NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI



NREL S 809 KESİTLİ YATAY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİN GÜÇ PERFORMANS HESABI

Mehmet BAKIRCI¹

¹Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği, Karabük, Türkiye

ÖZET

Literatürde yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin maksimum güç verimlerinin elde edildiği uç hız oranı için farklı sayısal değerler bulunmaktadır. Bu farkın nedenini ortaya çıkarmak için, NREL S809 airfoili ile Schmitz formülüne göre kanat geometrisi oluşturulan yatay eksenli rüzgâr türbinin maksimum güç değerinin, hangi uç hız oran değerinde oluştuğu BEM teoremi ile araştırılmıştır. NREL S 809'nın C_L ve C_D değerleri literatürdeki deney sonuçlarından alındığında; BEM teoremine göre; C_{p.max}=0,53 değeri, uç hız oranının 8 değerinde elde edilirken, C_L ve C_D değerleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile hesaplandığında; C_{p.max}=0,50 değeri uç hız oranının 7 değerinde elde edilmiştir. Airfoil aerodinamik performans değerlerinin doğru alınmasının, BEM teoremiyle bulunan sonuçların doğruluğunu önemli oranda etkilediği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: NREL S809, Yatay eksenli rüzgâr türbini, Güç, BEM, HAD

ABSTRACT

In the literature, there are different numerical values for the tip speed ratio at which the maximum power efficiency of horizontal axis wind turbines is obtained. In order to reveal the reason for this difference, the maximum power value of the horizontal axis wind turbine, whose blade geometry was created with NREL S809 airfoil according to the Schmitz formula, was investigated with the BEM theorem. When C_L and C_D values of NREL S 809 are taken from the experiment results in the literature (Sorensen); According to the BEM theorem; $C_{p,max} = 0.53$ value is obtained at 8 value of the tip velocity ratio, while C_L and C_D values are calculated with computational fluid dynamics; $C_{p,max} = 0.50$ value was obtained at 7 of the tip speed ratio. It is understood that getting the airfoil aerodynamic performance values correctly significantly affects the accuracy of the results found with the BEM theorem.

Keywords: NREL S809, Horizantal axis wind turbines, BEM, CFD

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

Mehmet BAKIRCI



1. GİRİŞ

Dünyanın enerji ihtiyacının artması ve yenilenebilir enerjinin atmosferi kirletmemesi nedeniyle yenilenebilir enerjinin önemi her geçen gün daha da artmaktadır. Bu durum, yenilenebilir enerjinin en önemli çeşidi olan rüzgar enerjisinden en verimli şekilde yararlanma çalışmalarının son 30 yıldır devam etmesine neden olmuştur [1]. Elektrik üretiminde daha verimli olmaları nedeniyle, üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri en çok tercih edilen türbin çeşidi olmuştur[2]. Belli bir bölgede rüzgar enerjisinden üretilebilecek yıllık enerji miktarı, türbinin yerleştirildiği bölgenin yıllık rüzgar hız dağılımına, türbin büyüklüğü ve verimine bağlıdır [2]. Türbinlerin verimleri, rotor aerodinamik, mekanik ve jeneratör verimleri ile kontrol sistemlerine bağlıdır [3]. Aerodinamik verim ise rotor geometrisine bağlıdır. Rotor geometrisini oluşturan kanat geometrisi, kesit profil seçimine ve bu profillerin boylarının kanat boyunca değişimine ve yerleştirilme açısına bağlıdır [3]. Bu konuda farklı formüller ve optimizasyon metotları literatürde bulunmaktadır [1-10].

Yatay eksenli rüzgar türbin (YERT) güç verimleri (C_P), faklı uç hız oranlarına göre hesaplanır. Uç hız oranı, kanat uç çizgisel hızının serbest bölgedeki rüzgar hızına oranı olarak tanımlanır. Bu çalışmada uç hız oranı için kısaltılmış biçimi UHO ve sembolü olarak λ ile gösterilmiştir. YERT'in, C_P değerinin hangi UHO değerinde maksimum olduğu literatürde farklı değerlerle ifade edilmiştir [10-14]. Bu makalenin asıl amacı, bu farklılığın nedenini BEM teoremiyle araştırmaktır. Bu nedenle, bu çalışmada airfoil aerodinamik katsayı değerlerinin YERT'in CP değerini nasıl etkilediği, BEM teoremine göre irdelenmiştir. Bunlarla birlikte, BEM teoremine göre rüzgar hızının ve türbin büyüklüğünün YERT'in C_P değerini etkileyip etkilemediği de araştırılmıştır.

Yatay eksenli rüzgar türbin aerodinamik performans hesaplarını teorik olarak yapmak için en yaygın kullanılan teorem BEM teoremidir. Literatürde BEM teoremi üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır [4-10]. Literatürde bu teoremi kullanılarak yapılan güç hesaplarında farklı sonuçlar dikkat çekmektedir [10-14]. Mc. Cosker, R=2,5 m uzunluğunda 3 kanada sahip YERT tasarımında tasarım uç hız oran değerinin, seçilen airfoilin kanat geometrisi ve rotor aerodinamik performansı üzerine etkilerini BEM teoremiyle hesaplamıştır. Yaptığı çalışma neticesinde NACA 23012 airfoili ile C_{p,max}=0,53 değerini OUHO=7 değerinde elde etmiştir. Bu geometriyi oluştururken tasarım uç hız oran (TUHO) değeri olarak

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI



6 değeri kullanmıştır. NACA 4412 airfoili C_{p,max}=0,55 değerinde OHU=11 değerinde elde etmiştir. Bu geometriyi oluştururken tasarım UHO=8 değerini kullanmıştır. Yine bu iki airfoili kullanarak tasarım UHO değerlerinin C_{p,max} ve OUHO üzerine etkilerini (TUHO için 6, 7, 8 değerlerini kullanarak) BEM teoremiyle hesaplamıştır. UHO değerinin 6'dan küçük olduğu durumlarda NACA 23012 airfoili, NACA 4412 airfoiline göre daha verimli iken bu oranın 8 den büyük olduğu durumlarda NACA 4412 nin daha verimli olduğunu BEM teoremiyle bulmuştur. Cosker, airfoil aerodinamik verileri için literatürden [15], Re=6.10⁶ deki C_L ve C_D değerlerini kullanmıştır [10]. Wang, rotor çapı 83 m olan üç kanatlı bir rüzgâr rotoru tasarlamıştır. Tasarlanan rotorun Cp değerlerini hesaplamak için üç farklı yöntemi kullanmıştır: 1.FVM (Free Vortex Method), 2.Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ve 3.Rüzgâr tünel deneyi. FVM yönteminin en güvenilir sonuçları verdiği sonucuna ulaşmışlardır. Tasarladıkları YERT'in OUHO değerini 10 olarak saptamıştır [11]. Bai ve arkadaşları, 0,36 m uzunluğunda kanada sahip üç kanatlı YERT tasarımında NACA 4418 airfoilini kullanmışlardır. 10 m/s rüzgâr hızında maksimum Cp değerini BEM teoremiyle 0,43, HAD simülasyonu ile 0,42 ve deneyle 0,415 olarak bulmuşlardır. HAD simülasyonunda k epsilon türbülans modelini kullanmışlardır. Bu değerleri OUHO nun 4,9 değerinde elde etmişlerdir. Geometriyi oluştururken TUHO değeri olarak da 5 kullanmışlardır. Reynold sayısının (C_L/C_D)max değerini etkilediğini ve böylece C_{p,max} ve OUHO değerleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle C_{p,max} ve OUHO değerlerini ampirik formüllerle ve BEM teoremiyle hesaplarken (C_L/C_D)_{max} değerinin hangi Reynold değerinde alındığına çok dikkat edilmesi gerekmektedir. Bai, verdikleri bir grafikte NACA 4418 airfoilinin (C_L/C_D)_{max} değerinin Re=40 000 için 13, Re= 70 000 için 32, Re=100 000 için 42 olduğu görülmektedir. Çok uzun kanatlarda Reynold sayısı kanat göbeğinden ucuna kadar önemli oranda değişir. Ancak kanat genişliği kanadın göbek kısmından ucuna kadar azaltıldığında havanın airfoile çarpma bağıl hızı uca doğru artarken airfoil boyu uca doğru azalacağından Reynold sayısının (Reynold formülünde, airfoil boyu ile bağıl hız çarpım şeklinde (ters orantılı) olduğu hatırlanırsa) pek değişmeyeceği söylenebilir. Literatürdeki bir çok çalışmada görülmüştür ki 10 m ve daha fazla kanat uzunluğunda YERT'ler için OUHO değeri 7'nin üzerinde oluşurken, Bai'nin yaptığı çalışmada, 0,36 m uzunluğundaki YERT için OUHO değeri 5 civarında gerçekleşmiştir [12]. Padmanabhan-Saravanan, NACA ve NREL airfoillerinin R=2,5 m yarıçaplı ve 3 kanatlı YERT performanslarını karşılaştırmıştır:

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI



NACA ile C_{p,max} değeri 0,52 olarak OUHU=10 da elde edilirken, NREL airfoili ile C_{p,max} değeri 0,49 olarak OUHO=10 da elde edilmiştir. Ancak UHO'nun 10'dan küçük değerlerinde her iki airfoille yakın C_{p,max} değerleri elde edilirken, UHO'nun 12'den büyük değerlerinde NREL ile daha yüksek Cp değerleri elde edilmiştir. Her ne kadar NACA daha yüksek Cp,max değerine sahipse de, UHO'nun daha geniş değerler aralığı için NREL airfoilinin daha verimli olduğu sonucuna ulaşmışlardır [13]. Azevedo ve Mendoncha, maksimum güç takip çalışmasında, elde ettikleri (Cp-UHO) grafiğinde farklı boyutlardaki YERT'lerin farklı OUHO ve C_{p,max} değerlerine sahip oldukları görülmektedir. R=5 cm iken C_{p,max}=0,2 ve OUHO=2, R=15 cm iken C_{p,max}=0,29 ve OUHO=3,7, R=40 cm iken C_{p,max}=0,4 ve OUHO=8,2 olarak elde ettikleri anlaşılmaktadır. Daha büyük YERT' ler için C_{p.max} değerinin 0,45 üstüne çıktığı ve OUHO değerinin de 8 civarlarında olduğu verdikleri grafiklerden görülmektedir [14]. Literatürdeki bu çalışmalardan, 1 m çapından daha küçük olan YERT rüzgâr türbinlerinde C_{p,max} ve OUHO değerlerinin çok etkilendiği anlaşılmaktadır. Bu değerleri rüzgâr hızından da etkilendiği diğer çalışmalardan da bilindiği için bu iki parametrenin reynold sayısı ile ifade edilmesinin daha doğru olacağı açıktır. Literatürdeki bilgilerden, tasarlanan rotor geometrisinin büyüklüğü daha az etkili olmakla birlikte (en azından 40 cm den daha büyük olanlarda), airfoil boy ve bağlanma açılarının kanat boyunca değişen değerlerinin nasıl alındığı maksimum güç değerini ve OUHU değerini çok etkilediği anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada, daha geniş dönme hızı aralığında yüksek verimleri nedeniyle, NREL S809 airfoili seçilerek [13], teorik olarak en yüksek güç verimliliğinin elde edildiği Schmitz formülüne [3] göre kanat geometrisi oluşturulmuştur. Elde edilen bu üç kanatlı YERT' C_P değeri, BEM teoremine göre hesaplandı. BEM teoremiyle güç hesabı yapılırken, NREL S 809 airfoilinin aerodinamik performansı ile ilgili bilgilere ihtiyaç vardır. Bu bilgiler literatürde çok fazla sayıda bulunmaktadır [13,16]. Ancak, bu çalışmada sözü edilen airfoilin kaldırma ve sürükleme kuvvet katsayı değerlerinin farklı hücum açılarındaki değerleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile yeniden hesaplandı. Bu çalışmada, NREL S809 airfoili için hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile bulunan kaldırma ve sürükleme kuvvet katsayı değerleri, Sorensen [17] rüzgâr türbin airfoil kataloğunda verilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Katalogda verilen değerlere ve bu çalışmada HAD ile bulunan sonuçlar ayrı ayrı BEM

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI



teoreminde kullanılarak farklı UHO (λ) değerlerinde güç verim değerleri hesaplandı. Elde edilen C_P- λ grafikleri karşılaştırıldı. Böylece airfoil bilgilerin doğru alınmasının sonucu nasıl etkilediği yeniden irdelenmiş oldu. Ayrıca bu çalışmada, maksimum gücün elde edildiği optimum uç hız oran (OUHO) değeri de araştırıldı.

Güç performans hesabı için hazırlanan BEM algoritmasının [3] Matlab bilgisayar programı ile çalıştırılabilmesi için C_L ve C_D katsayılarının stall öncesi tüm hücum açılarına göre değerlerini veren fonksiyona ihtiyaç olduğundan, 4.dereceden polinom fonksiyonları tanımlanmıştır. Bu değerlerden de C_L/C_D oranının maksimum olduğu hücum açısı(α_T) belirlenip bu açıdaki C_L ve C_D değerleri tespit edilmiştir. Tasarım hücum açısı α_T , tasarım kaldırma katsayısı (C_L)_T ve tasarım sürükleme katsayısı (C_D)_T değerleri, kanat geometri tasarımında ve bu tasarımla elde edilen YERT'in güç hesabında kullanılmıştır [3]. incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

NREL S809 airfoili için tasarım değerlerinin elde edilişi şöyledir: Katalogdan [17] alınan grafiklerde 0^0 , 5^0 , 10^0 , 15^0 , 20^0 değerlerindeki C_L ve C_D değerleri alınarak 4.dereceden (2.1) ve (2.2) polinom fonksiyonları tanımlanmış ve katsayıları matris çözümü ile bulunmuştur. k₀, k₁, k₂, k₃, k₄ terimleri kaldırma kuvvet polinomunun katsayıları ve l₀, l₁, l₂, l₃, l₄ terimleri ise sürükleme kuvvet polinomunun katsayılarını ifade etmektedir.

$$C_{L}(\alpha) = k_{0} + k_{1}\alpha + k_{2}\alpha^{2} + k_{3}\alpha^{3} + k_{4}\alpha^{4}$$
(2.1)

$$C_D(\alpha) = l_0 + l_1 \alpha + l_2 \alpha^2 + l_3 \alpha^3 + l_4 \alpha^4$$
(2.2)

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri uçak kanatları gibi sadece stall öncesi hücum açılarına maruz kalmazlar. Bu nedenle, stall sonrası aerodinamik veriler çok az sayıda airfoil için literatürde mevcut olduğundan ve stall açısı ile 90 derece hücum açısı aralığındaki her açı değerinde kaldırma ve sürükleme katsayı değerlerini hesaplayabilmek için Viterna tarafından geliştirilen ampirik formüller kullanılmıştır. Stall sonrası hücum açıları için ise Viterna eşitlikleri [3] (Eşitlikler 2.3-2.9) kullanılmıştır.

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020



Mehmet BAKIRCI

$$C_D = B_1 \sin^2 \alpha + B_2 \cos \alpha \tag{2.4}$$

$$A_1 = \frac{B_1}{2} \tag{2.5}$$

$$B_1 = C_{D_{\text{max}}} \tag{2.6}$$

$$C_{D_{\max}} \cong 1,11+0,18(AR)$$
 (2.7)

$$A_{2} = \left[C_{L_{stall}} - C_{D_{max}} \sin(\alpha_{stall}) \cos(\alpha_{stall}) \right] \cdot \left[\frac{\sin(\alpha_{stall})}{\cos^{2}(\alpha_{stall})} \right]$$
(2.8)

$$B_2 = C_{D_{stall}} - \frac{\left(C_{D_{\max}}\right)\sin^2\left(a_{stall}\right)}{\cos(a_{stall})}$$
(2.9)

Bu eşitliklerde stall; kaldırma katsayısının azalmaya başladığı durumu, α stall; kaldırma katsayısının azalmaya başladığı hücum açısını, (C_L)_{stall}; stall hücum açısındaki kaldırma katsayısını, (C_D)_{max}, hücum açısı 90⁰ olduğunda airfoilde oluşan sürükleme kuvvet katsayısını, AR; kanat en-boy oranını, (C_D)_{stall}; stall hücum açısındaki sürükleme kuvvet katsayısını belirtmektedir. Kanat geometrisi, maksimum güç elde edilecek şekilde tasarlanmalıdır. Kanat eleman momentum teoreminde elde edilen bağıntılarda gücü maksimum yapacak şekilde matematiksel hesaplamalar yapılarak optimum kanat geometrisi ölçülerini veren formüller elde edilir [3]. Schmitz formülleri olarak bilinen bu eşitlikler 2.10 ve 2.11'de verilmiştir:

$$c(r) = \frac{16\pi r}{B(C_L)_T} \sin^2\left(\frac{1}{3}\arctan\left(\frac{R}{r\lambda_T}\right)\right)$$
(2.10)

$$\beta(r) = \frac{2}{3} \arctan\left[\frac{R}{r}\frac{1}{\lambda_T}\right] - \alpha_T$$
(2.11)



NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI



Bu eşitliklerde kullanılan λ_T terimi tasarım uç hız oranını ifade etmektedir, bu çalışmada 'TUHO' ile kısaltılmış biçimi kullanılmıştır. Kanat geometrisini belirleyen faktörler; airfoilin şekli, airfoil boyunun C(r) kanat boyunca nasıl değişeceği ve bu airfoillerin rotor düzlemine hangi bağlanma açısıyla $\beta(r)$ yerleştirileceğidir [3]. Şekil 1'de yatay eksenli bir rüzgâr türbin kanat kesiti olan airfoil, bağlanma açısı (β), hücum açısı (α), bağıl hız (W), teğet hız, akım açısı φ , rüzgâr hızı, rotor düzlemi ve airfoil kiriş çizgisi arasındaki geometrik ilişki gösterilmiştir.



Şekil 1. Airfoil üzerinde akış geometrisi [2].

Bu çalışmada bu parametrelerin güç performansına etkileri hesaplanmıştır. Schmitz formülüne göre airfoil boyu C(r) ve yerleştirilme açısı β (r) hesaplanırken airfoilin tasarım kaldırma katsayısı (C_L)_T, tasarım hücum açısı α_T kullanılır [3]. Airfoilin tasarım hücum açısı (α_T) ve tasarım kaldırma katsayı değeri (C_L)_T, C_L/C_D oranının maksimum olduğu kritik durumda seçilir [3]. Bu değerler seçilen airfoilin aerodinamik özellikleridir. Airfoillerin kaldırma ve sürükleme katsayılarının hücum açısına göre değişen değerleri ve grafikleri farklı metotlara göre bulunmaktadır. Hatta internet ortamında aktif hesaplama XFoil [22] gibi bilgisayar paket programları da mevcuttur. Kanat eleman momentum teoremi, yatay eksenli rüzgâr türbin kanat tasarımında, performans hesabında yaygın kullanılan ve güvenilirliği ispatlanmış bir teoremdir [4]. Bu teoremin algoritması oluşturulmuş ve Matlab [20] programında 'kılavuz-gui' arayüzü ile girdiler ve çıktılar birlikte görüntülenmiştir. Belirli bir rüzgâr hızında elde edilebilecek gücü hesaplamak için BEM teoremi uygulanır. Kanat boyunca oluşan eksenel ve teğetsel kuvvet ile tork değerlerinin hesaplanabilmesi için her bir

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI



kanat ilk önce N kanat elemanına bölünür. Bundan sonra, her bir kanat elemanı için; akış açısı φ , hücum açısı α , teğetsel kuvvet katsayısı C_v, eksenel kuvvet katsayısı C_x, uç kaybı faktörü F, rotor katılık oranı σ ve rüzgâr doğrultusundaki hız değişimini ifade etmek için kullanılan indüksiyon değerleri a ve a', (2.12) - (2.23) bağıntılarıyla iteratif (tekrarlı işlem) olarak hesaplanır. a ve a' terimleri, rüzgâr rotor ekseninden geçerken, rüzgâr hızında, sırasıyla, eksenel ve teğetsel değişiklikleri temsil eder. Bu değerleri bulduktan sonra, her bir kanat elemanı için eksenel kuvvet "dFx", teğetsel kuvvet "dFy" ve güç "dP" ayrı ayrı hesaplanır. Rotorun F_x , F_y ve P toplam değerleri dF_x , dF_y ve dP değerleri kanat boyunca toplanarak edilerek elde edilir [3]. Rotorda elde edilecek güç çarpan değeri, aşağıdaki algoritmada verilen sırasıyla hesaplanır [3]. a ve a' değerleri başlangıç olarak sıfıra eşitlenir. Akış açısı (bağıl hız vektörü ile airfoil kiriş çizgisi arasındaki açı) φ , (Eşitlik 2.12) ile hesaplanır. β , airfoilin rotor düzlemine bağlanma açısı olmak üzere α hücum açısı, (Eşitlik 2.13) ile bulunur. C_L ve C_D değerlerinin stall öncesi değerleri polinom fonksiyonu ile hesaplanırken stall sonrası değerleri ise Viterna eşitlikleri ile hesaplanır. Cy teğetsel kuvvet katsayısı (Eşitlik 2.14) ile bulunurken eksenel kuvvet katsayı C_x değeri (Eşitlik 3.15) ile hesaplanır. Uç kayıp faktörü F ve f değerleri (Eşitlik 2.16) ve (Eşitlik 2.17) eşitlikleri ile hesaplanır. Kanat elemanı yüzey alanını rotor şerit alanına oranı olarak tanımlanan katılık faktörü σ (Eşitlik 2.18) ile bulunur. Eksenel hız indüksiyon katsayısı olan a değeri (Eşitlik 3.19) ile bulunur. Eğer hesaplanan bu a değeri kritik a (kritik ac değeri 0,2-0,4 aralağında alınabilir) değerinden büyük ise Glauert düzeltmesi için (Eşitlik 2.20) ve (Eşitlik 2.21) ile a değeri yeniden hesaplanır. Teğetsel hız indüksiyon katsayısı a' değeri (Eşitlik 2.22) ile bulunur. a ve a' değerleri hesaplandıktan sonra (Eşitlik 2.23) kriterine uygun değil ise ilk adım işlemine (Eşitlik 2.12) dönülür. Eğer bu kritere uygunsa iterasyon işlemi sonlandırılır ve bir sonraki adıma (Eşitlik 2.24) geçilir. a ve a' değerleri yakınsadıktan sonra kanat elemanı üzerindeki bağıl rüzgâr hızı W (Eşitlik 2.24) hesaplanır. Her bir kanat elemanı için eksenel kuvvet (dF_x), teğetsel kuvvet (dF_v), tork (dT), güç (dP) değerleri Eşitlik 2.25 – 2.28 ile hesaplanır. Toplam teğetsel kuvvet, toplam eksenel kuvvet, toplam güç ve güç katsayısı (2.29 - 2.32) aralığındaki eşitliklerle sırasıyla hesaplanır.

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{(1-a)V_1}{(1+a')\omega r} \right)$$
(2.12)

UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 2(2): 1-27, 2020 UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020	NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı Mehmet BAKIRCI	BARAD Bill Karadoniz Madona symbol Porrod

$$\alpha = \varphi - \beta \tag{2.13}$$

$$C_y = C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi \tag{2.14}$$

$$C_x = C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi \tag{2.15}$$

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(e^{-f})$$
(2.16)

$$f = \frac{B}{2} \frac{R - r}{r - \sin \varphi}$$
(2.17)

$$\sigma = \frac{c B}{2\pi r} \tag{2.18}$$

$$a = \frac{1}{\frac{4F\sin^2\varphi}{\sigma C_x} + 1}$$
(2.19)

$$a = \frac{1}{2}a[2 + K(1 - 2a_c)]\sqrt{[K(1 - 2a_c) + 2]^2 + 4(Ka_c^2 - 1)}$$
(2.20)

$$K = \frac{4Fsin^2(\varphi)}{\sigma C_y}$$
(2.21)

$$a' = \frac{1}{\frac{4F\sin\varphi\cos\varphi}{\sigma C_y} - 1}$$
(2.22)

$$|a_{n+1} - a_n| < 0,001$$
 ve $|a'_{n+1} - a'_n| < 0,001$ (2.23)

$$W = \sqrt{[(1-a)V_1]^2 + [(1+a')\omega r]^2}$$
(2.24)

9

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI



 $dF_x = \left(\frac{1}{2}\rho W^2 c \ dr\right) C_x \tag{2.25}$

- $dF_y = \left(\frac{1}{2}\rho W^2 c \, dr\right) C_y \tag{2.26}$
- $dT = r \, dF_y \tag{2.27}$

$$dP = \omega \, dT \tag{2.28}$$

$$F_{y} = B \sum_{i=1}^{N} (dF_{y})_{i}$$
(2.29)

$$F_x = B \sum_{i=1}^{N} (dF_x)_i$$
(2.30)

$$P = B \sum_{i=1}^{N} (dP)_i$$
 (2.31)

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A V_1^3}$$
(2.32)

Matlab bilgisayar paket programı kullanılarak, BEM denklemlerini çözmek için çok işlevli bir kılavuz oluşturulup, 14 basamaklı algoritma kılavuz arka plana kodlanmıştır. Şekil 2, uygulama kılavuzunun bir ekran görüntüsünü göstermektedir.

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020



Mehmet BAKIRCI

RUN(çalıştır) CLEAR(sil) SAVE(kaydet) lamda design(TUHO) Axis force(eksenel kuvvet) Power(Güç) Power coefficient(Cp)

Şekil 2. Matlab BEM teoremi uygulama kılavuzu.

Matlab'da bir kılavuz oluşturmanın esas amacı, iterasyon işlemlerini yapmak ve farklı geometriler için hesaplamaları kolayca tekrarlayabilmektir [20]. Kullanıcı, rotor yarıçapı, kanat sayısı, rüzgâr hızı, göbek yarıçapı, beş farklı hücum açısındaki airfoil kaldırma ve sürtünme katsayı değerleri, kanat eleman sayısı (N), TUHO (λ_T) değeri ve başlangıç hız indüksiyon değerlerini girer. "Run-Çalıştır" butonu tıklandığında, airfoilin her hücum açısı için aerodinamik değerlerin çıktı verileri elde edilir. Çıkış parametresi olarak; airfoil polar grafikleri ve kanat geometri ölçülerinin yanısıra kanat boyunca her bir kanat elemanı için akış açısı, bağıl rüzgâr hızı, kaldırma katsayı değerleri, eksenel kuvvetler, teğetsel kuvvetler, tork, güç ve güç çarpanı elde edilir. Ayrıca rotorun toplam eksenel, teğetsel kuvvetler, tork, güç ve güç katsayı değerleri ekranda görülür. Elde edilen değerlere ek olarak, ayrıca, rotorun farklı UHO değerlerindeki güç çarpan değerlerinin karşılaştırmalı listesi ve grafikleri kolayca elde edilebilmektedir. Bu çalışmada temel olarak kanat uzunluğu 10 m, göbek yarıçapı 1 m ve rüzgâr hızı 12 m/s olarak alınmıştır. Ancak farklı değerlerin etkisi de BEM-Matlab kılavuzuyla bu çalışmada irdelenmiştir.

NREL S 809 airfoilinin aerodinamik değerleri iki boyutlu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile k-epsilon türbülans modeli[21] kullanılarak analizler yapıldı. Farklı hücum açılarındaki C_L ve C_D değerleri Ansys Fluent programı ile iki boyutlu olarak hesaplandı. Bu

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI



hesaplar şu şekilde gerçekleştirilmiştir: Kanat kesit geometrilerinin koordinatları (2 boyutlu airfoil koordinatları), Ansys Fluent programının geometri kısmına alınmıştır. Airfoil geometrisi etrafında, Şekil 3' de gösterildiği gibi, C şeklinde bir akış alan sınırları çizilmiştir. Sınır koşulları için inlet-giriş kısmına (eğri F) V hız değeri ve outlet-çıkış kısmına da (çizgi C) basınç değeri ve airfoil kenar çizgisi de (G eğrisi) "wall; duvar-kaymama koşulu" olarak ayarlanmıştır. AB ve DE kenarları simetrik olarak çizilmiş ve programda simetrik olarak tanımlanmıştır [21].



Şekil 3. HAD Airfoil akış alanı [91]

İnlet (giriş) sınırında V hız bileşenlerine ayrılarak girilir ve böylece hücum açısı da tanımlanmış olur [21].

$$V_{x} = V.\cos\alpha \tag{2.33}$$

$$V_v = V.sin\alpha$$

Kütle ve momentum korunum denklemleri inlet (giriş)' ten başlatılır. Bu denklemler girişten başlayarak tüm hücrelerde iterasyon şeklinde çözülerek her bir hücredeki hız, basınç ve diğer fiziksel değerler hesaplanır. Yakınsama kriteri sağlanıncaya kadar iterasyon işlemi devam eder [21]. Airfoilin HAD analizinde, giriş sınır şartı olarak 30 m/s hız ve çıkış sınır şartı olarak sıfır etkin statik basınç değeri alınmıştır. Rüzgar hızının 10 m/s ve kanadın

(2.34)

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI



dönmesinden kaynaklana teğet hız birlikte bağıl hız oluşturduğundan airfoile yaklaşan havanın hızı 30 m/s olarak alınmıştır. Aslında bu bağıl hız, kanadın hangi kesitinden bahsedildiğine göre ve ve rotor açısal dönme hızına göre değişmektedir. 30 m/s hız ve airfoil veter(chord) uzunluğu 1 m alındığında bu hava akışı için reynold sayısı yaklaşık olarak 2 milyon denilebilir. Akış alanı, Şekil 4'de gösterildiği gibi bir ağ oluşturmak üzere hücrelere bölünmüştür. Her hücre, korunum denklemlerinin çözülebileceği çok küçük bir kontrol hacmi olarak düşünülebilir [21]. Çözüm hassaslığı açısından, airfoile yakın bölgelerde küçük hücreler kullanılmıştır. HAD çözümünün doğruluğu, yüksek bir çözünürlüğe sahip (çok hücre) örgü ağına bağlıdır [21]. Yaklaşık 10 000, 107 000 ve 1 500 000 üçgen gözenekler test edilmiş ve 100 000'den fazla ağ kullanıldığında sonuçlarda anlamlı olarak iyileşme olmadığı görüldüğünden, 100 000 ağ gözü kullanılmıştır.



Şekil 4. HAD; airfoil akış alanında oluşturulan hücreler (C mesh [21]).

Hücre oluşturma işlemini tamamladıktan sonra, akış alanı geometrisi HAD simülasyonuna aktarıldı. Başlangıç değerlerinden başlayarak, tüm hücreler için korunum,

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI



momentum ve türbülans modeli denklemleri çözüldü. Bu iterasyonlar için yakınsama kriteri 10⁻⁶ alınmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, NREL S809 airfoili için yapılan HAD hesaplamalarından elde edilen ve BEM teoreminin uygulandığı MATLAB ile bulunan bulgular verilmiştir. Bulunan HAD sonuçları, literatürde [17] verilen deney sonuçlarıyla karşılaştırıldı. Karşılaştırılan özellikler, statik basınç, hız, basınç konturları, kaldırma (lift) ve sürükleme (drag) katsayı değerleri oldu. Farklı hücum açılarına göre elde edilen basınç, hız konturları, C_p basınç katsayı grafikleri, kaldırma (lift) ve sürükleme (drag) katsayı değerleri Şekil 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 de verilmiştir. Hücum açısı olarak 0⁰, 3⁰, 6⁰, 9⁰, 12⁰, 15⁰, 18⁰ açıları seçilmiştir. Airfoil üzerinde bir noktadaki statik basınç değeri P, açık hava basıncı P₀, havanın airfoile yaklaşma hızı V ve yoğunluğu ρ olmak üzere, C_p basınç katsayısı,

$$C_{p} = \frac{p - p_{0}}{\frac{1}{2}\rho V^{2}}$$
(2.41)

eşitliği ile tanımlanır [15]. C_p nin negatif değerleri, statik basıncın atmosfer basıncının altında olduğunu gösterir. Airfoillerin üst kısımlarının büyük bölümünde Cp değerleri negatif olur. Alt kısımlarının büyük bölümünde ise C_p değeri pozitif olur [15].

 α =0⁰ hücum açısında yapılan HAD simülasyonunda 30 m/s hava hızının airfoil üst yüzeyinden geçerken 40,7 m/s hızına ulaştığı hız konturundan görülmektedir. Havanın etki statik basıncı airfoile yaklaşırken 0 paskal, üst yüzeyinden geçerken -480 paskal, alt yüzeyinden geçerken +582 paskal değerine ulaştığı basınç konturundan anlaşılmaktadır. C_p basınç katsayısının minimum değeri -0,8 ve maksimum değeri ise +1 olduğu grafikten okunabilmektedir. α =0⁰ hücum açısında C_L=0,13446 ve C_D=0,0104 olarak bulunmuştur (Şekil 5).

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI





Şekil 5. NREL S 809 airfoilinin HAD simülasyon sonuçları, $\alpha = 0^{\circ}$.

 α =3⁰ hücum açısında yapılan HAD simülasyonunda 30 m/s hava hızının airfoil üst yüzeyinden geçerken 41 m/s hızına ulaştığı hız konturundan görülmektedir. Havanın etki statik basıncı airfoile yaklaşırken 0 paskal, üst yüzeyinden geçerken -513 paskal, alt yüzeyinden geçerken +557 paskal değerine ulaştığı basınç konturundan anlaşılmaktadır. C_p basınç katsayısının minimum değeri -0,9 ve maksimum değeri ise +1,26 olduğu grafikten okunabilmektedir. α =3⁰ hücum açısında C_L=0,4805 ve C_D=0,0117 olarak bulunmuştur (Şekil 6).

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI





Şekil 6. NREL S 809 airfoilinin HAD simülasyon sonuçları, $\alpha=3^{0}$



Şekil 7. NREL S 809 airfoilinin HAD simülasyon sonuçları, $\alpha = 6^0$.

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI



 α =6⁰ hücum açısında yapılan HAD simülasyonunda 30 m/s hava hızının airfoil üst yüzeyinden geçerken 47 m/s hızına ulaştığı hız konturundan görülmektedir. Havanın etki statik basıncı airfoile yaklaşırken 0 paskal, üst yüzeyinden geçerken -876 paskal, alt yüzeyinden geçerken +560 paskal değerine ulaştığı basınç konturundan anlaşılmaktadır. C_p basınç katsayısının minimum değeri -1,6 ve maksimum değeri ise +1 olduğu grafikten okunabilmektedir. α =6⁰ hücum açısında C_L=0,81145 ve C_D=0,0156 olarak bulunmuştur (Şekil 7).



Şekil 8. NREL S 809 airfoilinin HAD simülasyon sonuçları, $\alpha = 9^{\circ}$.

 α =9⁰ hücum açısında yapılan HAD simülasyonunda 30 m/s hava hızının airfoil üst yüzeyinden geçerken 59 m/s hızına ulaştığı hız konturundan görülmektedir. Havanın etki statik basıncı airfoile yaklaşırken 0 paskal, üst yüzeyinden geçerken -2070 paskal, alt yüzeyinden geçerken +564 paskal değerine ulaştığı basınç konturundan anlaşılmaktadır. C_p basınç katsayısının minimum değeri -3,6 ve maksimum değeri ise +1 olduğu grafikten

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI



okunabilmektedir. $\alpha=9^{0}$ hücum açısında C_L=1,041 ve C_D=0,02488 olarak bulunmuştur (Şekil 8).

 α =12⁰ hücum açısında yapılan HAD simülasyonunda 30 m/s hava hızının airfoil üst yüzeyinden geçerken 63 m/s hızına ulaştığı hız konturundan görülmektedir. Havanın etki statik basıncı airfoile yaklaşırken 0 paskal, üst yüzeyinden geçerken -3050 paskal, alt yüzeyinden geçerken +567 paskal değerine ulaştığı basınç konturundan anlaşılmaktadır. C_p basınç katsayısının minimum değeri -5,6 ve maksimum değeri ise +1 olduğu grafikten okunabilmektedir. α =12⁰ hücum açısında C_L=1,1259 ve C_D=0,0463 olarak bulunmuştur (Şekil 9).



Şekil 9. NREL S 809 airfoilinin HAD simülasyon sonuçları, $\alpha = 12^{0}$.

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI





Şekil 10. NREL S 809 airfoilinin HAD simülasyon sonuçları, $\alpha = 15^{\circ}$.

 α =15⁰ hücum açısında yapılan HAD simülasyonunda 30 m/s hava hızının airfoil üst yüzeyinden geçerken 77,3 m/s hızına ulaştığı hız konturundan görülmektedir. Havanın etki statik basıncı airfoile yaklaşırken 0 paskal, üst yüzeyinden geçerken -4250 paskal, alt yüzeyinden geçerken +571 paskal değerine ulaştığı basınç konturundan anlaşılmaktadır. C_p basınç katsayısının minimum değeri -7,6 ve maksimum değeri ise +1 olduğu grafikten okunabilmektedir. α =15⁰ hücum açısında C_L=1,185 ve C_D=0,07428 olarak bulunmuştur (Şekil 10).

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI





Şekil 11. NREL S 809 airfoilinin HAD simülasyon sonuçları $\alpha = 18^{\circ}$.

 α =18⁰ hücum açısında yapılan HAD simülasyonunda 30 m/s hava hızının airfoil üst yüzeyinden geçerken 83,5 m/s hızına ulaştığı hız konturundan görülmektedir. Havanın etki statik basıncı airfoile yaklaşırken 0 paskal, üst yüzeyinden geçerken -5230 paskal, alt yüzeyinden geçerken +576 paskal değerine ulaştığı basınç konturundan anlaşılmaktadır. C_p basınç katsayısının minimum değeri -8,6 ve maksimum değeri ise +1 olduğu grafikten okunabilmektedir. α =18⁰ hücum açısında C_L=1,17149 ve C_D=0,112 olarak bulunmuştur (Şekil 11).

 α =15⁰ hücum açısından sonra C_L değeri azalmaya başlamış, C_D değeri ise daha hızlı artmaya devam etmiştir. NREL S 809 HAD ansys fluent sonuçları Tablo.1'de özetlenmiştir.

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI

	Sürükl	eme kats	ayısı (CD;	Drag)			
Alfa(α) Değerler	00	30	6 ⁰	90	120	15 ⁰	180
Deney Sonuçları (Sorenson)	0,01386	0,01426	0,01254	0,02018	0,03921	0,06199	0,09757
HAD(Ansys) sonuçları	0,01043	0,0117	0,01562	0,02488	0,04631	0,07428	0,11204
	Kald	irma kats	ayısı (CL;	Lift)			
Alfa(α) Değerler	00	30	6 ⁰	90	120	150	18 ⁰
Deney Sonuçları (Sorenson)	0,1519	0,4996	0,8446	0,9437	1,0031	1,0866	1,1307
HAD(ansys) sonuçları	0,1345	0,48053	0,8115	1,0414	1,1259	1,1850	1,17149

Tablo

Tablo 1'de Sorensen katalog [17] değerleride karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ansys flunet HAD ile bulunan sonuçlar ile Sorensen kataloğundan alınan değerler arasındaki farkların çok az olduğu görülmektedir. NREL S 809 için Tablo 1'de ki değerler grafik olarak Şekil 12'de gösterilmiştir. Ayrıca CL/CD oranının hücum açısına göre değişen değerleri gösteren grafikler, hem fluent hem de Sorensen katalog verilerine göre çizilmiştir.



NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI





Şekil 12. NREL S 809 airfoilinin aerodinamik katsayı grafiklerinin HAD ve Sorensen [17] karşılaştırması.

 C_{I}/C_{D} oranının maksimum değeri Sorensen' e göre 69 iken fluent sonucuna göre 51 olmuştur. Ancak bu değer her ikisi içinde aynı hücum açısında elde edilmiştir. Bu hücum açısı YERT kanat geometri tasarımında tasarım hücum açısı olarak alınır; $\alpha_{T}=7^{0}$. HAD fluent sonuçlarına göre tasarım hücum açısı $\alpha_{T}=7^{0}$ ve tasarım kaldırma kuvvet katsayısı $(C_{L})_{T}$ değeri de 0,86 olarak elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak R=10 m YERT için kanat üzerinde 10 eleman oluşturularak Schmitz formülüne göre hesaplanan $\beta(r)$ 'nin derece olarak ve c(r)'nin metre olarak ve airfoil bağlanma kanat boyunca değişen değerleri grafik olarak Şekil 13'de verilmiştir

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI





Şekil 13. NREL S 809 YERT, C(r) ve $\beta(r)$ grafikleri.

Kanadın rotor göbeğine en yakın (r/R=0,1) kanat elemanında β bağlanma açısı 18⁰ ve C airfoil boyu 1,8 m olurken kanadın ucuna yakın (r/R=0,9) olan 9.kanat elemanında β bağlanma açısı 0⁰ ve C airfoil boyu 0,48 m olarak hesaplanmıştır.

HAD ile hesaplanarak bulunan C_L ve C_D değerlerini, YERT'in BEM-Matlab kılavuzunda kullanarak C_p -UHO değerleri elde edilmiştir. C_L ve C_D değerleri Sorensen "wind turbine airfoil" kataloğundaki verilerden (deney sonuçları) alınarak [17] YERT'in BEM-Matlab kılavuzunda C_p -UHO değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar grafik olarak Şekil 14'de gösterilmiştir.

NREL S 809'nın C_L ve C_D değerleri katalogdan (Sorensen) alındığında; BEM teoremine göre; $C_{p,max}$ =0,53, OUHO=8, C_L ve C_D değerleri HAD (fluent) ile hesapladığında; $C_{p,max}$ =0,50, OUHO=7 olduğu Şekil 14 deki C_p -UHO grafiğinden görülmektedir.

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020



Mehmet BAKIRCI

Şekil 14. NREL S 809 YERT (Cp-UHO) HAD-Sorenson karşılaştırması

BEM teoremiyle yapılan hesaplamalarda rüzgâr hızının ve türbin boyutlarının güç çarpan ve OUHO değerini etkilemediği görülmüştür. UHO değerinin, literatürde ifade edildiği gibi [1-19] C_P değerini etkileyen en önemli parametre olduğu BEM teoremiyle yeniden anlaşılmıştır. Kanat geometrisini oluşturan airfoil şekli, tasarım uç hız oran (TUHO) değeri ve kanat geometri ölçülerini optimize etmek için kullanılan formüllerin seçimi de Cp ve OUHO değerlerini çok önemli orada etkilediği BEM teoremiyle rahatlıkla hesaplanabilmektedir. Airfoil kaldırma ve sürükleme katsayı değerleri ise C_P- λ grafiğini çok önemli oranda etkilediği BEM teoremiyle kolayca görülmektedir. Farklı çalışmalarda, ister farklı airfoil seçiminden kaynaklasın isterse aynı airfoilin aerodinamik katsayı değerlerinin farklı alınması olsun, sonuçların farklı olmasına neden olmaktadır. Aynı airfoile aerodiamik katsayı değerlerinin farklı olmasının nedeni farklı hızların veya reynold değerlerinin kullanılması olabilir. Mach sayısının 0,3 den küçük olması, sıkıştırılamaz akış kabulünün doğruluğu için şarttır. Bu durumu dikkate almak yeterli değildir; havanın airfoile yaklaşma hız değeri reynold sayısını etkilediğinden BEM hesaplarında bu değeri dikkatli almak gerekir. Havanın, rüzgâr türbin airfoiline yaklaşma hızı rüzgâr serbest bölge hızı değil, kanadın dönme hareketinden dolayı oluşan hızında dikkate alınarak hesaplandığı bağıl hız değeridir.

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI



4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

NREL S 809'nın C_L ve C_D değerleri literatürdeki deney sonuçlarından alındığında (Sorensen) alındığında; BEM teoremine göre; C_{p,max}=0,53 değeri, uç hız oranının 8 değerinde elde edilirken, C_L ve C_D değerleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile hesaplandığında; C_{p,max}=0,50 değeri uç hız oranının 7 değerinde elde edilmiştir.

BEM teorem sonuçlarının doğruluğu airfoil aerodinamik değerlerine sıkı sıkıya bağlıdır. Bu nedenle airfoil kaldırma ve sürükleme kuvvet değerlerinin doğru değerlerde alınması, BEM teoremi ile hesaplanan kuvvet, tork ve güç değerlerinin doğru hesaplanmasında çok önemlidir. Reynold sayısının, bu aerodinamik değerler üzerinde etkisi mutlaka dikkate alınmalıdır. Reynold sayısını etkileyen akışkan viskozite, yoğunluk, airfoil boyu önemli ancak hesaplamalı akışkanlar dinamiği hesaplamalarında özellikle alınan hız en önemlisidir.

Literatürde BEM hesaplaması sonucunda bulunan değerleri arasındaki farklılıkların en önemli nedeni airfoil aerodinamik değerlerin farklı alınmasıdır denilebilir.

Bu çalışmanın devamı olarak, airfoil seçiminin C_P güç çarpan ve OUHO değeri üzerindeki etkileri araştırılabilir. Bunun için, NREL S809 dan farklı airfoiller kullanılarak tasarlanan yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin farklı uç hız oranlarındaki C_P (güç çarpan) değerleri BEM teoremi ile hesaplanabilir.

KAYNAKLAR

- 1. Wang, T. "A brief review on wind turbine aerodynamics" China Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (2012).
- 2. Gash, R., Twele J. "Wind power plans; fundementals, design, construction and operation" James and Janes (2005).
- 3. Gundoft, S. "Wind Turbines", University Collage of Aarhus Denmark, Copyright (2009).
- Bavanish, B., Thyagarajan, K. "Optimization of power coefficient on a horizontal axis wind turbine using BEM theory", Renewable and Sustainable Energy Reviews 26:169-182 (2013)

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI



- Naqvi, M. A., Abbas, A., Hamid, M., Tarar, H., and Ahmed, L. "Aerodynamic design optimization of residential scale wind turbine blades for lower wind speeds" International Journal of Renewable Energy Research, 5(2) (2015).
- Bavanish, B., Thyagrajan, K. "Optimization of power coefficient on a horizontal axis wind turbine using bem theory" Renewable and Sustainable Energy Reviews 26:169-182 (2013).
- Ingram G., "Wind turbine blade analysis using the blade element momentum method", Version1.1, Copyright, October, Creative Commons Attribution- Share Alike 3.0 Unported License, October 18, 1-21 (2011).
- 8. Vaz, J.R.P., Pinho J. T., Mesquita A.L.A., "An extension of BEM method to horizontal-axis wind turbine design", Renewable Energy 36(6): 1734-1740 (2011).
- 9. Okulov, V.L. and Sorensen, J.N., "Refined Betz limit for rotors with a finite number of blades", Wind Energy 11(4): 415- 426 (2008).
- Mc Cosker, J. "Design and optimization of a small wind turbine" Requirements for MSc of Mechanical Engineering, Master's Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute Hartford (2012).
- 11. Wang, T., Wang, L., Zhong, W., Xu, B. and Chen, L. "Large-scale wind turbine blade design and aerodynamic analysis" Chinese Science Bulletin 57: 466–472 (2012).
- 12. Bai, C. J., Hsiao, F. B., Li, M. H., Huang, G. Y. and Chen, Y. J. "Design of 10 kW horizontal-axis wind turbine (HAWT) blade and aerodynamic investigation using numerical simulation", 7th Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science, 67: 279-287 (2013).
- Padmanabhan, K. K. and Saravanan, R. "Study of the performance and robustness of NREL and NACA blade for wind turbine applications" European Journal of Scientific Research 72(3): 440–446 (2012).
- Azevedo, J. and Mendoncha F. "Small Scale Wind Energy Harvesting with Maximum Power Tracking Funchal", Portugal Centre for Exact Science and Engineering, University of Madeira (2015).
- 15. Abbott, I.H. and Von Doenhoff, A. E., "Theory of wing sections, Including a summary of airfoil data", Dover Publications Inc. Copyright, New York, USA (1959).

NREL S 809 Kesitli Yatay Eksenli Rüzgâr Türbin Güç Performans Hesabı

UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science, 2(2): 1-27, 2020

Mehmet BAKIRCI



- Kumar, B. N., Paramasivam, K. M., Prasanna, M., Karis, M., "Computational fluid dynamics analysis of aerodynamic characteristics of NACA 4412 vs S 809 airfoil for wind turbine applications", International Journal of Advanced Engineering Technology, India, 7(3):168-173 (2016).
- 17. Bertagnolio, F., Sorensen, N., Johansen, J. Fuglsang, P. "Wind turbine airfoil catalogue", Riso National Laboratory, Roskilde, (2001).
- Badran, O., "Formulation of two-equation turbulence models for turbulent flow over a NACA 4412 airfoil at angle of attack 15 degree", Proceedings of 6th International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics and Applications, 6: 20-24, Italy, (2008).
- Sørensen, N. N., Michelsen, J. A., and Schreck, S., "Navier-Stokes predictions of the NREL phase VI rotor in the NASA Ames 80ft x120 ft wind tunnel," Wind Energy, 5(2-3): 151-169 (2002)
- 20. "A Guide To Matlab For Beginners And Experienced Users", Cambridge University Press, Newyork (2001).
- 21.İnternet:CornellUniversityWebSite:https://confluence.cornell.edu/display/Simulation/Home (2017).
- 22. Drela, Mark, "XFOIL, An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils", Springer-Verlag Lecture Notes in Engineering, 54: 1-12 (1989).