

# YATAY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE OPTİMUM TÜRBİN PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ-TEORİK YAKLAŞIM

**Erdem Koç**

Prof. Dr.,  
Ondokuz Mayıs Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makina Mühendisliği Bölümü, Samsun  
erdemkoc@omu.edu.tr

**Mahmut Can Şenel\***

Arş. Gör.,  
Ondokuz Mayıs Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makina Mühendisliği Bölümü, Samsun  
mahmutcan.senel@omu.edu.tr

## ÖZ

Bu çalışmada, üç kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbininin aerodinamik tasarım parametreleri teorik olarak analiz edilmiştir. Bu amaçla, enerji dönüşümü esas alınıp kanat eleman teorisi ve aktüatör disk (açısal) momentum teorisi gibi aerodinamik teoriler değerlendirilerek türbin dinamik davranışı için teorik bir model oluşturulmuştur. Bu modelle, yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde kanatlardan jeneratöre kadar olan bölgede gerçekleşen moment ve güç iletimi incelenip, 2 MW güç kapasiteli bir rüzgâr türbini için kanatların kütlesi ( $m_R$ ), kanat yarıçapı ( $R$ ), güç iletiminde dişli çevrim oranı ( $i$ ) ve rüzgâr hızı ( $V$ ) gibi temel türbin parametrelerinin optimum büyüklükleri tahmin edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgâr türbini, güç iletimi, teorik yaklaşım

## DETERMINATION OF OPTIMUM TURBINE PARAMETERS IN HORIZONTAL AXIS WIND TURBINES-THEORETICAL APPROACH

### ABSTRACT

In this study, aerodynamic design parameters of horizontal axis wind turbines with three blades were analyzed theoretically. For this purpose, a theoretical model was designed by evaluating aerodynamic theories such as blade element theory and actuator disc (angular) momentum theory based on energy conversion for dynamic behavior of a typical turbine. With this model, torque and power transmission from blades to generator were investigated in horizontal axis wind turbines. Hence, optimum magnitudes of turbine parameters such as the mass of blades ( $m_R$ ), blade radius ( $R$ ), gear ratio ( $i$ ) and wind speed ( $V$ ) were estimated for 2 MW power capacity wind turbine.

**Keywords:** Wind turbine, power transmission, theoretical approach

\* İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 19.03.2015

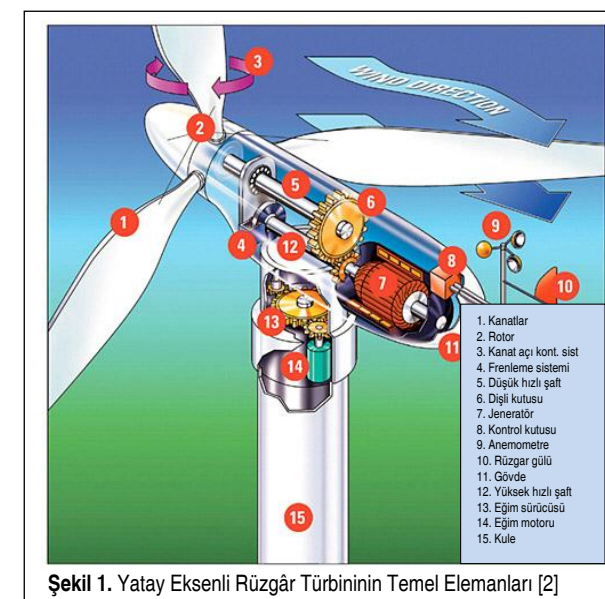
Kabul tarihi : 30.03.2016

Koç, E., Şenel, M. C. 2016. "Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Optimum Türbin Parametrelerinin Belirlenmesi-Teorik Yaklaşım," Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 676, s. 32-40.

## 1. GİRİŞ

Son zamanlarda hava kirliliği ve küresel ısınmadaki artış, birçok ülkeyi yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanmaya yönlendirmiştir. Günümüzdeki en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri de rüzgâr enerjisidir [1]. Rüzgâr enerjisi; doğal, temiz ve sonsuz bir enerji kaynağıdır. Rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretmek amacıyla rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Rüzgâr türbinleri, kanatlardaki kinetik enerjiyi öncelikle güç iletim elemanları (dişli kutusu, kavramalar, yüksek ve düşük hızlı şaft) aracılığıyla mekanik enerjiye, daha sonra da jeneratör üzerinden elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Ayrıca rüzgâr türbinleri dönme eksenine göre, yatay ve düşey eksenli olarak sınıflandırılmaktadır [2].

Elektrik enerjisi üretimi amacıyla ilk rüzgâr türbinleri 1891 yılında Dane Poul La Cour tarafından geliştirilmiş olmasına rağmen, 1970'li yıllara kadar rüzgâr türbinleri yaygın bir şekilde kullanılmamıştır. 1970'li yılların başında petrol fiyatlarındaki artış, rüzgâr enerjisinin kullanımını daha cazip hale getirmiştir. 1980'li yılların sonlarında ise rüzgâr enerjisi en hızlı gelişen enerji kaynaklarından biri olmuştur. Son yıllardaki teknolojik gelişmelerle birlikte, yatay eksenli rüzgâr türbinleri daha düşük maliyetli, daha güvenilir ve daha verimli enerji üretim tesisleri haline gelmiştir. Bu sayede, yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin güç kapasitesi 8 MW'a, verimi %40-45'lere ve kanat çapı ise 164 m'ye ulaşmıştır. Günümüzde kullanılan modern yatay eksenli rüzgâr türbinleri temel olarak; kanatlar, göbek, kule, gövde, dişli kutusu, düşük ve yüksek hızlı şaft, jeneratör, kanat açısı (pitch) kontrol sistemi, kontrol kutusu, frenleme sistemi, anemometre, rüzgâr gülü ve eğim (yaw) sürücüsünden oluşmakta olup, tüm bu elemanlar Şekil 1'de verilmiştir [3].



Şekil 1. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbininin Temel Elemanları [2]

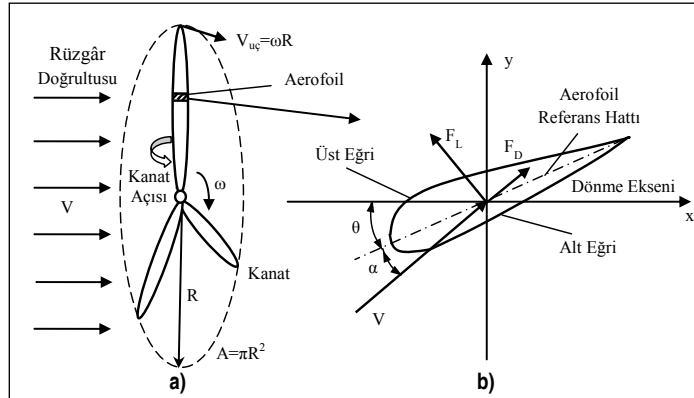
Kanatların en önemli fonksiyonu, moment ve gücün minimum kayıpla transmisyon elemanlarına iletilmesini sağlamaktır. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde, kanatlar üzerine etkiyen kuvvet, moment ve gücü araştırmak için çeşitli aerodinamik teoriler geliştirilmiştir. Bunlar; lineer momentum teorisi, aktüatör disk (açısal) momentum teorisi ve kanat eleman teorisidir. Lineer momentum teorisi, akışkan hava kanalı içerisine yerleştirilmiş bir disk üzerine etkiyen kuvvetin belirlenmesini amaçlar. Aktüatör disk momentum teorisi, lineer momentum teorisine benzer olup en önemli fark, akışkan havanın vorteksi oluşturmasıdır. Kanat eleman teorisi ise kanat kesidi (aerofoil) üzerine etkiyen kuvvet ve momentleri belirlemek amacıyla tercih edilmektedir. Bu teoride, aerofoil üzerine etkiyen momentin büyüklüğünün belirlenmesiyle de tüm kanada etkiyen moment kolaylıkla belirlenebilmektedir [4-5]. Bu çalışmada, aerodinamik teorilerden kanat eleman teorisi ve aktüatör disk momentum teorisinden faydalanılmıştır.

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerine yönelik literatürde birçok çalışma mevcuttur. Ackermann ve Soder yürüttükleri çalışmada [6], rüzgâr türbini tasarım kriterleri (kanat sayısı, uç hız oranı, güç katsayısı vb.), güç kalitesi, şebeke bağlantısı ve rüzgâr türbini maliyetini içeren genel bir değerlendirme yapmıştır. Morcos çalışmasında [7], Mısır'ın rüzgâr enerji potansiyelini ve yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansını araştırmıştır. Maalawi çalışmasında [8], yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansını, doğrudan ve Glaurent iterasyon metodunu kullanarak belirlemiş olup, doğrudan metodun hesaplama süresi açısından önemli bir avantaj sağladığı sonucuna ulaşmıştır.

Bu çalışmada, rüzgâr türbinlerindeki enerji dönüşümü esas alınıp aerodinamik teoriler (kanat eleman teorisi, aktüatör disk (açısal) momentum teorisi) değerlendirilerek türbin dinamik davranışı için teorik bir model oluşturulmuştur. Bu modelle, transmisyon elemanları boyunca gerçekleşen moment ve güç iletimi incelenerek 2 MW güç kapasiteli yatay eksenli bir rüzgâr türbini için kanatların optimum kütlesi, optimum kanat yarıçapı, optimum dişli çevrim oranı ve optimum rüzgâr hızı tahmin edilmiştir.

## 2. RÜZGÂR TÜRBİNİ AERODİNAMİK TASARIM PARAMETRELERİ

Rüzgâr türbinlerinde, aerodinamik tasarım parametrelerinden önce kanat yapısının incelenmesi gerekmektedir. Rüzgâr türbini kanatları, aerofoil olarak tanımlanan özel kanat kesitlerinden oluşmaktadır. Üst eğrisi, alt eğriye göre daha kavisli olan aerofoilde eğriler arasında bir basınç farkı meydana gelmektedir. Yüksek basınçtan alçak basınca doğru olan hava hareketi kaldırma kuvveti oluşturarak aerofoilin ve kanadın hareketi sağlanmaktadır. Rüzgâr türbini kanat ve aerofoil yapısı Şekil 2'de verilmiş olup, burada  $V$ , rüzgâr hızı;  $V_{uc}$ , kanat



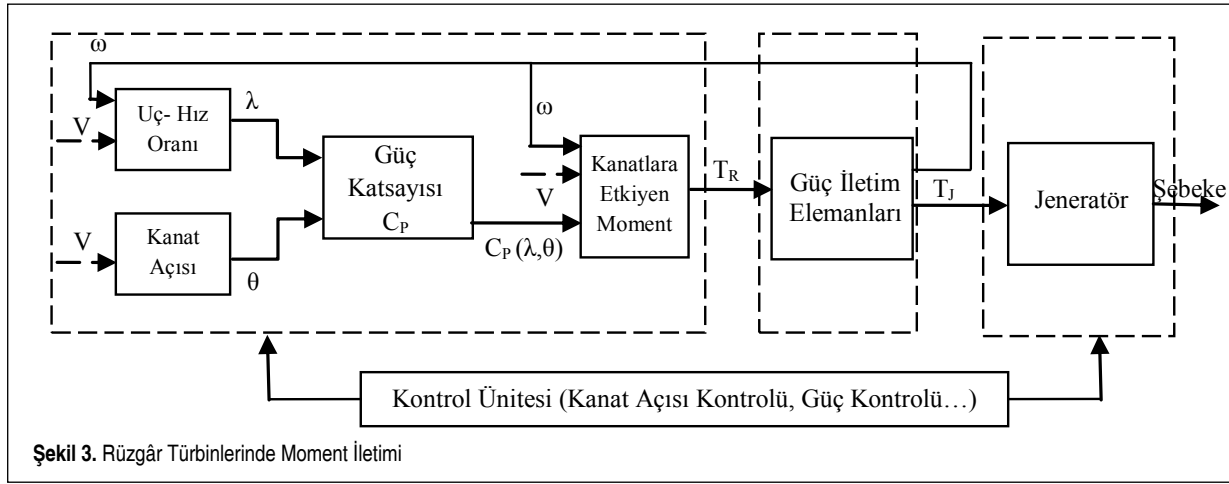
Şekil 2. a) Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Kanat, b) Aeorofoil Yapısı

Burada  $R$ , kanat yarıçapı (m);  $\omega$ , kanatların açılma hızı (rad/s) ve  $V$ , rüzgâr hızıdır (m/s).

**b) Güç Katsayısı ( $C_p$ ):** Bu parametre, kanatlar tarafından rüzgârdan elde edilen gücün ( $N_R$ ) rüzgâr gücüne ( $N$ ) oranı olarak ifade edilmektedir.

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

Maksimum güç katsayısı ( $C_{pmaks}$ ), lineer momentum teorisine göre Betz limitini ( $C_{pmaks}=0.593$ ) aşamamaktadır. Üç kanatlı yatay eksenli tipik bir rüzgâr türbini için  $C_p$ - $\lambda$  değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Şekilde, iki farklı kanat geometrisi kullanılmış olup, bu kanat geometrileri için optimum uç hız oranı ( $\lambda$ ) 10, maksimum güç katsayısı ( $C_{pmaks}$ ) 0.42-0.43, nominal



Şekil 3. Rüzgâr Türbinlerinde Moment İletimi

uç hızı;  $\omega$ , kanat açılma hızı;  $R$ , kanat yarıçapı;  $\theta$ , kanat açısı;  $\alpha$ , hücum açısı;  $F_L$ , kaldırma kuvveti ve  $F_D$ , sürüklenme kuvvetidir.

Rüzgâr türbinlerinde moment iletimi, kanatlarda başlamakta olup, aerodinamik tasarım parametrelerinden faydalanılarak gerçekleştirilen moment iletim aşamaları Şekil 3'te verilmiştir. Burada kanatlara etkiyen moment ( $T_R$ ); rüzgâr hızı ( $V$ ), güç katsayısı ( $C_p$ ), uç-hız oranı ( $\lambda$ ), kanat açısı ( $\theta$ ) ve kanatların açılma hızına ( $\omega$ ) bağlıdır.

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde optimum türbin büyüklüklerinin belirlenmesi amacıyla, yukarıda bahsedilen parametrelerin dışında, aksel indüksiyon faktörü ( $a$ ), açılma indüksiyon faktörü ( $a'$ ), moment (tork) katsayısı ( $C_Q$ ) ve dişli çevrim oranı ( $i$ ) gibi parametreler de kullanılabilir olup, bu parametreler aşağıda kısaca izah edilmiştir:

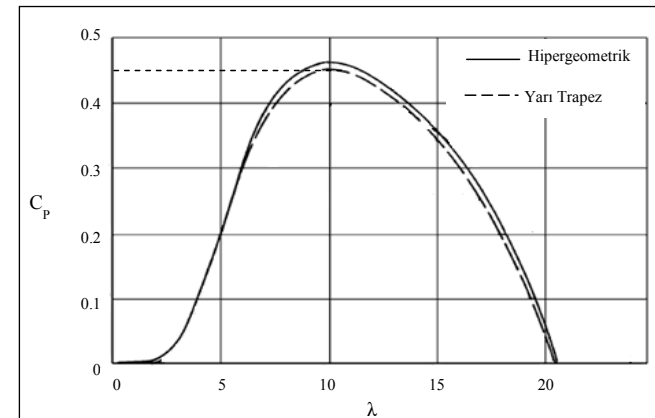
**a) Uç-Hız Oranı ( $\lambda$ ):** Rüzgâr türbinlerindeki temel tasarım parametrelerinden biri olup, kanatların uç hızının ( $V_{uc}$ ) rüzgâr hızına ( $V$ ) oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\lambda = V_{uc} / V = \omega R / V \quad (1)$$

rüzgâr hızı 9 m/s olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada da yarı trapez kanat geometrisine sahip üç kanatlı yatay eksenli bir rüzgâr türbini kullanıldığından  $C_p=0.42$  ve  $\lambda=10$  olarak seçilmiştir.

Moment (tork) katsayısı ( $C_Q$ ) da rüzgâr türbin tasarımında sıklıkla tercih edilmekte olup, güç katsayısının ( $C_p$ ) uç-hız oranına ( $\lambda$ ) oranı şeklinde ifade edilmektedir [9-10].

$$C_Q = C_p / \lambda \quad (3)$$

Şekil 4. Farklı Kanat Yapılarında  $C_p$ - $\lambda$  Değişimi [5]

**c) Tasarım Hızları:** Rüzgâr türbininden nominal elektriksel güç üretimi amacıyla türbinin hangi rüzgâr hızında ( $V$ ) güç üretimine başlayıp hangi rüzgâr hızında güç üretiminin durdurulması gerektiğini belirten hızlardır. Tasarım hızları; türbinin devreye giriş hızı ( $u_c$ ), nominal hızı ( $u_R$ ) ve devreden çıkış hızı ( $u_F$ ) şeklindedir. Rüzgâr türbininde maksimum enerji üretimini yapan minimum hız, nominal hız ( $u_R$ ) olup, bu hız değeri 8-15 m/s arasında değişmektedir. Rüzgâr türbinlerinde belirli bir rüzgâr hızından sonra elektriksel güç ( $N_E$ ) üretimi başlamaktadır. Bu hız devreye giriş hızı ( $u_c$ ) denilmektedir ve bu hız genellikle 2-4 m/s arasındadır. Rüzgâr türbinini, yüksek rüzgâr hızlarından korumak için türbinin kapatıldığı hız devreden çıkış hızı ( $u_F$ ) denilmektedir. Devreden çıkış hızı genellikle 20-28 m/s arasındadır [11].

**d) Aksel İndüksiyon Faktörü ( $a$ ):** Bu faktör, lineer momentum teorisine dayanarak belirlenmektedir. Aksel indüksiyon faktörü, Eşitlik 4'teki gibi, kanatların hemen önündeki rüzgâr hızı ( $V_2$ ) ve kanatlardan yeterince uzaklıktaki rüzgâr hızı ( $V$ ) arasındaki ilişkiyle karakterize edilmekte olup bu değer, 0.2 ve 0.5 arasında değişmektedir [9].

$$a = (V - V_2) / V \quad (4)$$

**e) Açılma İndüksiyon Faktörü ( $a'$ ):** Bu faktör, aktüatör disk momentum teorisine dayanarak teorik olarak belirlenmektedir. Açılma indüksiyon faktörü değeri, 0.002 ve 0.01 arasında değişmektedir. Bu faktör, Eşitlik 5'te verilmiş olup, rüzgârın açılma hızına ( $\Omega$ ) ve kanatların açılma hızına ( $\omega$ ) bağlıdır [9].

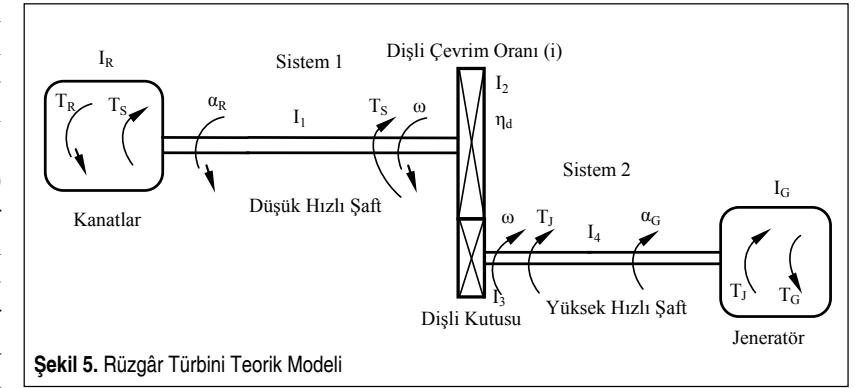
$$a' = \Omega / (2\omega) \quad (5)$$

**f) Dişli Çevrim Oranı ( $i$ ):** Bu parametre, yüksek hızlı şaftın açılma hızının ( $\omega_G$ ) düşük hızlı şaftın açılma hızına ( $\omega$ ) oranı veya yüksek hızlı şaftın açılma hızının ( $\alpha_G$ ) düşük hızlı şaftın açılma hızına ( $\alpha_R$ ) oranı olarak tanımlanmaktadır. Tek kademeli alın dişli sistemleri için dişli çevrim oranı ( $i$ ) 1:5 iken, tek kademeli planet dişli sistemleri için dişli çevrim oranı ( $i$ ) 1:12'dir [5].

$$i = \omega_G / \omega = \alpha_G / \alpha_R \quad (6)$$

### 3. RÜZGÂR TÜRBİNİ TEORİK MODELİ-DİNAMİK DAVRANIŞ

Bu çalışmada, üç kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin enerji dönüşümleri esas alınarak teorik yeni bir model oluşturulmuştur (Şekil 5). Oluşturulan teorik modelde yatay eksenli rüzgâr türbini temel olarak; kanatlar, dişli kutusu, düşük hızlı şaft, yüksek hızlı şaft ve jeneratörden oluşmaktadır. Sistemde,



Şekil 5. Rüzgâr Türbini Teorik Modeli

düşük ve yüksek hızlı şaftların (transmisyon millerinin) kütlelerinden dolayı oluşan kütle atalet momenti ( $I_1$  ve  $I_4$ ) ve dişli kütlesel atalet momenti ( $I_2$  ve  $I_3$ ), kanatların kütle atalet momentine ( $I_R$ ) göre çok küçük olduğundan ihmal edilmiştir. Bu teorik yaklaşımda tüm sistem, Sistem 1 ve Sistem 2 olmak üzere iki bölümde analiz edilmiştir. Bundan dolayı moment ve güç hesapları, optimum türbin büyüklüklerini tahmin etmek amacıyla aşağıda gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir [12].

**a) Kanatlara Etkiyen Moment:** Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde moment ve güç iletimi kanatlarda başlamaktadır. Kanatlara etkiyen moment ( $T_R$ ), kanat eleman teorisi ve aktüatör disk momentum teorisine dayanarak belirlenebilmektedir.

Kanat eleman teorisine dayanarak kanatlara etkiyen moment ( $T_{R1}$ ); rüzgâr hızına ( $V$ ), kanat yarıçapına ( $R$ ), hava yoğunluğuna ( $\rho$ ) ve moment katsayısına ( $C_Q$ ) bağlı olarak Eşitlik 7'deki gibi tanımlanabilmektedir.

$$T_{R1} = 0.5 \rho \pi R^3 V^2 C_Q \quad (7)$$

Aktüatör disk momentum teorisine dayanarak kanatlar üzerine etkiyen moment ( $T_{R2}$ ) ise aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$T_{R2} = a' (1 - a) \rho V \omega R^4 \pi \quad (8)$$

Burada  $\omega$ , kanatların açılma hızı;  $a$ , aksel indüksiyon faktörü ve  $a'$ , açılma indüksiyon faktörüdür.

**b) Jeneratör Momenti:** Teorik modelde gösterilen Sistem 1 için temel parametreler; kanatlara etkiyen moment ( $T_R$ ), dişli kutusunun girişindeki moment ( $T_S$ ), kanatların açılma hızı ( $\omega$ ), dişli verimi ( $\eta_d$ ), dişli çevrim oranı ( $i$ ), kanatların açılma hızının ( $\alpha_R$ ) ve kanatların kütle atalet momenti ( $I_R$ ) şeklindedir. Bu parametreler kullanılarak Sistem 1 için moment eşitliği;

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

Sistem 2 için moment eşitliği;

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

olarak elde edilir. Sistem 2 için temel parametreler sırasıyla, jeneratör momenti ( $T_G$ ), dişli kutusunun çıkışındaki moment ( $T_j$ ), jeneratörün kütleli atalet momenti ( $I_G$ ), yüksek hızlı şaftın açılma hızı ( $\omega_G$ ) ve yüksek hızlı şaftın açılma ivmesi ( $\alpha_G$ ) şeklindedir.

Geliştirilen teorik modele göre,  $T_j$  ve  $T_s$  arasında  $T_j = T_s \eta_d / i$  ilişkisi vardır. Bundan dolayı, jeneratör momenti ( $T_G$ ), Sistem 1 ve Sistem 2 birlikte değerlendirilerek;

$$T_G = T_R \eta_d / i - I_{es} \alpha_G \quad (11)$$

şeklinde elde edilir. Burada kütleli eşdeğer atalet momenti,  $I_{es} = (I_R \eta_d / i^2) + I_G$  eşitliğiyle; dişli verimi ise  $\eta_d I_G i^2 / I_R$  eşitliğiyle ifade edilmektedir. Kanatların kütleli atalet momenti olarak  $I_R = m_R R_{es}^2$  tanımlanmaktadır. Ayrıca, kanatların ağırlık merkezinden göbeğe olan uzaklık ( $R_{es}$ ) yaklaşık olarak kanat yarıçapının üçte biri ( $R/3$ ) olarak kabul edilmektedir [13]. Bu durumda, kanatların kütleli atalet momenti  $I_R = m_R R^2 / 9$  olarak yazılabilir.  $\eta_d$  ve  $I_R$  ifadeleri dikkate alınarak gerekli sadeleştirmeler yapılarak kütleli eşdeğer atalet momenti ( $I_{es}$ );

$$I_{es} = (2m_R R^2 \eta_d) / (9i^2) \quad (12)$$

olarak belirlenir.

$T_{R1}$  ve  $I_{es}$  ifadeleri, Eşitlik 11'e yerleştirilirse, kanat eleman teorisine göre jeneratör momenti ( $T_{G1}$ );

$$T_{G1} = (R^2 \eta_d / (18i)) \times (9\rho\pi R V^2 C_p - 4m_R \alpha_G / i) \quad (13)$$

şekline dönüşür. Bu eşitlik dikkate alındığında, moment katsayısı ( $C_p$ ), dişli çevrim oranı ( $i$ ), yüksek hızlı şaftın açılma ivmesi ( $\alpha_G$ ), dişli verimi ( $\eta_d$ ), kanat yarıçapı ( $R$ ) ve rüzgâr hızına ( $V$ ) bağlı olarak  $T_{G1}$  belirlenebilmektedir.

Aktüatör disk momentum teorisine dayanarak,  $T_{R2}$  ve  $I_{es}$ , Eşitlik 11'e yerleştirilirse;  $\eta_d$ ,  $i$ ,  $R$ ,  $\alpha_G$ ,  $V$ ,  $\omega$ ,  $\rho$ ,  $m_R$ ,  $a$  ve  $a'$  ne bağlı olarak jeneratör momenti ( $T_{G2}$ ) aşağıdaki gibi yeniden tanımlanabilir.

$$T_{G2} = (R^2 \eta_d / i) \times (a'(1-a)\rho V \omega R^2 \pi - 2m_R \alpha_G / (9i)) \quad (14)$$

**c) Jeneratör Gücü:** Jeneratör gücü ( $N_G$ ), jeneratör momenti ( $T_G$ ) ve yüksek hızlı şaftın açılma hızının ( $\omega_G$ ) çarpılmasıyla bulunabilmektedir. Bundan dolayı, kanat eleman teorisine dayanarak jeneratör gücü ( $N_{G1}$ ) aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$N_{G1} = (R^2 \eta_d \omega_G / (18i)) \times (9\rho\pi R V^2 C_p - 4m_R \alpha_G / i) \quad (15)$$

Benzer şekilde, jeneratör gücü ( $N_{G2}$ ) aktüatör disk momentum teorisine dayanarak  $T_{G2}$  ve  $\omega_G$ 'nin çarpılmasıyla yeniden ifade edilebilir.

$$N_{G2} = (R^2 \eta_d \omega_G / i) \times (a'(1-a)\rho V \omega R^2 \pi - 2m_R \alpha_G / (9i)) \quad (16)$$

**d) Optimum Kanat Yarıçapı:** Bu parametre ( $R_{opt}$ ), kanat eleman teorisine dayanarak  $T_{G1}$ 'in  $R$ 'ye göre kısmi türevinin alınıp sifıra eşitlenmesiyle ( $dT_{G1} / dR = 0$ ) belirlenmektedir.

$$R_{opt} = 8m_R \alpha_G \lambda / (27\rho\pi V^2 C_p i) \quad (17)$$

Boyutsuz parametrelerle çalışmak, çok geniş bir aralıkta tasarım imkânı sunmaktadır. Bu yüzden, kanat yarıçapı gibi optimum büyüklükler bu çalışmada boyutsuzlaştırılmıştır.  $R_{opt}$  boyutsuz formda ( $\bar{R}_{opt}$ ) aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\bar{R}_{opt} = 8\lambda / (27C_p \pi i) \quad (18)$$

Eşitliğin sol tarafı,  $\bar{R}_{opt} = R_{opt} \rho V^2 / (m_R \alpha_G)$  şeklinde tanımlanmaktadır.

$T_{G2}$ 'nin  $R$ 'ye göre kısmi türevinin alınıp sifıra eşitlenmesiyle ( $dT_{G2} / dR = 0$ ), aktüatör disk momentum teorisine dayanarak optimum kanat yarıçapı ( $R'_{opt}$ );

$$R'_{opt} = (m_R \alpha_G / (9a'(1-a)\rho V \omega \pi i))^{0.5} \quad (19)$$

şeklindedir. Optimum kanat yarıçapı boyutsuzlaştırılırsa;

$$\bar{R}'_{opt} = (1/9a'(1-a)\pi i)^{0.5} \quad (20)$$

şeklinde elde edilir. Boyutsuz kanat yarıçapı ( $\bar{R}'_{opt}$ ), boyutlu parametreler cinsinden  $\bar{R}'_{opt} = R'_{opt} / (m_R \alpha_G / (\rho V \omega))^{0.5}$  olarak ifade edilebilmektedir.

**e) Optimum Dişli Çevrim Oranı:** Optimum dişli çevrim oranı ( $i_{opt}$ ), kanat eleman teorisine dayanarak  $T_{G1}$ 'in  $i$ 'ye göre kısmi türevinin alınıp sifıra eşitlenmesiyle ( $dT_{G1} / di = 0$ ) belirlenebilir.

$$i_{opt} = ((8m_R \alpha_G \lambda) / (9\rho\pi R V^2 C_p)) \quad (21)$$

$T_{G2}$ 'nin  $i$ 'ye göre kısmi türevinin alınıp sifıra eşitlenmesiyle ( $dT_{G2} / di = 0$ ) aktüatör disk momentum teorisine dayanarak optimum dişli çevrim oranı ( $i'_{opt}$ ) aşağıdaki gibi elde edilir.

$$i'_{opt} = ((4m_R \alpha_G) / (9a'(1-a)\rho V^2 R \lambda \pi)) \quad (22)$$

**f) Türbin Etkinlik Katsayısı:** Bu parametre, rüzgâr gücünün ne oranda jeneratöre iletildiğini belirlemek amacıyla geliştirilmiştir. Bu bölümde, farklı yaklaşımlarla yukarıda türetilen jeneratör gücü ( $N_{G1}$ ,  $N_{G2}$ ) ifadeleri kullanılarak türbin etkinlik katsayıları ( $K_{n1}$ ,  $K_{n2}$ ) tanımlanmıştır.

Türbin etkinlik katsayısı ( $K_{n1}$ ), kanat eleman teorisine dayanarak  $K_{n1} = N_{G1} / N$  tanımıyla;

$$K_{n1} = (RC_p / \lambda - 4m_R \alpha_G / (9\rho\pi V^2 i)) \times (\eta_d \omega_G / (Vi)) \quad (23)$$

şeklinde elde edilir. Burada  $N$ , rüzgâr gücü olup,  $N = 0.5\rho\pi R^2 V^3$  olarak ifade edilmektedir. Ayrıca,  $K_{n1}$  boyutsuz bir parametre

olup,  $R$ ,  $C_p$ ,  $\lambda$ ,  $m_R$ ,  $\alpha_G$ ,  $\rho$ ,  $V$ ,  $i$ ,  $\omega_G$  ve  $\eta_d$ 'ye bağlıdır.

Benzer şekilde, aktüatör disk momentum teorisine dayanarak  $K_{n2} = N_{G2} / N$  tanımıyla  $K_{n2}$  aşağıdaki gibi de ifade edilebilmektedir.

$$K_{n2} = (2a'(1-a)\lambda R - 4m_R \alpha_G / (9\rho\pi V^2 i)) \times (\eta_d \omega_G / (Vi)) \quad (24)$$

$K_{n2}$  de boyutsuz bir parametre olup,  $a'$ ,  $\lambda$ ,  $R$ ,  $m_R$ ,  $\alpha_G$ ,  $\rho$ ,  $V$ ,  $i$ ,  $\omega_G$  ve  $\eta_d$  parametrelerine bağlı olarak ifade edilebilmektedir.

**g) Optimum Rüzgâr Hızı:** Optimum rüzgâr hızı ( $V_{opt}$ ), kanat eleman teorisine dayanarak  $K_{n1}$ 'in  $V$ 'ye göre kısmi türevinin alınıp sifıra eşitlenmesiyle ( $dK_{n1} / dV = 0$ ) belirlenmektedir.

$$V_{opt} = (12m_R \alpha_G \lambda / (9\rho\pi RC_p i))^{0.5} \quad (25)$$

Aktüatör disk momentum teorisine dayanarak, optimum rüzgâr hızı ( $V'_{opt}$ ) ise aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$V'_{opt} = (2m_R \alpha_G / (3\pi R \rho a'(1-a)\lambda i))^{0.5} \quad (26)$$

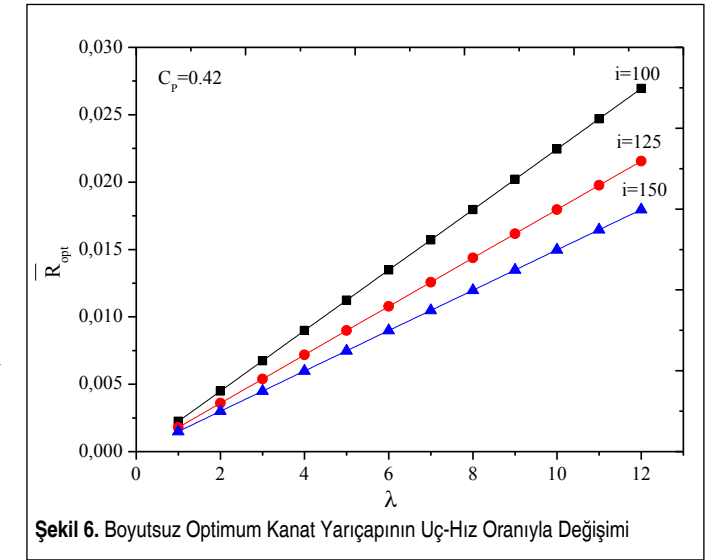
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE İRDELEME

Rüzgâr türbini teorik modeli esas alınarak kanat eleman teorisine ve aktüatör disk momentum teorisine göre belirlenen jeneratör momenti ( $T_{G1}$ ,  $T_{G2}$ ) ve jeneratör gücü ( $N_{G1}$ ,  $N_{G2}$ ) büyüklükleri karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların birbirini doğruladığı, yayımlanan daha önceki çalışmada ortaya konulmuştur [12]. Bu çalışmada ise bu moment ve güç eşitliklerinden faydalanılarak kanat eleman teorisine ve aktüatör disk momentum teorisine göre kanat yarıçapı, dişli çevrim oranı ve rüzgâr hızı gibi optimum rüzgâr türbin parametrelerinin ( $m_R$ ,  $R_{opt}$ ,  $V_{opt}$ ,  $i_{opt}$ ) eşitlikleri türetilmiştir. Bu eşitliklerden faydalanılarak referans alınan 2 MW güç kapasiteli bir rüzgâr türbini için kanatların optimum kütlesi ( $m_R$ ), optimum kanat yarıçapı ( $R_{opt}$ ), optimum dişli çevrim oranı ( $i_{opt}$ ) ve optimum rüzgâr hızı ( $V_{opt}$ ) tahmin edilmeye çalışılmıştır [14].

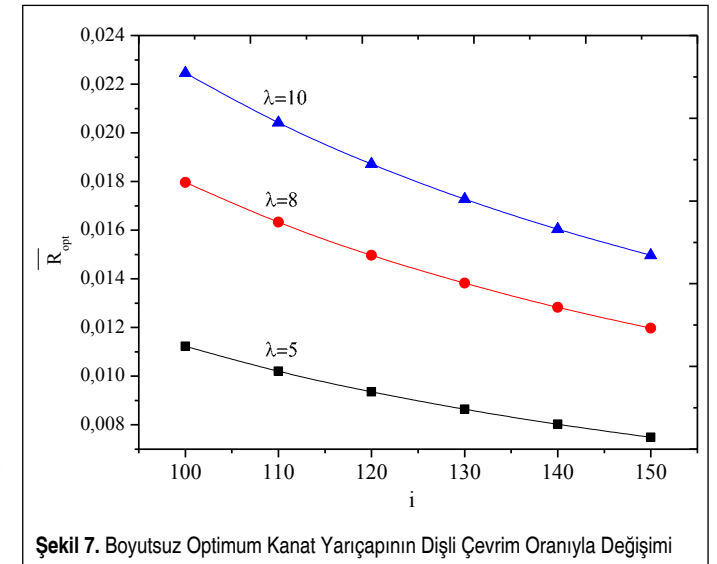
Güç katsayısının ( $C_p$ ) 0.42 olduğu durum için uç-hız oranındaki ( $\lambda$ ) değişimin boyutsuz optimum kanat yarıçapı ( $\bar{R}_{opt}$ ) üzerine olan etkisi Şekil 6'da verilmiştir. Referans alınan 2 MW güç kapasiteli rüzgâr türbininin maksimum güç katsayısı ( $C_{pmax}$ ) 0.42 olduğundan bu değer esas alınarak  $\bar{R}_{opt}$  belirlenmiş olup, uç-hız oranındaki ( $\lambda$ ) artışın  $\bar{R}_{opt}$ 'u lineer olarak artırdığı tespit edilmiştir.  $i=100$  ve  $\lambda=8$  için  $\bar{R}_{opt}=0.019$  olmaktadır.  $\rho=1.2$  kg/m<sup>3</sup>,  $V=9$  m/s,  $m_R=19500$  kg ve  $\alpha_G=10$  rad/s<sup>2</sup> seçilip,  $R_{opt} = (\bar{R}_{opt} m_R \alpha_G) / (\rho V^2)$  eşitliği kullanılarak boyutlu optimum kanat yarıçapı ( $R_{opt}$ ) 38 m olarak bulunmuştur. Bu eşitlikten faydalanılarak aynı boyutsuz parametre ( $\bar{R}_{opt}=0.019$ ) kulla-

nılıp geniş  $m_R$ ,  $R$ ,  $\rho$  ve  $\alpha_G$  aralığında  $R_{opt}$  tahmin edilebilmektedir. Kanat eleman teorisine esas alınarak dişli çevrim oranındaki ( $i$ ) değişimin boyutsuz optimum kanat yarıçapı ( $\bar{R}_{opt}$ ) üzerine etkisi Şekil 7'de verilmiştir. Bu egride güç katsayısı,  $C_p=0.42$  değerinde doğrudan uç-hız oranının bir fonksiyonu olarak değil de deneysel metotlarla belirlenen bir parametre olarak değerlendirilmiştir. Eğriler değerlendirildiğinde dişli çevrim oranındaki ( $i$ ) artışın  $\bar{R}_{opt}$ 'u düşürdüğü belirlenmiştir. Ayrıca düşük uç hız oranlarında ( $\lambda$ ), çevrim oranındaki ( $i$ ) artışın  $\bar{R}_{opt}$ 'a etkisinin daha az olduğu tespit edilmiştir.  $i=110$  ve  $\lambda=10$  olduğu durumda  $\bar{R}_{opt} = 0.02$  olmaktadır.  $m_R=19500$  kg,  $V=9$  m/s,  $\rho=1.2$  kg/m<sup>3</sup> ve  $\alpha_G=10$  rad/s<sup>2</sup> alınıp  $R_{opt} = (\bar{R}_{opt} m_R \alpha_G) / (\rho V^2)$  eşitliği kullanılarak  $R_{opt}=40$  m olarak belirlenmiştir [15, 16].

Eksenel indüksiyon faktörü ( $a$ ) ve açılma indüksiyon fak-



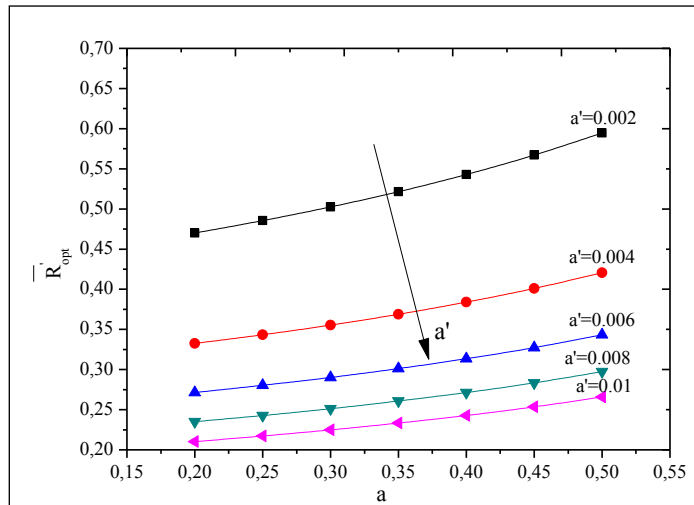
Şekil 6. Boyutsuz Optimum Kanat Yarıçapının Uç-Hız Oranıyla Değişimi



Şekil 7. Boyutsuz Optimum Kanat Yarıçapının Dişli Çevrim Oranıyla Değişimi

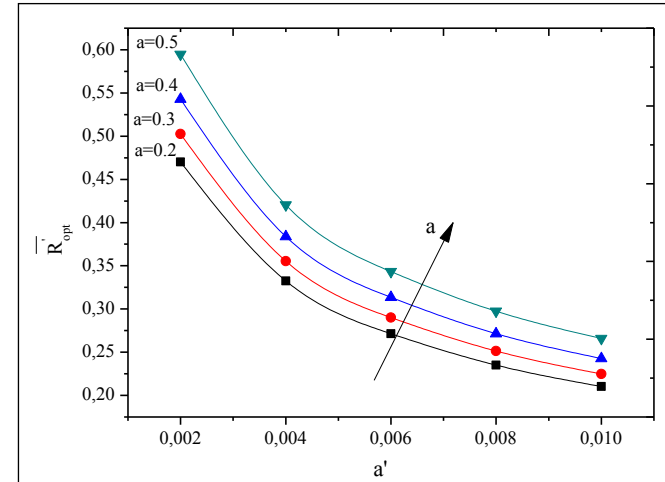
törü ( $a'$ ), sırasıyla lineer momentum teorisi ve aktüatör disk momentum teorisi esas alınarak teorik veya deneysel yöntemlerle belirlenebilen aerodinamik katsayılar olup,  $a$  değeri 0.2-0.5 arasında;  $a'$  değeri ise 0.002-0.01 arasında değişmektedir [9, 17]. Eksenel indüksiyon faktöründeki ( $a$ ) değişimin boyutsuz optimum kanat yarıçapı ( $\bar{R}_{opt}$ ) üzerine olan etkisi Şekil 8'de verilmiş olup,  $a$  değerindeki artışın  $\bar{R}_{opt}$ 'u artırdığı belirlenmiştir.  $a=0.2$  ve  $a=0.002$  için  $\bar{R}_{opt}=0.47$  olmaktadır.  $m_R=19500$  kg,  $\alpha=10$  rad/s<sup>2</sup>,  $\rho=1.2$  kg/m<sup>3</sup>,  $V=9$  m/s ve  $\omega=1.57$  rad/s olarak seçildiğinde boyutlu optimum kanat yarıçapı ( $\bar{R}_{opt}$ ) 39 m olarak belirlenmiştir [14-17]. Kanat eleman teorisi esas alındığında  $R_{opt}=40$  m iken, aktüatör disk momentum teorisi esas alındığında  $\bar{R}_{opt}=39$  m olmaktadır. Bu durum, iki aerodinamik teori kullanılarak elde edilen sonuçların birbirini doğruladığını göstermektedir. Ayrıca aynı büyüklüklerin ( $m_R, V_{opt}, \rho, \omega$ ) kullanıldığı 2 MW güç kapasiteli rüzgâr türbininin kanat yarıçapı 39.5 m olarak verilmiş olup, elde edilen optimum kanat yarıçapı değerlerinin ( $R_{opt}, R'_{opt}$ ) literatürdeki değerlerle de tutarlı olduğu belirlenmiştir [14].

Açısal indüksiyon faktöründeki ( $a'$ ) değişimin boyutsuz optimum kanat yarıçapı ( $\bar{R}_{opt}$ ) üzerine olan etkisi incelendiğinde,  $a'$ 'deki artışın  $\bar{R}_{opt}$ 'u düşürdüğü belirlenmiştir (Şekil 9). Açısal momentum teorisine dayanarak, eksenel indüksiyon faktörü ( $a$ ) ve açısal indüksiyon faktörü ( $a'$ ) arasında bir ilişki bulunmaktadır [1]. Fakat bu katsayılar, aynı zamanda kanattaki aerofoillerin konumuna bağlı olarak PIV (Particle Image Velocimetry) yöntemiyle deneysel olarak da belirlenebilmektedir [17]. Bu sayede, bu iki parametre bağımsız birer parametre olarak değerlendirilerek parametrelerden biri sabit



Şekil 8. Boyutsuz Optimum Kanat Yarıçapının Eksenel İndüksiyon Faktörüyle Değişimi

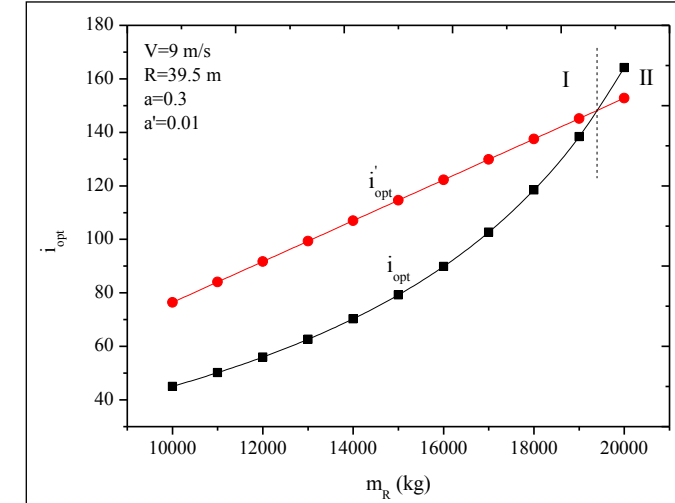
tutulup diğerinin boyutsuz optimum kanat yarıçapı ( $\bar{R}_{opt}$ ) üzerine etkisi incelenebilmektedir. Şekil 9'dan seçilen indüksiyon faktörleriyle ( $a'=0.002, a=0.25$ ) boyutsuz optimum kanat yarıçapı  $R'_{opt}=0.49$  olmaktadır,  $\rho=1.2$  kg/m<sup>3</sup>,  $V=9$  m/s,  $m_R=19500$  kg,  $\alpha=10$  rad/s<sup>2</sup> ve  $\omega=1.57$  rad/s için boyutlu kanat yarıçapı ( $\bar{R}_{opt}$ ) 40 m olarak bulunmaktadır. Belirlenen optimum kanat yarıçapı ( $\bar{R}_{opt}$ ), referans alınan türbin kanat yarıçapına ( $R=39.5$  m) çok yakındır. Bu durum da  $\bar{R}_{opt}$  eşitliği kullanılarak kanat yarıçapının doğru tahmin edildiğini göstermektedir.



Şekil 9. Boyutsuz Optimum Kanat Yarıçapının Açısal İndüksiyon Faktörüyle Değişimi

Kanatların kütledeki ( $m_R$ ) değişimin iki farklı yaklaşımla (kanat eleman teorisi ve aktüatör disk momentum teorisi) belirlenen optimum çevrim oranlarına ( $i_{opt}$  ve  $i'_{opt}$ ) etkisini belirlemek amacıyla Şekil 10 oluşturulmuştur. Şekildeki eğri, iki farklı bölgede analiz edilmiştir. I. bölgede,  $m_R$ 'nin artmasıyla  $i_{opt}$  ve  $i'_{opt}$ 'un arttığı ve bu parametrelerin büyüklüklerinin giderek birbirine yaklaştığı tespit edilmiştir. II. bölgede ise  $i_{opt}$  ve  $i'_{opt}$  değerleri giderek birbirinden uzaklaşmaktadır. Referans alınan 2 MW güç kapasiteli rüzgâr türbinini için temel büyüklükler  $m_R=19500$  kg,  $R=39.5$  m ve  $i=150$  şeklindedir [14]. Eğri üzerinden  $m_R=19500$  kg için  $i_{opt}=151$  ve  $i'_{opt}=150$  olarak bulunmuştur. Referans alınan türbinin dişli çevrim oranıyla ( $i$ ), optimum dişli çevrim oranının ( $i_{opt}$ ) birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, uygulanan metodun doğru sonuç verdiğini göstermektedir. Bu dişli çevrim oranı değerine ( $i_{opt}=150$ ) ulaşmak içinse, dişli kutusunda iki kademeli planet dişli sistemi veya üç kademeli helisel alın dişli sisteminin kullanılması önerilmektedir.

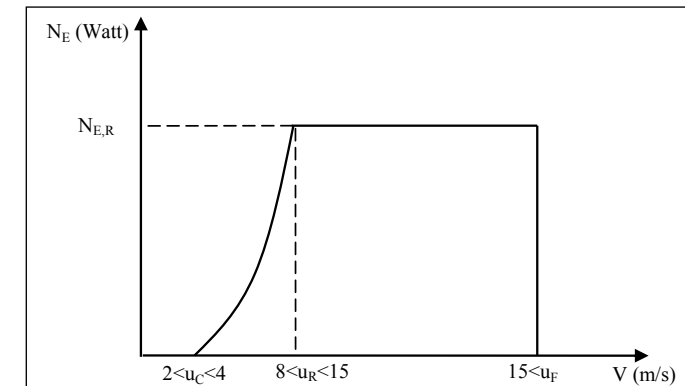
Rüzgâr türbinlerinde tasarım hızları, nominal elektriksel güç ( $N_{E,R}$ ) üretimi amacıyla türbinin hangi rüzgâr hızında ( $V$ ) güç üretimine başlayıp hangi rüzgâr hızında güç üretiminin durdurulması gerektiğini belirten hızlardır. Rüzgâr türbinlerinde



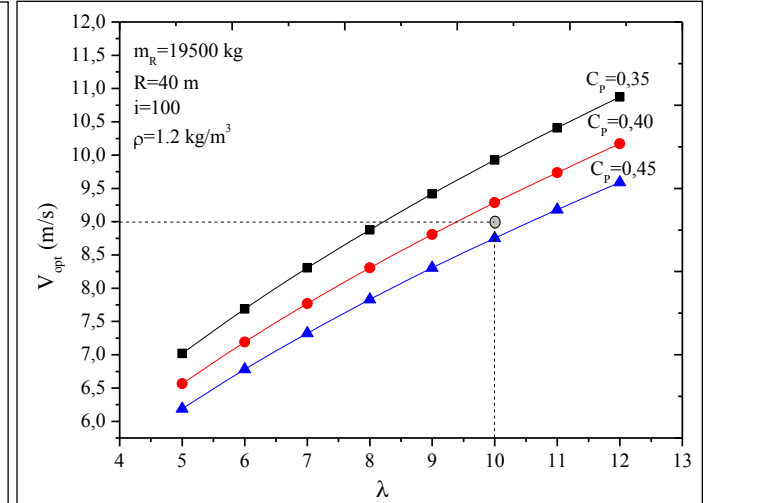
Şekil 10. Optimum Dişli Çevrim Oranlarının Kanatların Kütleyle Değişimi

maksimum elektriksel güç üretiminin ( $N_{E,R}$ ) gerçekleştiği minimum rüzgâr hız değerine, nominal veya optimum hız ( $u_R$ ) denilmektedir. Türbinde elektriksel güç üretiminin başladığı hız, devreye giriş hızı ( $u_C$ ); türbinin çalışmasının durdurulduğu maksimum rüzgâr hız değerine ise devreden çıkış hızı ( $u_F$ ) denilmektedir. Tasarım hızlarına bağlı olarak nominal elektriksel güç üretimi Şekil 11'de verilmiştir [11]. Bu bölümde, güç katsayısı ve uç-hız oranına bağlı olarak bu optimum hız ( $V_{opt}$ ) değeri, diğer bir ifadeyle, nominal hız değeri ( $u_R$ ) belirlenmeye çalışılmıştır.

Uç-hız oranı ( $\lambda$ ) ve güç katsayısındaki ( $C_p$ ) değişimin optimum rüzgâr hızı ( $V_{opt}$ ) üzerine olan etkisi incelendiğinde,  $\lambda$ 'daki artışın  $V_{opt}$ 'u arttırdığı,  $C_p$ 'deki artışın ise  $V_{opt}$ 'u düşürdüğü belirlenmiştir (Şekil 12). Literatürde, üç kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbinleri için maksimum güç katsayısı ( $C_{P,max}$ ) 0.42 ve uç-hız oranı ( $\lambda$ ) 10 olarak değerlendirilmektedir [5]. Aynı parametre büyüklükleri, Şekil 12'den seçildiğinde (interpolasyonla  $C_p=0.42, \lambda=10$ ), optimum rüzgâr hızı ( $V_{opt}$ ) 9 m/s olarak belirlenmektedir. Bu optimum hız değerinde, üç kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbinini nominal hıza ulaştırmaktadır. Bu tip türbinler için nominal hız ( $u_R$ ) 8-15 m/s arasında



Şekil 11. Rüzgâr Türbinlerinde Tasarım Hızlarına Bağlı Olarak Elektriksel Güç Üretimi [11]



Şekil 12. Optimum Rüzgâr Hızının Uç-Hız Oranı ile Değişimi

değiştiğinden, teorik yaklaşımla belirlenen optimum rüzgâr hızının ( $V_{opt}$ ) literatürdeki nominal hız değeriyle (8-15 m/s) uyumlu olduğu tespit edilmiştir [11]. Sonuç olarak, optimum hız ve üstü rüzgâr hızlarında elektriksel gücün maksimum olduğu, optimum hızın altındaki rüzgâr hızlarında ise elektriksel gücün kademeli olarak azaldığı belirlenmiştir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Geliştirilen rüzgâr türbin teorik modeline göre; aerodinamik teorilerden de (kanat eleman teorisi ve aktüatör disk momentum teorisi) faydalanılarak 2 MW güç kapasiteli bir rüzgâr türbinini için optimum kanat yarıçapı ( $R_{opt}$ ), optimum dişli çevrim oranı ( $i_{opt}$ ) ve optimum rüzgâr hızı ( $V_{opt}$ ) tahmin edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. Üretici kataloglarında belirtilen 2 MW güç kapasiteli yatay eksenli rüzgâr türbinini için kanatların kütlesi ( $m_R$ ) 19500 kg olup, yapılan hesaplamalarda bu güç kapasitesindeki bir rüzgâr türbinini için optimum dişli çevrim oranı ( $i_{opt}$ ) 150-151 olarak belirlenmiştir. Bu çevrim oranına ulaşılması içinse, dişli kutusunda üç kademeli helisel alın dişli sistemi veya iki kademeli planet dişli sistemi kullanılmalıdır.
2. 2 MW güç kapasiteli yatay eksenli bir rüzgâr türbinini için kanat yarıçapı ( $R$ ) kataloglarda 39.5 m olarak belirtilmektedir. Geliştirilen teorik modele göre optimum kanat yarıçapı ( $R_{opt}$ ) ise yaklaşık 40 m olarak tespit edilmiştir. Bu durum, referans alınan türbinin kanat yarıçapının doğru tahmin edildiğini göstermektedir.
3. Bu teorik yaklaşımla, farklı güç kapasitelerine sahip rüzgâr türbinleri için de optimum kanat yarıçapı ( $R_{opt}$ ) ve optimum dişli çevrim oranı ( $i_{opt}$ ) tahmin edilebilmektedir.
4. 2 MW güç kapasiteli yatay eksenli rüzgâr türbinini için referans alınan türbin parametrelerine ( $C_p=0.42, \lambda=10, m_R=19500$  kg,  $R=39.5$  m) göre optimum rüzgâr hızı veya

nominal hız ( $V_{opt}$ ) 9 m/s olarak tespit edilmiştir. Literatürde ise üç kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbinleri için nominal hız (optimum hız) değeri 8-15 m/s arasında değişmektedir [11]. Sonuç olarak, çalışmada belirlenen optimum rüzgâr hızı (nominal hız) değerinin literatürle uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Optimum hız ve üstü rüzgâr hızlarda, elektriksel güç üretiminin maksimum olduğu, optimum hızın altındaki rüzgâr hızlarında ise elektriksel güç üretiminin kademeli olarak azaldığı belirlenmiştir.

5. Teorik modelin türbin tasarımı için esas alınabileceği çok iddialı olmakla birlikte, rüzgâr türbini temel büyüklüklerinin tahmin edilmesi açısından gerçeğe yakın bir yaklaşım göstermektedir. Teorik model, tasarım için kullanılacak bir model olarak tavsiye edilmektedir.

## SEMBOLLER

### Latin Harfleri

$a$	Eksenel indüksiyon faktörü (-)
$a'$	Açısal indüksiyon faktörü (-)
$C_p$	Güç katsayısı (-)
$I_{eş}$	Eşdeğer kütleli atalet momenti ( $kgm^2$ )
$I_G$	Jeneratörün kütleli atalet momenti ( $kgm^2$ )
$I_R$	Kanatların kütleli atalet momenti ( $kgm^2$ )
$i$	Dişli çevrim oranı (-)
$i_{opt}$	Optimum dişli çevrim oranı (-)
$K_t$	Türbin etkinlik katsayısı (-)
$m_R$	Kanatların kütlesi (kg)
$N$	Rüzgâr gücü (W)
$N_G$	Jeneratör gücü (W)
$N_R$	Kanatlar tarafından rüzgârdan edinilen güç (W)
$R$	Kanat yarıçapı (m)
$R_{opt}$	Optimum kanat yarıçapı (m)
$T_G$	Jeneratör momenti (Nm)
$T_R$	Kanatlar tarafından rüzgâr elde edilen moment (Nm)
$V$	Rüzgâr hızı (m/s)
$V_{opt}$	Optimum rüzgâr hızı (m/s)

### Yunan Harfleri

$\alpha_G$	Yüksek hızlı şaftın açısal ivmesi ( $rad/s^2$ )
$\alpha_R$	Kanatların açısal ivmesi ( $rad/s^2$ )
$\eta_d$	Dişli verimi (-)
$\lambda$	Uç-hız oranı (-)
$\rho$	Hava yoğunluğu ( $kg/m^3$ )
$\omega$	Kanatların açısal hızı ( $rad/s$ )
$\omega_G$	Yüksek hızlı şaftın açısal hızı ( $rad/s$ )

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Ondokuz Mayıs Üniversitesi PYO. MUH.1904.11.004 numaralı proje ile desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Ondokuz Mayıs Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

## KAYNAKÇA

1. **Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E.** 2001. Wind Energy Handbook, John Wiley&Sons, London, England.
2. **Şenel, M. C.** 2012. "Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinin Tasarım Esasları-Dinamik Davranış," Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
3. **Yılmaz, S.** 2008. "Eğilme-Burulma Bağlı Rüzgâr Türbini Pala Tasarımı," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
4. **Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L.** 2002. Wind Energy Explained, Theory Design and Application, John Wiley&Sons, London, England.
5. **Hau, E.** 2006. Wind Turbines Fundamentals, Technology, Application, Economics, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
6. **Ackermann, T., Söder, L.** 2000. "Wind Energy Technology and Current Status: A Review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 4, no. 5, p. 315-374.
7. **Morcos, V. H.** 1994. "Aerodynamic Performance Analysis of Horizontal Axis Wind Turbines," Renewable Energy, vol. 4, no. 5, p. 505-518.
8. **Maalawi, K. Y., Badawy, M. T. S.** 2001. "A Direct Method for Evaluating Performance of Horizontal Axis Wind Turbines," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 5, no. 2, p. 175-190.
9. **Hansen, M. O. L.** 2008. Aerodynamics of Wind Turbines, Earthscan, London, England.
10. **Emniyetli, G.** 2007. "Evsel Elektrik İhtiyacının Karşlanması için Rüzgâr Türbini Tasarımı," Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
11. **Güneş, İ. İ.** 2006. "Bir Rüzgâr Türbininin Modellenmesi, Simülasyonu ve Kontrolü," Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
12. **Şenel, M. C., Koç, E.** 2014. "Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinin Dinamik Davranışı-Teorik Bir Model," Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi, cilt 5, sayı 1, s. 69-80.
13. **Morren, J., Pierik, J., Haan, S. W. H.** 2006. "Inertial Response of Variable Speed Wind Turbines," Electric Power Systems Research, vol. 76, no. 11, p. 980-987.
14. Vestas V80 Wind Turbine, www.vestas.com/en/media/brochures.aspx, son erişim tarihi: 27. 3. 2014.
15. **González, A. G., Agiriano, I. E., Zulueta, E., Echavarri, F. O., Guede, J. M. P.** 2014. "Pitch Based Wind Turbine Intelligent Speed Setpoint Adjustment Algorithms," Energies, vol. 7, p. 3793-3809.
16. **Johnson, K. E.** 2004. "Adaptive Torque Control of Variable Speed Wind Turbines," National Renewable Energy Laboratory (NREL), Technical Report, Colorado, USA.
17. **Akon, A. F.** 2012. "Measurement of Axial Induction Factor for a Model Wind Turbine," Department of Mechanical Engineering University of Saskatchewan, Master of Science, Saskatchewan, Canada.