



# H-Darrieus Rüzgar Türbininde Simetrik ve Asimetrik Kanat Profili Kullanımının Karşılaştırılması

M. Özgün Korukçu<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup> Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-4761-4304), ozkorukcu@uludag.edu.tr

(2nd International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences ICAENS 2022, March 10-13, 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1082424)

**ATIF/REFERENCE:** Korukçu, M. Ö. (2022). H-Darrieus Rüzgar Türbininde Simetrik ve Asimetrik Kanat Profili Kullanımının Karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (34), 421-427.

## Öz

Rüzgar türbinlerinde kanat profili seçimi türbinin aerodinamik performansı açısından çok önemlidir. Bu çalışmada dikey eksenli H-Darrieus rüzgar türbinlerinde simetrik ve asimetrik kanat profili kullanımının türbin verimine olan etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Beş simetrik kanat profili (NACA0009, NACA0012, NACA0015, NACA0018, NACA0021) ile beş asimetrik kanat profilinin (NACA2412, NACA4412, NACA6412, NACA8412, NACA10412) H-Darrieus rüzgar türbininde kullanılması durumunda türbin verimi incelenmiştir. Hesaplamalarda Çift Çoklu Akım Tüpü (ÇÇAT) (Double Multiple Stream Tube-DMST) yöntemi kullanılmıştır. NACA0018 kanat profili kullanılan türbinde en yüksek güç katsayısı  $C_{Pmax}=0.4791$  bulunurken, NACA2412 kanat profili kullanılan türbinde en yüksek güç katsayısı ise  $C_{Pmax}=0.4726$  bulunmuştur. NACA0018 ve NACA2412 kanat profilleri için kanat uç hız oranının ( $\lambda$ ) güç katsayısına ( $C_P$ ) ve rotor açısının ( $\theta$ ) moment değerlerine ( $\tau$ ) göre değişimlerini veren matematiksel bağıntılar elde edilmiştir. Elde edilen bağıntıların hepsinde regresyon katsayısı oldukça yüksektir ( $r^2 > 0.99$ ).

**Anahtar Kelimeler:** Dikey Eksenli Rüzgar Türbini, Kanat Profili, DMST, Güç Katsayısı, Yenilenebilir Enerji.

## Comparison of symmetrical and asymmetrical airfoil usage on H-Darrieus Wind Turbine

### Abstract

Airfoil choice is vital for wind turbines. In this study effects of symmetrical and asymmetrical airfoil types on vertical axis H-Darrieus turbine performance are investigated. Coefficient of performance ( $C_P$ ) of H-Darrieus turbine is investigated for five symmetric (NACA0009, NACA0012, NACA0015, NACA0018, NACA0021) and five asymmetric airfoils (NACA2412, NACA4412, NACA6412, NACA8412, NACA10412). In the calculations Double Multiple Stream Tube (DMST) model is used. For NACA0018 airfoil maximum power coefficient is found as  $C_{Pmax}=0.4791$  whereas maximum power coefficient for NACA2412 airfoil is found as  $C_{Pmax}=0.4726$ . Mathematical relations for coefficient of performance ( $C_P$ ) respect to tip speed ratio ( $\lambda$ ) and torque ( $\tau$ ) respect to azimuth angle ( $\theta$ ) are derived. Regression coefficients of the relations are found very high ( $r^2 > 0.99$ ).

**Keywords:** Vertical Axis Wind Turbine, Airfoil, DMST, Power Coefficient, Renewable Energy.

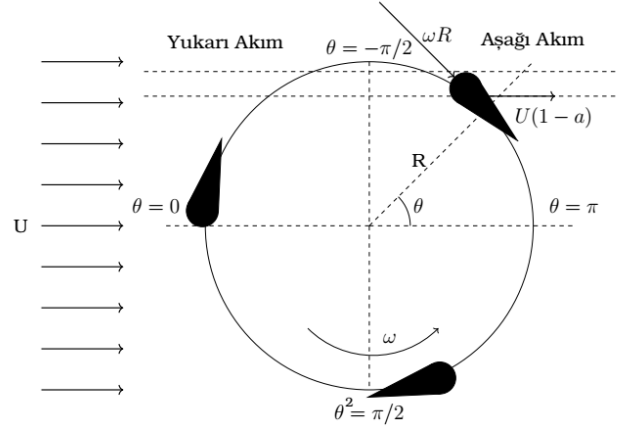
## 1. Giriş

Dünyamızın 1970 senelerinde yaşadığı petrol krizi ülkeleri sürdürülebilir ve fosil kökenli yakıtlara alternatif enerji kaynakları araştırmaya yöneltmiştir. Söz konusu alternatif enerji kaynaklarından birisi de rüzgar enerjisidir (Akpınar, 2006). Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin (YERT) rüzgar enerjisi pazarına hakim olmasına karşın son senelerde dikey eksenli rüzgar türbinleri (DERT) konusunda yapılan araştırma sayısı gittikçe artmaktadır (Mathew, 2006). Dikey eksenli türbinlerin aerodinamik performansını etkileyen ana parametreler; kanat profili, rotor geometrisi, solidite, türbin yüksekliğinin çapa oranı ve kanat uç hız oranıdır. Genelde rüzgar türbinlerinin aerodinamik performansları rüzgar tünellerinde yapılan deneyler, Sayısal Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) analizleri, momentum modelleri ile akım-tüpü (stream-tube) modelleri kullanılarak belirlenmektedir. Rüzgar tünellerinde yapılan deneyler doğru sonuç vermesine karşın çok pahalıdır. Sayısal Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği (CFD) analizlerinde ise Navier-Stokes denklemleri zamana bağlı koşullar altında çözülmektedir. Hesaplamalarda ağ yapısı, eleman sayısı, türbülans modeli, zaman adımı ve bilgisayar kapasitesi sonuçları etkilemektedir. Momentum modelleri Reynolds sayısına göre kanat profili tablolarından kanadın kaldırma ( $C_L$ ) ve sürüklenme ( $C_D$ ) katsayısı değerlerini bularak türbin üzerine etki eden kuvvetleri ve moment değerlerini hesaplamaktadır. Akım tüpü modelleri ise diğer yaklaşımlara göre dikey eksenli türbinlerin aerodinamik performansını belirlemede çok hızlı ve kullanışlıdır (Bedon vd., 2015, 2016, Berrone vd., 2011, Chen vd., 2016). Akım tüpü modelleri tek-akım tüpü modelinden (Templin, 1974) doğmuş ve daha sonra çoklu akım tüpü modelleri geliştirilmiştir (Strickland, 1975). Çift Çoklu Akım Tüpü (ÇÇAT) (Double Multiple Stream Tube-DMST) yöntemi ise Paraschivoiu (Paraschivoiu, 1983) tarafından geliştirilmiştir.

Bu çalışmada beş simetrik kanat profili (NACA0009, NACA0012, NACA0015, NACA0018, NACA0021) ile beş asimetrik kanat profilinin (NACA2412, NACA4412, NACA6412, NACA8412, NACA10412) kullanılmasının düz kanatlı dikey H-Darrieus rüzgar türbinin aerodinamik performansına etkisi incelenmiştir.

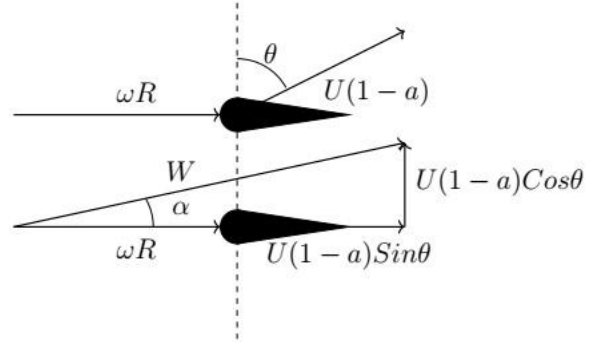
## 2. Materyal ve Metot

Çift-Çoklu Akım Tüpü modelinde rotor üzerine gelen hava akışı akım tüplerinden oluşmaktadır. Her akım tüpü gelen rüzgar hızına ( $U$ ) sahiptir ve daha sonra bu hız yukarı akım ( $U_y$ ) ve aşağı akım ( $U_a$ ) olarak ikiye ayrılır. Çalışmada modellenen rotor geometrisi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Rotor geometrisi.

Bir kanat üzerine gelen hız bileşenleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kanat üzerindeki hız bileşenleri.

Kanat uç hız oranı ( $\lambda$ ) Eşitlik 1'deki gibi tanımlanmaktadır. Rotorun açılal hızı ( $\omega$ ) ve rotorun yarıçapı ( $R$ ) olarak gösterilebilir.

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \quad (1)$$

Yukarı akım ( $W_y$ ) ve aşağı akım ( $W_a$ ) bağıl hız değerleri Eşitlik 2-3 ile hesaplanabilir.

$$W_y = (\omega R + U_y(1 - a_y)\sin\theta)^2 + (U_y(1 - a_y)\cos\theta)^2 \quad (2)$$

$$W_a = (\omega R + U_a(1 - a_a)\sin\theta)^2 + (U_a(1 - a_a)\cos\theta)^2 \quad (3)$$

Yukarı akım ve aşağı akım aksenal azalma faktörleri ( $a_y$ ,  $a_a$ ) olarak tanımlanmıştır. Rotorun herhangi bir konumda bulunduğu açı ise ( $\theta$ ) ile gösterilmiştir.

Yukarı akım ve aşağı akım hücum açıları ( $\alpha_y$ ,  $\alpha_a$ ) Eşitlik 4-5 ile bulunabilir.

$$\alpha_y = \frac{(U_y(1 - a_y)\cos\theta)}{(\omega R + U_y(1 - a_y)\sin\theta)} \quad (4)$$

$$\alpha_a = \frac{(U_a(1 - a_a)\cos\theta)}{(\omega R + U_a(1 - a_a)\sin\theta)} \quad (5)$$

Akım tüpleri üzerine gelen itki kuvvetleri Eşitlik 6-7 yardımıyla hesaplanabilir.

$$F_y = \frac{Nc}{8\pi R} \frac{W_y^2}{U_y^2} \sec\theta (C_{n_y}\cos\theta - C_{t_y}\sin\theta) \quad (6)$$

$$F_a = \frac{Nc}{8\pi R} \frac{W_a^2}{U_a^2} \sec\theta (C_{n_a}\cos\theta - C_{t_a}\sin\theta) \quad (7)$$

Yukarıdaki eşitliklerde kanat sayısı ( $N$ ), kord uzunluğu ( $c$ ), normal ( $C_n$ ), teğetsel ( $C_t$ ), kaldırma ( $C_l$ ) ve sürüklenme katsayısı ( $C_d$ ) olarak gösterilmiştir. Kanat profillerinin kaldırma ( $C_l$ ) ve sürüklenme katsayısı ( $C_d$ ) değerleri kanat üzerine gelen serbest hava hızından hesaplanan Reynolds sayısına göre XFOIL yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Normal ( $C_n$ ) ve teğetsel ( $C_t$ ) katsayılar kaldırma ( $C_l$ ) ve sürüklenme katsayısı ( $C_d$ ) değerleri yardımıyla Eşitlik 8-9'daki gibi bulunur.

$$C_n = C_l \cos\alpha + C_d \sin\alpha \quad (8)$$

$$C_t = C_l \sin\alpha - C_d \cos\alpha \quad (9)$$

Yukarı ve aşağı akımdaki teğetsel kuvvetler Eşitlik 10-11 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$F_{t_y} = C_{t_y} \left(\frac{W_y}{U}\right)^2 \quad (10)$$

$$F_{t_a} = C_{t_a} \left(\frac{W_a}{U}\right)^2 \quad (11)$$

Her akım tüpündeki tork ( $\tau_i$ ) kanatların birim uzunluğu için hesaplanır ve rotorun toplam torkunun ( $\tau_T$ ) bulunmasında kullanılır (Eşitlik 12-13).

$$\tau_i = \frac{1}{2} \frac{Nc\rho}{2\pi(U_y + U_a)} \quad (12)$$

$$x \left[ W_y^2 U_a \left( C_{t_y} R + C_{n_y} \frac{c}{4} \right) + W_a^2 U_y \left( C_{t_a} R + C_{n_a} \frac{c}{4} \right) \right]$$

Kanat uzunluğu ( $L$ ) ve hava yoğunluğu ( $\rho$ ) olarak gösterilmiştir.

$$\tau_T = L \sum_{\theta=-\pi/2}^{\theta=\pi/2} Q_i \quad (13)$$

Rotorun ürettiği güç ( $P$ ) ve güç katsayısı ( $C_p$ ) Eşitlik 14-15 ile hesaplanabilir.

$$P = \tau_T \omega \quad (14)$$

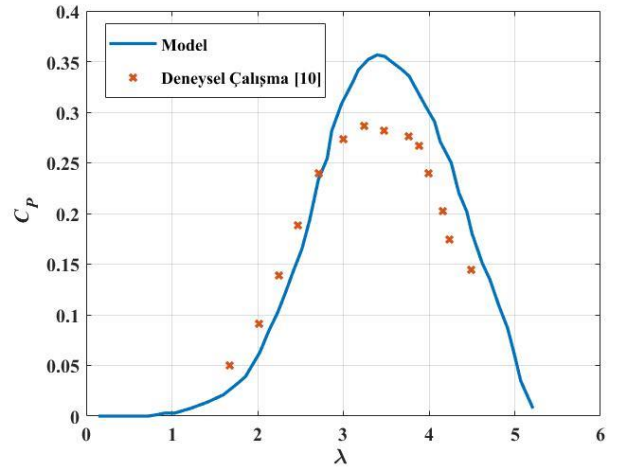
$$C_p = \frac{P}{1/2 \rho A U^3} \quad (15)$$

Bu çalışmada rüzgar hızı ( $U$ ) 10 m/s, hava yoğunluğu ( $\rho$ ) 1.225 kg/m<sup>3</sup>, 3 düz kanattan oluşan H-Darrieus rüzgar türbininde, kord uzunluğu ( $c$ ) 20 cm, rotor yarıçapı ( $R$ ) 2 m ve kanatların yüksekliği 3 m olarak alınmıştır.

### 3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

#### 3.1. Doğrulama

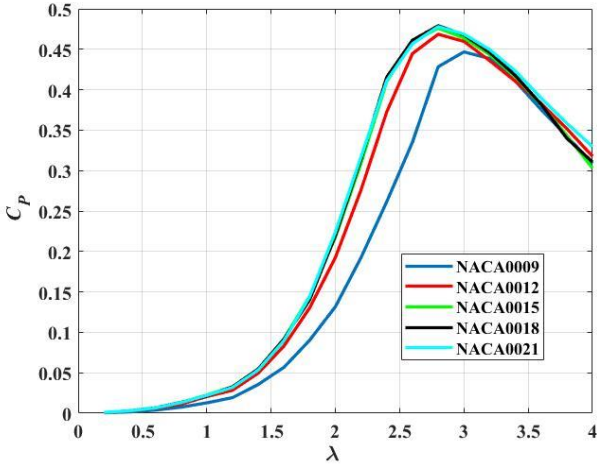
Çalışmada kullanılan model deneysel verilerle (Kjellin vd., 2011) karşılaştırılmış ve Şekil 3'de gösterilmiştir. Şekil 3'den görüldüğü üzere kullanılan modelde düşük kanat uç hız oranları ( $\lambda$ ) için deneysel veriler ile uyumludur ancak yüksek kanat uç hız oranlarında ( $\lambda$ ) deneysel verilerin üzerinde güç katsayısı ( $C_p$ ) değerleri elde edilmiştir. Modelde elde edilen en yüksek güç katsayısı ( $C_p$ ) değeri ile deneysel verilerden alınan en yüksek güç katsayısı ( $C_p$ ) değeri hemen hemen aynı kanat uç hız oranı  $\lambda=3.3$  değeri için bulunmuştur.



Şekil 3. Model ile deneysel verilerin (Kjellin vd., 2011) karşılaştırılması.

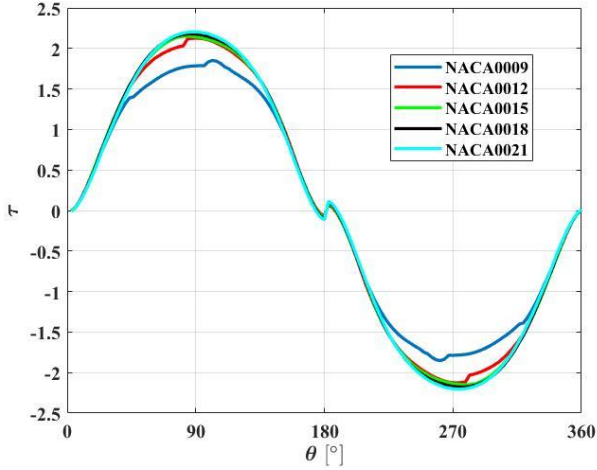
#### 3.2. Simetrik Kanat Profilleri

Seçilen beş adet simetrik kanat profili için (NACA0009, NACA0012, NACA0015, NACA0018, NACA0021) kanat uç hız oranına ( $\lambda$ ) bağlı olarak elde edilen güç katsayısı ( $C_p$ ) ve rotor açısına ( $\theta$ ) bağlı olarak elde edilen moment değerleri ( $\tau$ ) Şekil 4-5'de verilmiştir.



Şekil 4. Simetrik kanat profillerinin kanat uç hızına ( $\lambda$ ) bağlı olarak güç katsayılarının ( $C_p$ ) değişimi.

Şekil 4'de görüldüğü üzere en yüksek güç katsayısı değeri NACA0018 profili için  $\lambda=2.8$  değerinde  $C_{pmax}=0.4791$  olarak bulunmuştur.

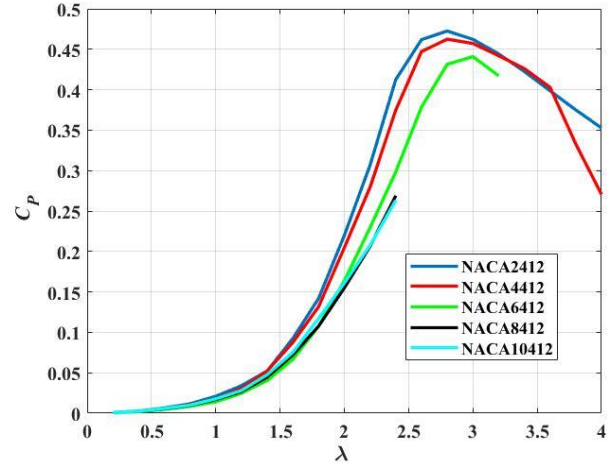


Şekil 5. Simetrik kanat profillerinin dönüş açısına ( $\theta$ ) bağlı olarak moment değerlerinin ( $\tau$ ) değişimi.

Şekil 5'de görüldüğü üzere en yüksek moment değerleri ( $\tau$ ) NACA0018 ve NACA0021 değerleri için elde edilmiştir. Diğer kanat profillerinde bazı dönüş açılarında dengesizlikler oluşmuştur.

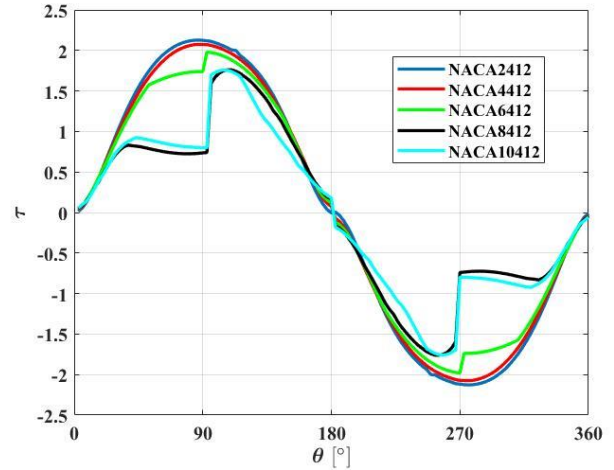
### 3.3. Asimetrik Kanat Profilleri

Seçilen beş adet asimetrik kanat profili için (NACA2412, NACA4412, NACA6412, NACA8412, NACA10412) kanat uç hız oranına ( $\lambda$ ) bağlı olarak elde edilen güç katsayısı ( $C_p$ ) ve rotor açısına ( $\theta$ ) bağlı olarak elde edilen moment değerleri ( $\tau$ ) Şekil 6-7'de verilmiştir.



Şekil 6. Asimetrik kanat profillerinin kanat uç hızına ( $\lambda$ ) bağlı olarak güç katsayılarının ( $C_p$ ) değişimi.

Şekil 6'da görüldüğü üzere en yüksek güç katsayısı değeri NACA2412 profili için  $\lambda=2.8$  değerinde  $C_{pmax}=0.4726$  olarak elde edilmiştir. NACA8412 ve NACA10412 kanat profilleri için çok düşük güç katsayısı ( $C_p$ ) değerleri elde edilmiştir.

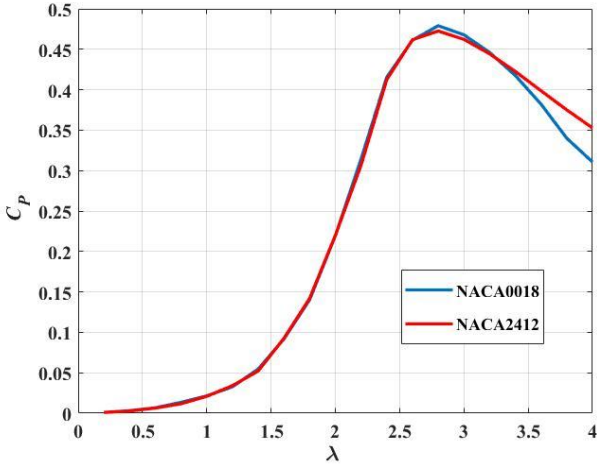


Şekil 7. Asimetrik kanat profillerinin dönüş açısına ( $\theta$ ) bağlı olarak moment değerlerinin ( $\tau$ ) değişimi.

Şekil 7'den görüleceği üzere en yüksek moment değerleri ( $\tau$ ) NACA2412 ve NACA4412 kanat profilleri için elde edilirken diğer kanat profillerinin moment değerlerinde dengesizlikler olduğu hesaplanmıştır.

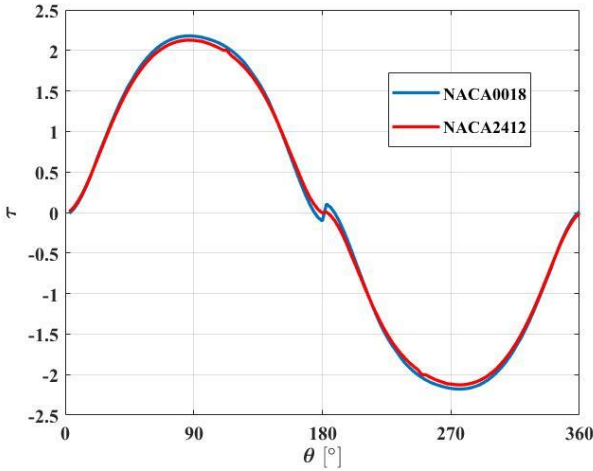
### 3.4 NACA0018 ve NACA2412 kanat profillerinin karşılaştırılması

En yüksek güç katsayısı değerleri ( $C_{pmax}$ ) elde edilen NACA0018 ve NACA2412 kanat profillerinin kanat uç hız oranına ( $\lambda$ ) bağlı olarak elde edilen güç katsayısı ( $C_p$ ) ve rotor açısına ( $\theta$ ) bağlı olarak elde edilen moment değerleri ( $\tau$ ) Şekil 8-9'da verilmiştir.



Şekil 8. NACA0018 ve NACA2412 kanat profillerinin kanat uç hızına ( $\lambda$ ) bağlı olarak güç katsayılarının ( $C_p$ ) değişimi.

Şekil 8'den görüldüğü üzere  $\lambda=2.8$  kanat uç hız oranında elde edilen ( $C_{Pmax}$ ) değerine kadar neredeyse aynı güç katsayısı ( $C_p$ ) değerleri elde edilirken bu değerden sonra  $\lambda=3.2$  kanat uç hız oranı değerine kadar NACA0018 kanat profili daha sonra ise NACA2412 kanat profili için daha yüksek güç katsayısı ( $C_p$ ) değerleri hesaplanmıştır.

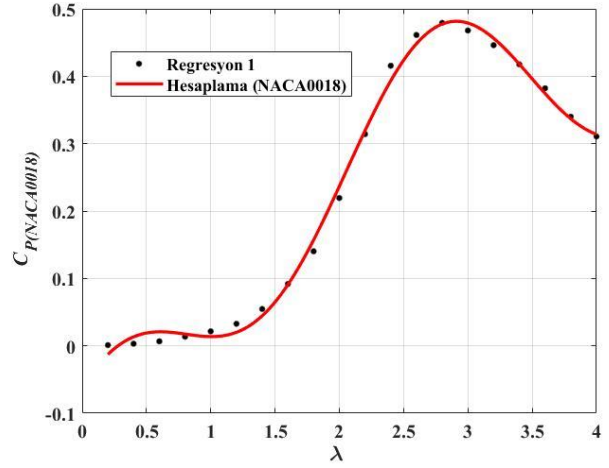


Şekil 9. NACA0018 ve NACA2412 kanat profillerinin dönüş açısına ( $\theta$ ) bağlı olarak moment değerlerinin ( $\tau$ ) değişimi.

Şekil 9'da NACA0018 kanat profili için elde edilen moment değerlerinin ( $\tau$ ) NACA2412 için elde edilen moment değerlerinden ( $\tau$ ) daha yüksek olduğu görülmektedir.

### 3.5 NACA0018 kanat profili regresyon hesapları

NACA0018 kanat profili için elde edilen güç katsayısı ( $C_p$ ) ve moment değerlerinden ( $\tau$ ) elde edilen veriler yardımıyla matematiksel bağıntılar çıkartılmıştır. Şekil 12'de NACA0018 kanat profilinin kanat uç hız oranına ( $\lambda$ ) bağlı olarak elde edilen güç katsayısı ( $C_p$ ) değerleri ve elde edilen bağıntı karşılaştırılmıştır.



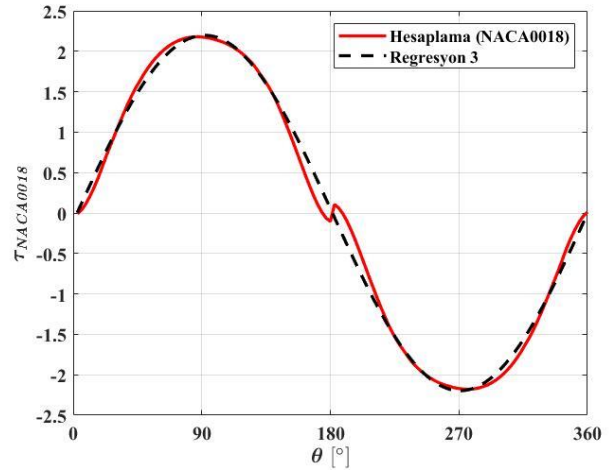
Şekil 10. NACA0018 kanat profilinin kanat uç hızına ( $\lambda$ ) bağlı olarak güç katsayılarının ( $C_p$ ) değişimini veren bağıntının karşılaştırılması.

Eşitlik 16'da NACA0018 kanat profilinin kanat uç hız oranına ( $\lambda$ ) bağlı olarak elde edilen güç katsayısı ( $C_{P(NACA0018)}$ ) değerini veren bağıntı gösterilmiştir.

$$C_{P(NACA0018)} = 0.4214 * \sin(0.5281 * \lambda + 0.3832) + 0.1033 * \sin(2.413 * \lambda + 1.203) \quad (16)$$

$$(r^2 = 0.9964)$$

Şekil 11'de NACA0018 kanat profili için rotor açısına ( $\theta$ ) bağlı olarak elde edilen moment değerleri ( $\tau_{NACA0018}$ ) elde edilen bağıntı karşılaştırılmıştır.



Şekil 11. NACA0018 kanat profilinin dönüş açısına ( $\theta$ ) bağlı olarak moment değerlerinin ( $\tau$ ) değişimini veren bağıntının karşılaştırılması.

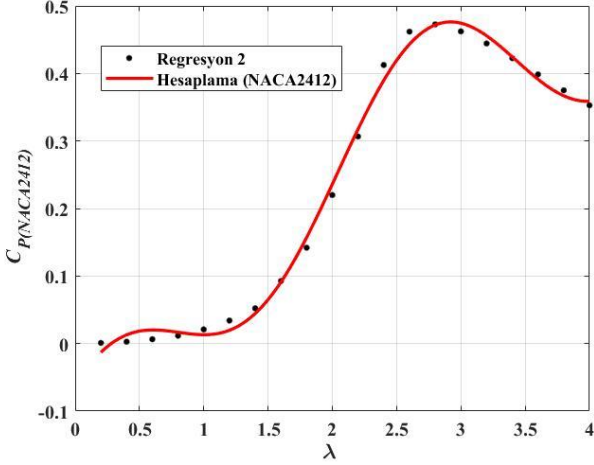
Eşitlik 17'de NACA0018 kanat profilinin rotor açısına ( $\theta$ ) bağlı olarak elde edilen moment değerleri ( $\tau_{NACA0018}$ ) için bulunan bağıntı verilmiştir.

$$\tau_{NACA0018} = 2.197 * \sin(0.01758 * \theta - 0.04826) \quad (17)$$

$$(r^2 = 0.9946)$$

### 3.6 NACA2412 kanat profili regresyon hesapları

NACA2412 kanat profili için elde edilen güç katsayısı ( $C_P$ ) ve moment değerlerinden ( $\tau$ ) elde edilen veriler yardımıyla matematiksel bağıntılar çıkartılmıştır. Şekil 12'de NACA2412 kanat profilinin kanat uç hız oranına ( $\lambda$ ) bağlı olarak elde edilen güç katsayısı ( $C_P$ ) değerleri ve elde edilen bağıntı karşılaştırılmıştır.



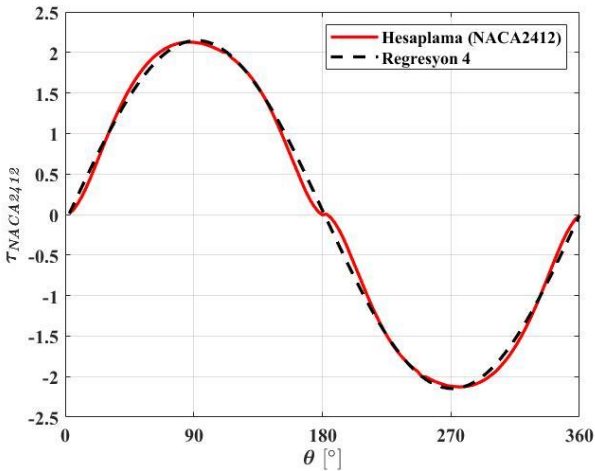
Şekil 12. NACA2412 kanat profilinin kanat uç hızına ( $\lambda$ ) bağlı olarak güç katsayılarının ( $C_P$ ) değişimini veren bağıntının karşılaştırılması.

Eşitlik 18'de NACA2412 kanat profilinin kanat uç hız oranına ( $\lambda$ ) bağlı olarak elde edilen güç katsayısı ( $C_{P(NACA2412)}$ ) değerini veren bağıntı gösterilmiştir.

$$C_{P(NACA2412)} = 0.456 * \sin(0.4654 * \lambda - 0.3364) + 0.09754 * \sin(2.451 * \lambda + 1.177) \quad (18)$$

$$(r^2 = 0.996)$$

Şekil 13'de NACA2412 kanat profili için rotor açısına ( $\theta$ ) bağlı olarak elde edilen moment değerleri ( $\tau_{NACA2412}$ ) elde edilen bağıntı karşılaştırılmıştır.



Şekil 13. NACA2412 kanat profilinin dönüş açısına ( $\theta$ ) bağlı olarak moment değerlerinin ( $\tau$ ) değişimini veren bağıntının karşılaştırılması.

Eşitlik 19'da NACA2412 kanat profilinin rotor açısına ( $\theta$ ) bağlı olarak elde edilen moment değerleri ( $\tau_{NACA2412}$ ) için bulunan bağıntı verilmiştir.

$$\tau_{NACA2412} = 2.147 * \sin(0.01756 * \theta - 0.04542) \quad (19)$$

$$(r^2 = 0.997)$$

Modelin deneysel veriler (Kjellin et al., 2011) ile karşılaştırıldığı Şekil 3'de incelenen modelin 3 boyutlu etkileri ve türbülans değerlerini ihmal etmesi deneysel verilerden daha yüksek güç katsayısı ( $C_P$ ) değerleri elde edilmesine yol açmıştır.

Simetrik ve asimetric kanat profilleri için elde edilen güç katsayısı ( $C_P$ ) ve moment ( $\tau$ ) grafiklerinden anlaşılacağı üzere simetrik kanat profilleri içerisinde NACA0018 en iyi aerodinamik performansı ( $C_{Pmax}$ ) gösterirken NACA0009 ve NACA0012 kanat profilleri daha düşük aerodinamik performans ( $C_P$ ) göstermiştir. Şekil 5'deki moment verileri incelendiğinde NACA0009 ve NACA0012 kanat profilleri için bazı açı değerlerinde dengesiz moment değerleri ( $\tau$ ) bulunmuştur.

Asimetrik kanat profillerinde ise en yüksek performansı ( $C_{Pmax}$ ) NACA2412 kanat profili gösterirken NACA6412, NACA8412 ve NACA10412 kanat profilleri daha düşük aerodinamik performans ( $C_P$ ) göstermiştir. Şekil 7'de verilen moment grafiği incelendiğinde NACA6412, NACA8412 ve NACA10412 kanat profilleri için dengesiz moment değerleri ( $\tau$ ) elde edilmiştir.

Dengesiz moment değerleri ( $\tau$ ) rotor üzerine gelen dengesiz kuvvetlerin sonucunda oluşmaktadır. Bu tarz dengesiz kuvvetler yalnızca rüzgar türbininin aerodinamik performansını olumsuz yönde etkilememekte aynı zamanda türbinin mekanik olarak daha fazla yorulmasına neden olmaktadır.

Seçilen on kanat profili arasında NACA0018 ve NACA2412 oldukça benzer performans göstermişlerdir. İki kanat profili için elde edilen kanat uç hız oranı ( $\lambda$ ) ve güç katsayısı ( $C_P$ ) ile dönüş açısı ( $\theta$ ) moment ( $\tau$ ) bağıntılarının regresyon katsayıları oldukça yüksektir ( $r^2 > 0.99$ ).

## 4. Sonuç

Çalışmada beş adet simetrik (NACA0009, NACA0012, NACA0015, NACA0018, NACA0021) ve beş adet asimetric (NACA2412, NACA4412, NACA6412, NACA8412, NACA10412) kanat profilinin düz kanatlı H-Darrieus rüzgar türbininde kullanılmasının türbin performansına olan etkileri incelenmiştir. İncelenen profillerin her biri için kanat uç hız oranının ( $\lambda$ ) güç katsayısına ( $C_P$ ) ve rotor açısının ( $\theta$ ) moment değerlerine ( $\tau$ ) göre değişimleri elde edilmiştir. Elde edilen verilere göre en yüksek güç katsayısı değeri NACA0018 kanat profili için  $C_{Pmax(NACA0018)}=0.4791$  olarak bulunurken NACA2412 kanat profili için en yüksek güç katsayısı  $C_{Pmax(NACA2412)}=0.4726$  bulunmuştur.

Simetrik kanat profillerinden NACA0009 ve NACA0012, asimetric kanat profillerinden ise NACA6412, NACA8412 ve NACA10412 profilleri bazı dönüş açılarında ( $\theta$ ) dengesiz moment değerleri ( $\tau$ ) oluşturduğundan dikey eksenli rüzgar türbinlerinde kullanılması uygun görülmemiştir.

NACA0018 ve NACA2412 kanat profilleri için kanat uç hız oranının ( $\lambda$ ) güç katsayısına ( $C_P$ ) ve rotor açısının ( $\theta$ ) moment değerlerine ( $\tau$ ) göre değişimlerini veren bağıntılar elde edilmiştir.

Elde edilen bağıntılar H-Darrieus rüzgar türbini tasarımında kullanılabilir.

Son olarak hesaplamalarda kullanılan modelin 2 boyutlu olduğu, 3 boyutlu hava hızı ve türbülans etkilerinin ihmal edilmesinden dolayı gerçek veriler ile farklılıklar olduğu sonucuna varılmıştır.

Modelin rüzgar türbini için güç katsayısı ( $C_p$ ) hesaplamaları oldukça hızlıdır. Ancak elde edilen veriler dikey eksenli rüzgar türbinlerinin aerodinamik performansının ilk tahmini olarak kullanılabilir. Daha gerçekçi veriler için rüzgar türbinlerinde yapılan deneylere ve üç boyutlu Sayısal Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) çalışmalarına gereksinim duyulmaktadır.

## Kaynakça

- Akpınar, E. K. (2006). A statistical investigation of wind energy potential. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 28(9), 807–820. <https://doi.org/10.1080/009083190928038>
- Bedon, G., De Betta, S., & Benini, E. (2016). Performance-optimized airfoil for Darrieus wind turbines. *Renewable Energy*, 94, 328–340. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.071>
- Bedon, G., Paulsen, U. S., Madsen, H. A., Belloni, F., Castelli, M. R., & Benini, E. (2015). Aerodynamic Benchmarking of the Deepwind Design. *Energy Procedia*, 75, 677–682. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.486>
- Berrone, S., Garbero, V., & Marro, M. (2011). Numerical simulation of low-Reynolds number flows past rectangular cylinders based on adaptive finite element and finite volume methods. *Computers and Fluids*, 40(1), 92–112. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2010.08.014>
- Chen, J., Chen, L., Xu, H., Yang, H., Ye, C., & Liu, D. (2016). Performance improvement of a vertical axis wind turbine by comprehensive assessment of an airfoil family. *Energy*, 114, 318–331. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.005>
- Kjellin, J., Bülow, F., Eriksson, S., Deglaire, P., Leijon, M., & Bernhoff, H. (2011). Power coefficient measurement on a 12 kW straight bladed vertical axis wind turbine. 36, 3050–3053. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.031>
- Mathew, S. (2006). *Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer Berlin Heidelberg.
- Paraschivoiu, I. (1983). *Double-Multiple Streamtube Model for Darrieus Wind Turbines*.
- Strickland, J. (1975). *The Darrieus Turbine: A Performance Prediction Model Using Multiple Stream Tubes*.
- Templin, R. J. (1974). Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine. *National Research Council Canada*.