araştırma bulguları

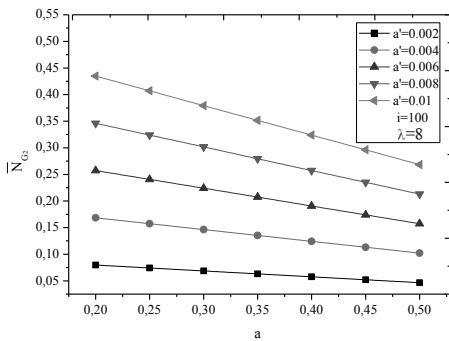
Boyutsuz parametrelerle tasarım, çeşitli boyutlu büyüklükler kullanılarak, geniş bir aralıkta çok esnek bir tasarım imkanı sağladığından, boyutlu büyüklükler boyutsuzlaştırılmıştır. Bu şekilde belirli bir geometrik büyüklükte veya belirli bir birimde olan parametreler yerine boyutsuz parametreler elde edilerek analiz kolaylığı sağlanmıştır.

Farklı C_P değerlerinde λ 'daki değişimin boyutsuz jeneratör gücü üzerine olan etkisi analiz edilmiştir (Şekil 6). Güç katsayısındaki artışın boyutsuz jeneratör gücünü çok az arttırdığı, aynı güç katsayısında uç-hız oranındaki artışın ise boyutsuz jeneratör gücünü düşürdüğü belirlenmiştir. $C_P=0.42$, $\lambda=8$ olduğu durumda $\bar{N}_{G1}=0.173$ olmaktadır. $m_R=19500$ kg, $R=39.5$ m, $V=15$ m/s, $\alpha_G=1$ rad/s² alındığında Eşitlik (40) kullanılarak $N_{G1}=2.01$ MW olarak bulunmuştur. m_R , R , V ve α_G değiştirilerek aynı boyutsuz momentte çok değişik boyutlu moment (N_{G1}) tahmin edilebilmektedir. N_{G1} 'in referans alınan 2 MW güç kapasiteli rüzgar türbini ($R=39.5$ m, $m_R=19500$ kg) nominal gücüne çok yakın olduğu belirlenmiştir. Aradaki güç farkının ise jeneratördeki kayıptan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sebeple nominal güçte elektrik enerjisi üretimi için $C_P=0.42$, $\lambda=8$ olması türbin tasarımı açısından uygun olacağı düşünülmektedir.



Şekil 6. Farklı C_p değerlerinde λ 'daki değişimin \bar{N}_{G1} üzerine olan etkisi

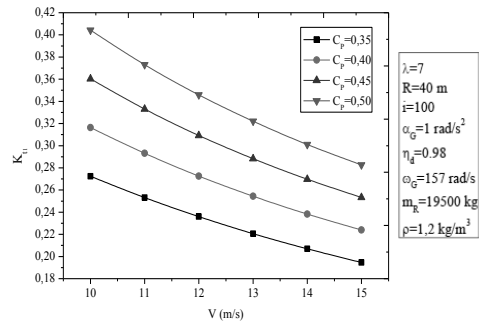
Farklı a değerlerinde a 'daki değişimin boyutsuz jeneratör gücü üzerine olan etkisi Şekil 7'de verilmiştir. a 'daki artışın boyutsuz jeneratör gücünü düşürdüğü, a 'daki artışın ise boyutsuz jeneratör gücünü arttırdığı belirlenmiştir. $a=0.45$, $a'=0.006$ olduğu durumda $\bar{N}_{G1}=\bar{N}_{G2}=0.174$ olmaktadır. $m_R=19500$ kg, $R=39.5$ m, $V=15$ m/s, $\alpha_G=1$ rad/s² olduğu durumda Eşitlik (44) kullanılarak $N_{G2}=2.01$ MW bulunmuştur. Aynı boyutsuz momentte m_R , R , V ve α_G değiştirilerek çok geniş bir aralıkta boyutlu jeneratör gücü değişimi tahmin edilebilmektedir. N_{G2} 'nin de benzer şekilde referans alınan türbin nominal gücüne (2 MW) çok yakın olduğu belirlenmiştir. Aradaki güç farkının ise jeneratördeki kayıptan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 7. Farklı a değerlerinde a 'daki değişimin \bar{N}_{G2} üzerine olan etkisi

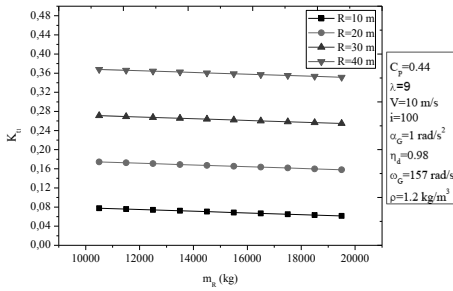
\bar{N}_{G1} ve \bar{N}_{G2} farklı yaklaşımlarla belirlenen jeneratör miline oluşan güçler olup boyutlu karşılıkları $N_{G1}=N_{G2}=2.01$ MW olarak tahmin edilmiştir. Jeneratör verimi (η_g) 0.98 alındığında elektriksel güç çıkışları ($N_{E1,2}$) $N_{E1,2}=\eta_g \times N_{G1,2}$ eşitliğinden faydalanılarak $N_{E1,2}=1.97$ MW olarak hesaplanmıştır. Referans alınan rüzgar türbininin maksimum elektriksel güç çıkışı $N_E=2$ MW olduğundan $N_{E1,2}$ yaklaşık olarak doğru tahmin edilmiştir.

Türbin etkinlik katsayısı, rüzgar gücünün ne oranda jeneratöre iletildiğini gösteren boyutsuz bir parametredir. Rüzgar türbin teorik modeline göre K_t farklı parametrelere bağlı olarak değişik yaklaşımlarla (K_{t1} ve K_{t2}) önceden belirlenmiş olup bu bölümde analiz edilmiştir. Öncelikle K_{t1} (Eşitlik (46)) esas alınarak türbin etkinlik katsayısı analiz edilmiştir. Güç katsayısı (C_p) ve rüzgar hızındaki (V) değişimin türbinin etkinlik katsayısı (K_{t1}) üzerine olan etkisi Şekil 8'de verilmiştir. C_p 'nin artmasıyla K_{t1} 'in arttığı, V 'nin artmasıyla K_{t1} 'in azaldığı tespit edilmiştir. Burada yüksek hızlı shaftın açılma ivmesi (α_G) 1 rad/s² ve yüksek hızlı shaftın dönüş hızı (n_G) 1500 dev/dak ($\omega_G=157$ rad/s) alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. $V=10$ m/s, $C_p=0.35$ olduğu durumda $K_{t1}=0.27$ olmaktadır. $V=10$ m/s, $C_p=0.45$ için $K_{t1}=0.36$ olarak belirlenip rüzgar gücünün % 36'sının jeneratöre iletildiğini ifade etmektedir.



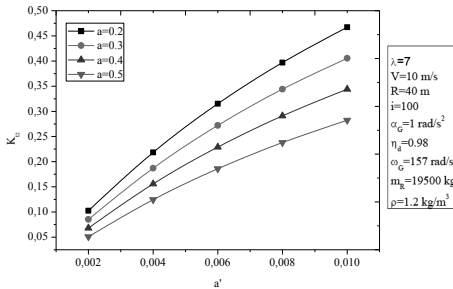
Şekil 8. Farklı C_p değerlerinde V 'deki değişimin K_{t1} üzerine olan etkisi

Kanat yarıçapı (R) ve kanatların kütesindeki (m_R) değişimin K_{t1} 'e etkisi Şekil 9'da verilmiştir. R'nin 10 m, 20 m, 30 m ve 40 m olduğu değerlerde m_R 'nin 10500-19500 kg arasındaki değişimi değerlendirildiğinde; R'deki artışın K_{t1} 'i arttırdığı, m_R 'deki artışın ise K_{t1} 'i çok az düşürdüğü görülmüştür. $m_R=10500$ kg, R=40 m olduğunda $K_{t1}=0.37$ iken; $m_R=19500$ kg, R=40 m olduğunda $K_{t1}=0.35$ 'e düşmüştür. K_{t1} 'in maksimum olması için; m_R 'nin düşük ve R'nin yüksek olması istenmektedir.



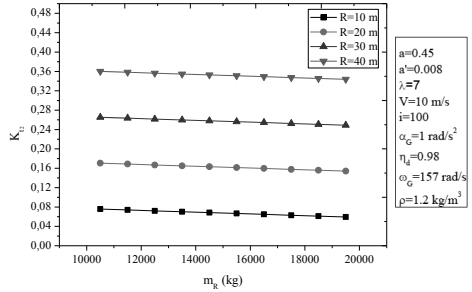
Şekil 9. Farklı R değerlerinde m_R 'deki değişimin K_{t1} üzerine olan etkisi

Benzer şekilde K_{t2} (Eşitlik (48)) esas alınarak türbin etkinlik katsayısı analiz edilebilmektedir. Eksenel indüksiyon faktörü (a) ve açılal indüksiyon faktöründeki (a') değişimin K_{t2} 'ye etkisi analiz edilmiştir (Şekil 10). a' 'daki artışın K_{t2} 'yi düşürdüğü, a 'daki artışın K_{t2} 'yi arttırdığı görülmüştür. $a=0.3$, $a'=0.01$ olduğunda $K_{t2}=0.41$ iken; $a=0.4$, $a'=0.01$ olduğunda $K_{t2}=0.34$ 'e düşmüştür.



Şekil 10. Farklı a değerlerinde a' 'deki değişimin K_{t2} üzerine olan etkisi

Değişik kanat yarıçaplarında (R) kanatların kütesindeki (m_R) değişimin K_{t2} 'ye etkisi Şekil 11'de gösterilmiştir. R'nin artmasıyla K_{t2} 'nin arttığı, m_R 'nin artmasıyla K_{t2} 'nin çok az azaldığı belirlenmiştir. R=30 m, $m_R=19500$ kg alındığında $K_{t2}=0.25$ iken; R=40 m, $m_R=19500$ kg alındığında $K_{t2}=0.34$ olmaktadır. Maksimum $K_{t2,2}$ için R>30 m olmalı ve m_R ise olabildiğince düşük olmalıdır.



Şekil 11. R ve m_R 'deki değişimin K_{t2} üzerine olan etkisi

Kanatların kütesinin (m_R) 15000-19500 kg arasındaki değişiminin $K_{t2,1}$ ve K_{t2} üzerine olan etkisi incelendiğinde; m_R 'nin artmasıyla K_{t2} 'nin azaldığı görülmüştür. $m_R=10000$ kg için $K_{t1,1}=0.358$, $K_{t2}=0.352$ iken; $m_R=19500$ kg için $K_{t1,1}=0.352$, $K_{t2}=0.344$ olmaktadır. Referans alınan rüzgar türbini temel büyüklükleri ($m_R=19500$ kg, R=39.5 m, i=100) için $K_{t2,1}=0.38$, $K_{t2}=0.37$ olarak bulunmuştur. Bu durum, rüzgar gücünün %37-38'inin jeneratöre iletilebildiğini göstermektedir.

Sonuçlar

Yapılan analizler neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Teorik modele göre; güç katsayısındaki artışın jeneratör gücünü çok az arttırdığı, aynı güç katsayısında uç-hız oranındaki artışın ise jeneratör gücünü düşürdüğü belirlenmiştir. Ayrıca eksenel indüksiyon faktöründeki artışın boyutsuz jeneratör gücünü düşürdüğü, açılal indüksiyon faktöründeki artışın ise boyutsuz jeneratör gücünü arttırdığı belirlenmiştir.

- Referans alınan rüzgar türbini temel büyüklükleri ($m_R=19500$ kg, $R=39.5$ m, $i=100$) için $K_{t_1}=0.38$, $K_{t_2}=0.37$ olarak belirlenmiştir. K_t değerleri literatürdeki C_p değerleriyle karşılaştırıldığında ($C_p=0.40-0.45$); K_t 'nin C_p 'den küçük olduğu belirlenmiştir. Bu yüzden, K_t değerlerinin mantıklı olduğu kanısına varılmıştır. Geliştirilen modelin türbin tasarımı için esas alınabileceği çok iddialı olmakla birlikte rüzgar türbin temel büyüklüklerinin tahmin edilmesi açısından gerçeğe yakın bir yaklaşım göstermektedir. Bu nedenle teorik model, tasarım için kullanılabilir bir model olarak tavsiye edilmektedir.

Semboller

- i : Çevrim oranı
 η_d : Dişli verimi
 C_p : Güç katsayısı
 ρ : Hava yoğunluğu ($kg\ m^{-3}$)
 N_J : Jeneratör giriş gücü (Watt)
 T_J : Jeneratör giriş momenti (Nm)
 N_G : Jeneratör gücü (Watt)
 T_G : Jeneratör momenti (Nm)
 η_g : Jeneratör verimi
 I_G : Jeneratörün kütlele atalet momenti ($kg\ m^2$)
 R : Kanat yarıçapı (m)
 T_R : Kanatlarda oluşan moment (Nm)
 T_S : Kanatlardan ana şafta aktarılan moment (Nm)
 ω : Kanatların açılma hızı ($rad\ s^{-1}$)
 α_R : Kanatların açılma ivmesi ($rad\ s^{-2}$)
 V_2 : Kanatların hemen önündeki rüzgar hızı ($m\ s^{-1}$)
 I_R : Kanatların kütlele atalet momenti ($kg\ m^2$)
 m_R : Kanatların kütlesi (kg)
 $V_{uç}$: Kanatların uç hızı ($m\ s^{-1}$)
 N_R : Kanatlar tarafından elde edilen güç (Watt)
 I_{es} : Kütlele eşdeğer atalet momenti ($kg\ m^2$)
 N : Rüzgar gücü (Watt)
 V : Rüzgâr hızı ($m\ s^{-1}$)
 N_E : Rüzgar türbini elektriksel güç çıkışı (Watt)
 K_t : Türbin etkinlik katsayısı
 λ : Uç-hız oranı
 ω_G : Yüksek hızlı şaftın açılma hızı ($rad\ s^{-1}$)
 α_G : Yüksek hızlı şaftın açılma ivmesi ($rad\ s^{-2}$)

Teşekkür

Bu çalışma, Ondokuz Mayıs Üniversitesi PYO.MUH.1904.11.004' nolu proje ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Ata, R. ve Çetin, N.S., (2008). 3 kW otonom bir rüzgar türbini kurulumu ve enerji eldesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakülte Dergisi*, **23**, 1, 41-47.
- Emniyetli, G., (2007). Evsel elektrik ihtiyacının karşılanması için rüzgar türbini tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Gregg, J. R., Trendrup ve J. J., Treuren, K.W.V., (2010). Developing a wind turbine design procedure with experimental verification, *2010 ECTC Proceedings ASME Early Career Technical Conference*, Tulsa.
- Huiying, C., Datong, Q. M. Z., Haitao, D., Yonggang, D. ve Wei, L., (2009). *Research on evaluating of wind turbine drive train systems*, Association of the Electricity Supply Industry of East Asia and Western Pacific CEO.
- Koç, E. ve Şenel M. C., (2011). Yatay eksenli rüzgar türbinleri mekanik tasarım esasları ve performans araştırması, *Anadolu Enerji Sempozyumu*, 610-621, Elazığ.
- Morren, J., Pierik, J. ve Haan, S. W. H., (2006) . *Inertial response of variable speed wind turbines*, *Electric Power Systems Research*, **76**, 980-987.
- Öztürk, İ. ve Çelik, A., (2006). Dünya'da ve Türkiye'de rüzgar enerjisi kullanım durumu ve geleceğe yönelik beklentiler, *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, **37**, 2, 267-274.
- Şenel, M. C., (2012). Rüzgar türbinlerinde güç iletim mekanizmalarının tasarım esasları-dinamik davranış, *Yüksek Lisans Tezi*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Şenel, M. C. ve Koç, E., (2013). Rüzgar türbinleri dinamik davranış analizi-teorik boyutsuz bir model, *2. Anadolu Enerji Sempozyumu*, 301-313, Diyarbakır.