



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Rüzgâr türbinlerinde giriş yapısının performansa etkisinin sayısal olarak incelenmesi

Numerical investigation of rib structure effects on performance of wind turbines

Yazarlar (Authors): Himmet Erdi TANÜRÜN¹, Ahmet Giray AKIN², Adem ACIR³

ORCID¹: 0000-0001-7814-7043

ORCID²: 0000-0003-4802-5613

ORCID³: 0000-0002-9856-3623

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Akın A.G., Tanürün H. E. ve Acır A. "Rüzgâr türbinlerinde giriş yapısının performansa etkisinin sayısal olarak incelenmesi", *Politeknik Dergisi*, 24(3): 1219-1226, (2021).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.845804

Rüzgâr Türbinlerinde Kiriş Yapısının Performansa Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi

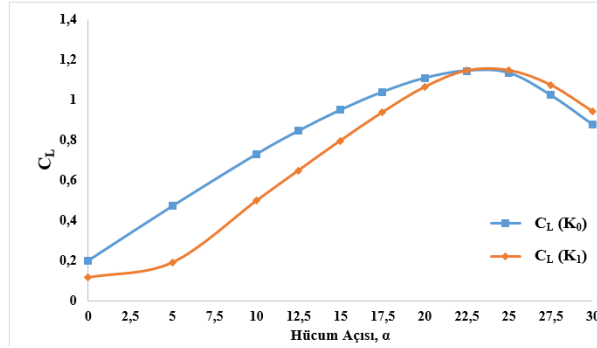
Numerical Investigation of Rib Structure Effects On Performance of Wind Turbines

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ 2 Boyutlu k -epsilon realizable türbülans modeli ile sayısal analizler yapıldı. / 2-D numerical analyses were performed by using realizable k -epsilon turbulence model.
- ❖ Basınç dağılımları incelendi. / Pressure contours are investigated.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Rüzgar türbini kanadı üzerinde yer alan rib yapısının etkisi incelendi. / Effect of rib structure which was located on wind turbine blade was investigated.



Şekil. Hücum açısı & Kaldırma katsayısı grafiği (C_L) /Figure. AoA & Lift Coefficient

Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı kiriş yapısının kanat performansı üzerine etkisini incelemektir. / The aim of this study is to investigate of rib structure on blade aerodynamic efficiency.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

İki farklı NACA kanat modeli Rhinoceros yazılımı ile oluşturuldu. Bu kanat profilleri 2 boyutlu olarak k -epsilon realizable türbülans modeli kullanılarak analizler yapıldı. / Two different blade models have been created with using Rhinoceros software. 2D numerical analysis have been executed with using k -epsilon realizable turbulence model.

Özgünlük (Originality)

Çalışma kiriş yapısının kullanım bölgesi itibari ile ilk çalışmadır. / In this study, It is the first study in terms of the area of use of the working rib structure.

Bulgular (Findings)

Stall açısı kiriş yapısı ile ötelenmiştir. / Stall angle was delayed due to the rib structure.

Sonuç (Conclusion)

Kiriş yapısı yüksek hücum açılarında, aerodinamik performansa olumlu yönde etkisi bulunmaktadır. / Triangular rib structure contributes positively on aerodynamic performance during high angle of attack.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Rüzgâr Türbinlerinde Kiriş Yapısının Performansa Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

*Himmet Erdi TANÜRÜN¹, Ahmet Giray AKIN^{1,2}, Adem ACIR¹

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Ankara, Türkiye

²T.C. Cumhurbaşkanlığı Savunma Sanayii Başkanlığı, Deniz Araçları Daire Başkanlığı, Ankara, Türkiye
(Geliş/Received : 24.12.2020 ; Kabul/Accepted : 07.03.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 13.03.2021)

ÖZ

Rüzgâr türbinlerinde kanat modelleri yüksek performans için büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada, rüzgâr türbini kanat profili yaygın olarak kullanılan NACA 2412 modelinde kiriş yapısının aerodinamik performansa etkisi sayısal olarak incelenmiştir. RHINOCEROS programı ile modellenen kanat profilleri ANSYS FLUENT programı ile akış analizleri yapılmıştır. Sayısal analizler, $3,24 \times 10^5$ Reynolds sayısında (Re) ve k- ϵ realizabl turbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 0,25 m veter uzunluğuna bağlı olarak kanat profillerinin açıklık oranı 5'tir. Serbest hava akım hızının 20 m/s olduğu çalışmada kanat profilleri kaldırma (C_L), sürüklenme (C_D) katsayıları ve aerodinamik performansı (C_L / C_D) incelenmiştir. Düz kanat profili (K_0), maksimum kaldırma katsayısına $22,5^\circ$ hücum açısında ulaşırken, kiriş yapısı ile modifiye edilmiş kanat (K_1) profili 25° hücum açısında ulaşmıştır. K_1 kanadının maksimum C_L değeri 1,1462 olup K_0 kanadının maksimum değerinden %1 fazladır. İrtifa kaybı sonrası, K_1 kanat profilinin ortalama C_L / C_D değeri K_0 kanadının ortalama değerinden %5 fazla olarak gerçekleşmiştir. Kiriş yapısı yüksek hücum açılarında, aerodinamik performansa olumlu yönde etkisi bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: NACA-0012, üçgen kiriş yapısı, aerodinamik performans, HAD.

Numerical Investigation of Rib Structure Effects On Performance of Wind Turbines

ABSTRACT

In order to achieve high aerodynamic performance in wind, airfoil profile geometries have significant effect. In this study, NACA 2412 airfoil which is widely used for wind turbines was investigated numerically. Technical drawings were drawn by sing CAD program RHINOCEROS and flow analysis was performed by using ANSYS FLUENT. In our study, Reynolds number was $3,24 \times 10^5$ and k- ϵ realizabl model was chosen as turbulence model solver. Chord length is 0,25 m and spanwise is 5. Airfoil models were investigated in terms of lift (C_L) and drag (C_D) coefficient while free stream air velocity is 20 m/s. Smooth blade profile reached its maximum lift coefficient at $22,5^\circ$ on the other hand modified profile reached its maximum value of lift coefficient at 25° angle of attack. K_1 airfoil profile has reached its maximum value as 1,1462 and this value is %1 more than K_0 's value. It was observed that K_1 profile's average C_L / C_D is %5 more than K_0 's average value after stall. Triangular rib structure contributes positively on aerodynamic performance during high angle of attack.

Keywords: NACA-0012, triangular rib structure, aerodynamic performance, CFD.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde hayatın temel ihtiyaçlarından olan enerji ihtiyacı günden güne artmaktadır. Dünya üzerinde yer alan popülasyonun artması ile sınırlı olan kaynaklardan kullanılması noktasında yetersiz kalacaktır. Küresel çerçevede yapılan çalışmalarda gelecekte talep edilen enerjinin yenilenebilir kaynaklardan karşılanacağı belirtilmektedir.[1]

İhtiyaç duyulan enerji, birçok farklı kaynaktan sağlanmakta olup rüzgâr enerjisi bu kaynaklardan birisi olarak kullanılmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin amacı, rüzgârda bulunan enerjinin faydalı enerjiye dönüştürülmesidir.[2] Bunu yaparken maksimum verimin alınması yapılan yatırım ve elde edilen enerji açısından önemlidir. Rüzgâr türbinlerinin performansının

belirlenmesinde kanat yapısı tasarımının büyük etkisi bulunmaktadır. Bu kanat profilleri için tasarım sürecinde çeşitli zorluklar ile karşılaşmaktadır ve optimum verime sahip kanat profili elde edilmeye çalışılmaktadır. Tasarım sürecinde başlıca yüksek kaldırma katsayısı (C_L), düşük sürüklenme katsayısı (C_D) ve bu iki parametreye bağlı olarak optimum aerodinamik verim (C_L / C_D) önemli bir yere sahiptir.

Kanat profili etrafında gerçekleşen akış için sınır tabakanın incelenmesi aerodinamik performans açısından büyük öneme sahiptir.[3] Kanat üzerindeki akış ayrılmasının konumu performans kayıplarının azaltılması için turbülans tabakanın kontrolü için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Saha S. ve Alam M., NACA 2412 kanat profilinin alt yüzeyine Gurney kanatçığı uygulaması ile sınır tabakanın kontrolü için uygulamada bulunmuşlardır. Kanatçık

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : erdi.tanurun@gmail.com

üzerinde kare ve üçgen oluklu alan ile nümerik ve deneysel çalışma yapılmıştır. Çalışmalarının sonucunda, kanat modelinde eklenen Gurney kanatçığı ile yüksek kaldırma katsayısı elde edilirken, sürüklenme katsayısında ise düşüş gerçekleştiğini belirtmektedirler.[4]

Mohamed Arif M. ve diğerleri, doğadan esinlenerek geliştirdikleri hücum kenarı yapısı ile NACA 2412 kanat profilinde akım ayrılmasını kontrol etmeyi amaçlamışlardır. Kullandıkları bu yöntem ile akış ayrılmasını geciktirmelerinin yanında aerodinamik performansın artırıldığını gözlemlemişlerdir.[5]

Kanat üst yüzeyinde gerçekleşen akışın ayrılması, kanadın aerodinamik performansını azaltan etkenlerden birisidir. Hao W. ve Li C., kanat üzerine yerleştirilmiş ayarlanabilir kanatçık ile dikey eksenli rüzgâr türbini için sayısal çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, C_L ve C_L/C_D oranının arttığını ve akım ayrışma noktasının ötelendiğini ifade etmektedirler.[6]

Arra A. ve diğerleri, hücum kenarına geometrik yapı eklenmesi ve firar kenarlarının oluklu şekilde dizayn edilmesi ile NACA 2412 kanat profilinin aerodinamik performansını sayısal olarak incelemişlerdir. 2 boyutlu olarak yapılan bu analizler sonucunda optimize edilmiş kanat profillerinin aerodinamik performans yönünden iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.[7]

Tanürün H. E. ve diğerleri, farklı kanat açıklık oranına sahip NACA 0018 kanat profilini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda kanat açıklık oranı düşük olan kanat profilinin aerodinamik verim yönünden kanat açıklık oranı yüksek olana göre daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.[8]

Dwivedi YD. ve Bhargava V., yusufluk kuşunun kanat profilinden etkilenecek NACA 0010 kanat profilini pürüzlü yüzey modelleri ile sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Düşük Reynolds sayılarında gerçekleştirilen çalışmalarında pürüzlü yüzeye sahip kanat profillerinin aerodinamik performansının NACA 0010 kanat profilinin performansından daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.[9]

Venkatesan S. ve diğerleri, NACA 2412 kanat profilini üst yüzeyine kare, dikdörtgen ve üçgen şeklinde çukur (dimple) yapısı ekleyerek sayısal ve deneysel olarak performanslarını incelemişlerdir. Kare şeklinde çukura sahip olan kanadın diğerlerine göre daha iyi sonuç verdiğini belirtmektedirler.[10]

Raiesi H. ve diğerleri literatürde sıklıkla kullanılmakta olan RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) türbülans modellerini performanslarını incelemek üzere çalışma yürütmüşlerdir. İki boyutlu ayrılmış sınır tabaka boyunca Boussinesq kuramının geçerli olduğunu belirtmekle beraber incelenen türbülans modelleri arasından k-ε modelinin ayrılmış akışları doğru çözdüğü sonucunu belirtmektedirler. [11]

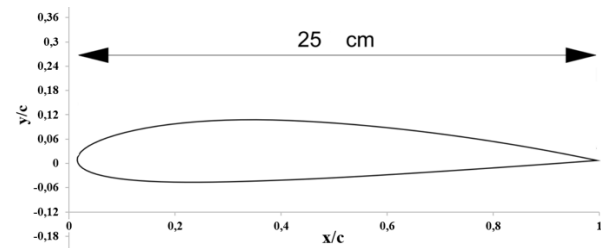
Bu çalışmada, NACA 2412 kanat profilinin düz ve firar kenarından $0,1c$ uzaklıkta oluşturulan giriş yapısı ile modifiye edilmiş kanat profili sayısal olarak

incelenmiştir. Serbest hava akış hızının 20 m/s olarak kabul edildiği sayısal çalışmamızda Reynolds sayısı ise $3,24 \times 10^5$ ve kanat açıklık oranı ise 5 olarak belirlenmiştir. Analizlerde, kanat modeline eklenen giriş yapısının aerodinamik performansa olan etkisi belirlenmiştir. Aerodinamik performans sonuçları akım çizgisi ve basınç kontörleri ile desteklenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

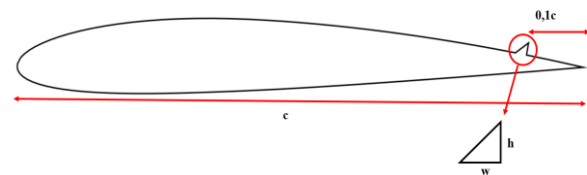
2.1. Kanat Geometrisi (Blade Geometry)

Bu çalışmada, NACA 2412 kanat profilinin düz kanat (K_0) ve modifiyeli kanat modelini (K_1) aerodinamik performans açısından sayısal olarak incelenmiştir. “4 digit airfoil generator”[12] üzerinden elde edilen koordinat noktaları ile Rhinoceros CAD programında kanat tasarımı yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan NACA 2412 kanat profili asimetrik geometriye sahiptir. Literatürde asimetrik kanat profili üzerine yapılan birçok çalışmada yer almakta olup bu kanat yapısının sıklıkla kullanılmasının sebebi yüksek performansa sahip olmalarıdır. [13-14]



Şekil 1. NACA 2412 Düz Kanat Profili (K_0) (NACA 2412 Smooth Airfoil Profile (K_0))

Şekil 2’de firar kenarından $0,1c$ uzaklıkta yerleştirilen türbülans kontrol bölgesi yer almaktadır. Kanat profili üst yüzeyinde aerodinamik verimi arttırmak için çeşitli yapılar kullanılmaktadır. Çukur yapısı ve pürüzlü yüzey başta olmak üzere farklı kanat profilleri modifiye edilerek oluşturulan yapılara ilave olarak bu çalışmada, üçgen giriş yapısı eklenerek yeni bir kanat modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yapılar türbülantör olarak görev yapmakta olup belirli bölgelerde laminar sınır tabakayı türbülans sınır tabaka haline getirmekte ve akış ayrılmasını geciktirmesi amaçlanmıştır.



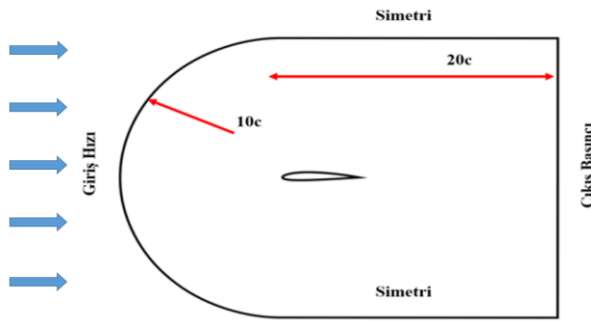
Şekil 2. NACA 2412 Firar Kenarında Üçgen Yapı Dahil (K_1) (NACA 2412 including Triangular rib located trailing edge)

Oluşturulan sınır tabaka düzenleyici yapının yüksekliği h ($\%2c=0,5$ cm) ve w ($\%2c=0,5$ cm) olarak tasarlanmıştır. K_0 profilinde akış ayrılması firar kenarına yakın olarak gerçekleştiği için K_1 profilinde üçgen kiriş yapısı bu bölgeye yerleştirilmiştir. Üçgen kiriş yapısı, türbülator modellerinin veter ile olan ilişkileri konu alan çalışmalar dikkate alınarak belirlenip, literatürle uyumlu olması amaçlanmıştır.

2.2. Hesaplama Alanı (Computational Domain)

Ansys-Fluent programında problemin çözülmesi için literatürde yaygın olarak kullanılmakta olan C tipi hesaplama alanı oluşturulmuştur. C tipi hesaplama alanı oluşturulmasının sebebi giriş hızının doğru hücum açısında kanat profiline ulaşmasıdır [15]. C tipi mesh alanı oluşturularak havanın giriş hızının kanat profiline ulaşırken doğru ayarlanmasının yanında Yousefi K. Ve Saleh R. [16] bu yapının ağ yapısının ortogonal kalitesini ve çarpıklığını iyileştirdiğini belirtmektedir.

Şekil 3'te de yer alan hesaplama alanı için hücum kenarında $10c$ uzaklığında ve $20c$ genişliğinde olacak şekilde oluşturulmuştur. Belirlenen akış hacmi, boyutları, kanat modeli üzerinde aerodinamik performansa etkisinin olmayacak boyutlarda belirlenmiştir.



Şekil 3. C tipi hesaplama alanı (C type Computational Domain)

Çalışmada kullanılacak olan hesaplama alanı Şekil 3'te gösterilmektedir. Hesap alanı oluşturulduktan sonra sonlu elemanlar yöntemine göre analizin yapılabilmesi için gerekli ağ yapısının oluşturulması gerekmektedir. Problemin çözümünde sınır şartlarının belirtilmesi ve gerekli girdilerin yapılması için gerekli olan ağ yapısı ANSYS-FLUENT programında oluşturulmuştur. Oluşturulan bu ağ yapısında eleman ve düğüm sayısının problem sonucuna etkisinin minimum seviyeye

Çizelge 1. K_0 Kanadı Mesh Bağımsızlık (Mesh Independence for K_0)

Eleman Sayısı	C_L	C_D
193000	0,724	0,0808
252000	0,7281	0,081
305000	0,7290	0,0809
371000	0,7291	0,0807
420000	0,7291	0,0808

indirgenerek doğru sonucun elde edildiğinden emin olmak için farklı eleman sayılarında analizler yapılmıştır. Farklı eleman sayılarına göre analiz sonuçları Çizelge 1'de yer almaktadır. Ayrıca, Almohammadi K.M.ve diğerleri düz kanatlı dikey eksenli rüzgâr türbinleri üzerinde mesh bağımsızlığının sonucun yakınsaması üzerinde etkili olduğunu belirtmektedirler.[17]

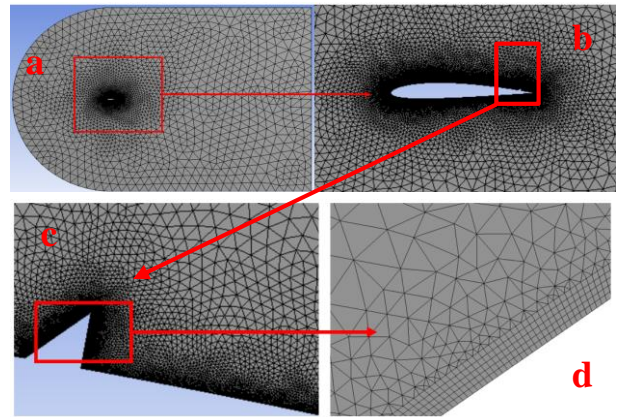
Çizelge 1'de K_0 kanat profili için yer alan eleman sayısı ve analiz sonuçlarına göre oluşturulan ağ yapısı analiz sonucu üzerine etkisi $\%0,04$ oranında olduğu görülmektedir. Ağ yapısını analiz üzerindeki etkisinin çok düşük seviyelerde olmasından dolayı eleman sayısı 371000 olan ağ yapısı seçilerek analize devam edilmiştir.

Çizelge 2 ile K_1 kanat profilinin 10° hücum açısında elde

Çizelge 2. K_1 Kanadı Mesh Bağımsızlık (Mesh Independence for K_1)

Eleman Sayısı	C_L	C_D
160000	0,4899	0,0632
212000	0,4965	0,0634
260000	0,5012	0,0638
345000	0,4962	0,063
410000	0,505	0,064

edilen çözümün ağ yapısından bağımsızlığı gösterilmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinden ağ yapısının analiz sonucu üzerine olan etkisinin en büyük değeri yaklaşık $\%1,5$ mertebesinde olup bu sebepten dolayı K_1 profili eleman sayısı 345000 olan ağ yapısı ile analizlere devam edilmiştir.



Şekil 4. a) Hesaplama Alanı Genel Görünümü, b) Kanat Profili Etrafında Oluşturulan Ağ Yapısı, c) Üçgen Yapı Etrafındaki Ağ Yapısı ve d) Üçgen Kiriş Etrafındaki Ağ Yapısı Detay Görünümü (a) Computational Domain General View b) Mesh structure around airfoil c) Mesh structure around Rib and d) Mesh structure around Rib Detail)

Doğruluk oranının yüksek olduğu sonuçları elde etmek için ağ yapısının büyük önemi vardır. Şekil 4'te K_1 kanat modeli için oluşturulan ağ yapısı yer almaktadır. Kanat etrafında daha hassas çözüm olması ve sınır hattındaki türbülans geçişlerinin daha net yakalanabilmesi için "inflation" özelliği kullanılmıştır.

Ağ yapısının oluşturulmasına müteakip oluşturulan ağın kalitesi kontrol edilip ve ağ yapısı içerisinde süreksizlikler, çarpıklıklar minimal olması hedeflenmiştir.[18] Oluşturulan ağ yapısının kalitesini etkileyen birden çok parametre bulunmaktadır [19]. Ağ yapısını belirleyen başlıca parametrelerden eleman kalitesi, ortogonal kalite ve çarpıklık değeridir.

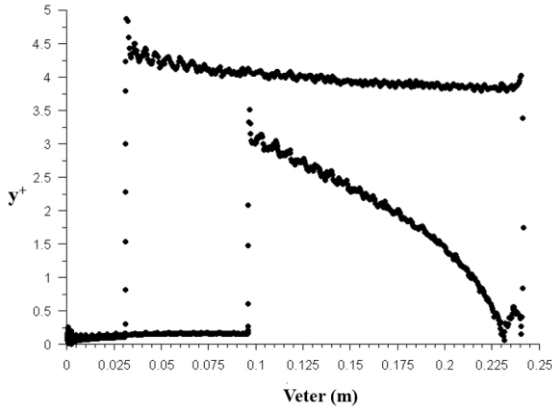
Çizelge 3 Ağ Yapısı Kalitesi (Mesh Quality)

Ağ Yapısı Kalitesi	Eleman Sayısı	Element Kalitesi	Ortogonal Kalite	Çarpıklık
(K ₀)	371000	0,91306	0,9462	0,0892
(K ₁)	345000	0,965	0,967	0,0522

Çizelge 3'te kanat profilleri için oluşturulan ağ yapısına ait özellikler yer almaktadır. Eleman ve ortogonal kalitenin 1'e yakın olması ve çarpıklık değerinin 0'a yakın olması oluşturulan ağ yapısının çözüm için uygun olduğunu göstermektedir.[21]

$$y^+ = \frac{u_t \cdot y}{\nu} \quad (1)$$

Boyutsuz sınır tabaka kalınlığı denklem 1'de olduğu gibi ifade edilmektedir. y^+ boyutsuz sınır tabaka kalınlığını, u_t kanat yüzeyine yakın bölgedeki sürtünme hızını, y kanada en yakın bölgedeki sınır tabaka kalınlığını ve ν ise dinamik viskoziteyi ifade etmektedir.



Şekil 5. 15° hücum açısında K₀ profiline ait y^+ (y^+ graphic for K₀ profile at 15° angle of attack)

Ağ yapısının kalitesi için diğer önemli bir parametre ise boyutsuz bir katsayı olan y^+ değeridir. Aerodinamik analizlerdeki dış akışta 5'ten küçük y^+ değerlerinde türbülans sınır tabaka içerisinde hız profili laminar ve viskoz gerilmelerin duvar kesme gerilmelerine göre baskın olduğunu göstermektedir. 5'ten yüksek değerler için viskoz ve türbülans gerilmeleri etken olacağı için bu değerler 0-5 aralığında olması gerekmektedir [20]. Şekil 5'te yer alan y^+ grafiği ile oluşturulan ağ yapısının y^+ değeri kanat yüzeyi boyunca 5'i aşmamakta olup hücum kenarında 0 oldukça yakınsamak ve bu durumda kanat yüzeyindeki sınır tabakada kaliteli mesh yapısının oluştuğunu en açık göstergesidir.

Kanat profili çevresinde oluşan sınır tabaka içerisindeki problemin çözümü için k- ϵ realizeble türbülans modeli kullanılmıştır. Sınır tabaka problemlerinde kullanılmakta olan k- ϵ realizeble türbülans modeli dış akıştaki duvar dibi problemlerinde doğru sonuç vermesinden dolayı literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. [21-25] Kullanılan türbülans modeli denklemleri (2) ve (3)'de yer almaktadır.

k- ϵ modeli için türbülans kinetik enerji dağılım oranı (k)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2)$$

ve dağılım (ϵ) oranı

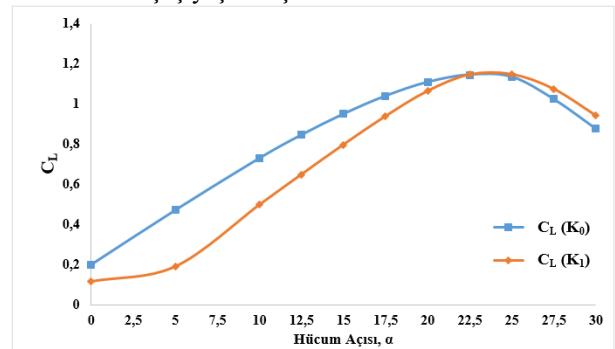
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_3 G_b) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (3)$$

olarak ifade edilmektedir.

G_k ortalama hız gradyanına bağlı olarak türbülans kinetik enerji oluşumunu, G_b türbülans kinetik enerji üretimini ifade etmektedir. σ_k ve σ_ϵ değerleri k ve ϵ için türbülans Prandtl sayılarıdır. C ise sabit sayıyı ifade etmektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

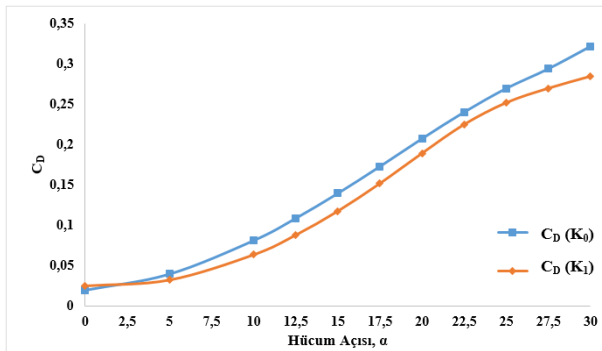
Veter uzunluğu ve kanat açıklık oranı aynı olan iki adet NACA 2412 kanat profili için firar kenarına yakın yüzeyinin modifiye edilmesi ile elde edilen kanat profili ve düz kanat profili C_L , C_D ve C_L/C_D yönünden aerodinamik performansları incelenmiştir. Serbest akış hızının 20 m/s olarak alındığı çalışmamızda 0-30° arasında değişen hücum açılarında analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda K₀ profili için elde edilen C_L değeri literatürde yer alan Ives R. ve diğerleri [26] ve Meghani P. [27]'nin doğrulanmıştır. Meghani P.'nin çalışmasında irtifa kaybı (stall) açısı K₀ kanadı için 24° olarak gerçekleşmiştir. Bu çalışmada ise stall 22,5°'de gerçekleşmeye başlamıştır ve 25° hücum açılarından sonra keskin bir düşüş yaşanmıştır.



Şekil 6. K₀ ve K₁ kanatlarına ait Kaldırma katsayısı grafiği (C_L) (Lift Coefficient Graphic for K₀ and K₁)

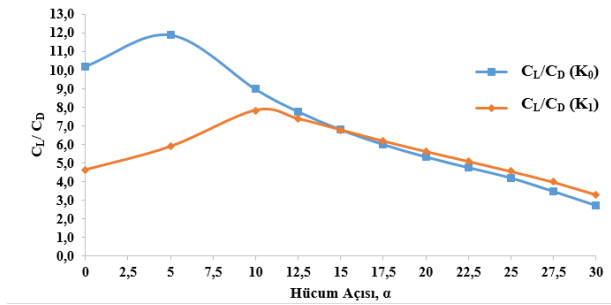
Şekil 6'da 2,5° aralıklarında 0 ile 30° hücum açılarında K₀ ve K₁ kanatlarının C_L değeri performansları

gösterilmiştir. Şekil 7’de de görüldüğü üzere, analizleri gerçekleştirilen kanat profillerinin birbirlerine yakın açılarda irtifa kaybı değeri olduğu belirlenmiştir. K_0 modelinde irtifa kaybı $22,5^\circ$ hücum açısında gerçekleşirken, K_1 modelinde ise 25° hücum açısında stall olmuştur. 20° hücum açısından sonra kanatların ortalama C_L değerleri karşılaştırıldığında; K_1 kanadının ortalama C_L değeri K_0 ’dan %2 fazladır. İrtifa kaybı açısına kadar olan hücum açılarında K_0 kanat profilinin kaldırma katsayısı daha yüksek iken stall açısından sonra giriş yapısının etkisi ile K_1 kanat profilinin C_L değeri daha yüksek olmaktadır. K_1 kanadının en yüksek C_L değeri 1,1462 olarak elde edilmiş olup bu değer K_0 kanadının en yüksek C_L değerinden %1 fazladır. İrtifa kaybı gerçekleştikten sonra, K_1 kanadının C_L değerinde azalma, K_0 kanada nazaran daha kademeli olması giriş yapısının etkisinden kaynaklanmaktadır. K_0 kanadının üst yüzeyinde oluşan akım ayrılması sebebi ile 30° hücum açısında C_L değeri K_1 kanadından %7 düşüktür. K_1 kanadında yer alan üçgen giriş yapısı özellikle yüksek hücum açılarında, kanat üst yüzeyinde akış ayrılmasını geciktirerek C_L yönünden büyük bir avantaj sağladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 7. K_0 ve K_1 kanatlarına ait Sürüklenme katsayısı grafiği (C_D) (Drag Coefficient Graphic for K_0 and K_1)

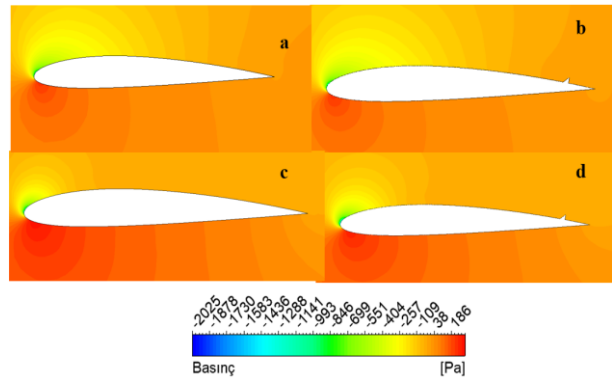
Şekil 7’de $2,5^\circ$ aralıklarında 0 ile 30° hücum açılarında K_0 ve K_1 kanatlarının C_D değeri performansları gösterilmiştir. $0-30^\circ$ hücum aralığında, K_0 kanadının ortalama C_D değeri K_1 kanadına göre %10 fazla olarak elde edilmiştir. Hatta 20° hücum açısından sonra kanatların ortalama C_D değerleri karşılaştırıldığında; K_1 kanadının ortalama C_D değeri K_0 ’dan %9 daha azdır. İrtifa kaybı gerçekleştikten sonra kanatların C_D değerlerinde artış ivmesi daha yüksektir. K_1 kanadı için stall öncesi ve sonrası C_D değerinde %7 fark var iken K_0 kanadında bu fark %11’dir. Ayrıca 25° hücum açısından sonra giriş yapısını C_D değerine olumlu katkısı olduğu görülmektedir. Kanat profillerinin en yüksek C_D değerlerine ulaştığı 30° hücum açısında K_0 kanadının C_D değeri K_1 kanadından %13 daha fazladır. Bu sebepten dolayı bahsi geçen hücum açısında K_0 kanadının aerodinamik verimi %19 daha düşüktür.



Şekil 8. K_0 ve K_1 kanatlarına ait aerodinamik performans grafiği (C_L / C_D) (Aerodynamic Performance Graphic for K_0 and K_1)

Şekil 8’de $2,5^\circ$ aralıklarında 0 ile 30° hücum açılarında K_0 ve K_1 kanatlarının C_L / C_D değeri performansları gösterilmiştir. $12,5^\circ$ hücum açısına kadar olan düşük hücum açılarında K_0 kanat profilinin aerodinamik verimi K_1 kanadına göre yüksektir. Bu durum, K_0 kanadının düşük hücum açılarında daha yüksek C_L değerine sahip olmasıdır. $12,5^\circ$ hücum açısından sonra (K_1) modelinin C_L / C_D değeri kanat üzerindeki giriş etkisiyle birlikte K_0 ’a göre daha yüksek olmaktadır. İrtifa kaybı gerçekleştikten sonra kanat yüzeyinin farklı bölgelerinde oluşan girdaplarda bağlı olarak denklem 4 ile hesaplandığında; K_1 ’in ortalama C_L / C_D değeri K_0 ’ın ortalama C_L / C_D değerinin yaklaşık %5 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Şekil 9’un geneli incelendiğinde, hücum açısının artmasıyla birlikte giriş yapısının aerodinamik performansa olumlu yönde etkisini olduğu belirlenmiştir. Yapılan analizlerden elde edilen sayısal sonuçları daha iyi anlaşılabilir yorumlanması adına basınç dağılımları ve akım çizgileri görselleştirip, değerlendirilmiştir.

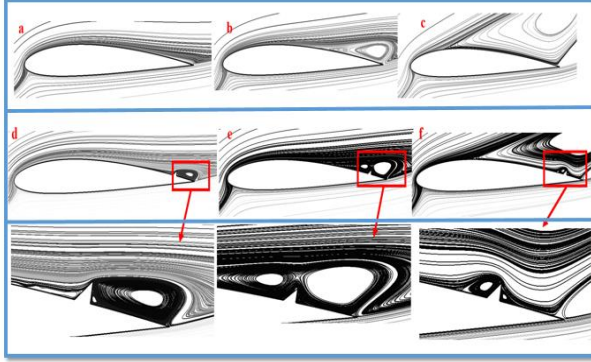
$$C_L / C_{D_{Ort}} = \frac{\sum C_L / C_D}{\sum k} \quad (4)$$



Şekil 9. NACA 2412 Kanat Profili Basınç Dağılımı a) K_0 $\alpha=20^\circ$, b) K_1 $\alpha=20^\circ$, c) K_0 $\alpha=30^\circ$ ve d) K_1 $\alpha=30^\circ$ (NACA 2412 Airfoil Profile Pressure Contours a) K_0 $\alpha=20^\circ$, b) K_1 $\alpha=20^\circ$, c) K_0 $\alpha=30^\circ$ ve d) K_1 $\alpha=30^\circ$)

Şekil 9’da iki farklı hücum açısında K_0 ve K_1 kanat modellerinin basınç dağılımları yer almaktadır. 20° hücum açısında K_0 ve K_1 kanat profilleri için oluşan basınç alanları birbiri ile benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte hücum açısı arttıkça oluşan basınç dağılımları farklılaşmaktadır. 30° hücum açısında K_1 kanat profilinde oluşan alçak basınç bölgesinin

dağılımından kaynaklı olarak K_0 'a göre daha yüksek C_L sağlamaktadır. Ayrıca, K_1 kanadının C_D değeri K_0 'dan düşük olduğu için 30° hücum açısında K_1 'in aerodinamik performansı daha yüksektir. İrtifa kaybı gerçekleştikten sonra K_1 kanat profili üst yüzeyinden üçgen kırıktan dolayı düşük basınç bölgesi oluşmaktadır. Oluşan bu düşük basınç bölgesinden dolayı K_1 kanadının kaldırma katsayısı ve aerodinamik verimi K_0 'a göre daha yüksek olmaktadır.



Şekil 10. K_0 Kanat Profili Akım Hatları a) $\alpha=20^\circ$ b) $\alpha=25^\circ$ c) $\alpha=30^\circ$ K_1 Kanat Profili Akım Hatları ve Detay Görünümleri d) $\alpha=20^\circ$, e) $\alpha=25^\circ$, f) $\alpha=30^\circ$ Detay Görünümleri (K_0 Airfoil Profile Streamlines a) $\alpha=20^\circ$ b) $\alpha=25^\circ$, c) $\alpha=30^\circ$ and K_1 Airfoil Profile Streamlines and Details d) $\alpha=20^\circ$, e) $\alpha=25^\circ$, f) $\alpha=30^\circ$)

Şekil 10'da K_0 ve K_1 kanat profilinin 20° , 25° ve 30° olmak üzere 3 farklı hücum açılarında akım çizgileri gösterilmiştir. Bu hücum açılarının belirlenmesinin sebebi, giriş yapısının olumlu etkisinin belirginleşmesinden kaynaklanmaktadır. 20° hücum açısı incelendiğinde, K_0 kanadının üst yüzeyinde herhangi bir bölgesinde girdap oluşumu görülmezken, K_1 kanadında giriş yapısının arkasında girdap oluşmaktadır. Bu durum girdap yapısı hem parazit hem de indüklenmiş sürtünmenin oluşmasına neden olmaktadır. Parazit sürtünmenin, indüklenmiş sürtünmeye göre yüksek etkinliği olmasından dolayı ise, 20° hücum açısında K_1 kanadının C_D değerinin daha düşük olmasını sağlamaktadır. 25° hücum açısında, K_0 kanadında K_1 kanadında da olduğu gibi firar kenarı bölgesinde girdap oluşmaktadır. Ancak 25° hücum açısında K_1 kanadındaki giriş yapısından dolayı iki farklı alanda girdap görülmektedir. Bu durum, K_1 kanadında indüklenmiş sürtünmenin kanat üzerinde etkisini artırmaktadır. 30° hücum açısında her iki kanat içinde parazit sürüklenme kuvvetinin etkisi son derece sınırlıdır. K_1 kanadında 25° olduğu gibi giriş yapısını arkasında oluşan küçük bir girdap daha oluşmaktadır. K_1 kanadında oluşan iki farklı girdap alanı, kanat yüzeyinde düşük basınç bölgelerinin yoğunluğunu artırmakta, bu durumda K_1 kanadına göre daha yüksek C_L değerini elde edilmesini sağlamaktadır.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, rüzgâr türbinlerinde kullanılan yaygın olarak kullanılan NACA 2412 kanat profilinde giriş etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Serbest hava hızının

20 m/s ve Reynolds sayısı $3,24 \times 10^5$ olarak belirlenmiştir. $K-\epsilon$ türbülans modeli kullanılarak kanat üzerinde yer alan yapının kanat performansına olan etkisi incelenmiş ve aşağıda yer alan sonuçlar elde edilmiştir.

- K_0 profilinde irtifa kaybı $22,5^\circ$ olarak gerçekleşirken K_1 kanat profilinde irtifa kaybı 25° 'de gerçekleşmiştir.
- K_1 kanadının en yüksek C_L değeri $1,1462$ ve K_0 kanadının en yüksek değerinden %1 fazla olarak elde edilmiştir. İrtifa kaybı gerçekleştikten sonra, K_1 kanadının ortalama C_L değeri $1,0763$ iken K_0 kanadının ortalama C_L değeri $1,0435$ 'tir. K_1 kanadının ortalama C_L değeri K_0 'dan %3 fazladır.
- $0-30^\circ$ hücum açıları arasında kanat profillerinin ortalama C_D değerleri sırası ile $0,1721$ ve $0,1542$ olarak gerçekleşmiştir. K_0 kanat profilinin ortalama C_D değeri K_1 kanadından %10 fazla olmaktadır.
- 30° hücum açısında K_1 kanadının C_L değeri K_0 'dan %7 daha yüksektir. Ayrıca, aynı hücum açısında K_0 'ın C_D değeri K_1 kanadından %13 daha yüksektir. Bu hücum açısında aerodinamik performans olarak karşılaştırıldığında K_1 kanadının performansı %19 daha fazla olmaktadır.
- En yüksek C_L/C_D değerine K_0 kanat profili 5° hücum açısında sahip iken K_1 kanat profili $12,5^\circ$ hücum açısında sahip olmaktadır. $12,5^\circ$ hücum açısı ile 30° hücum açısında ortalama C_L/C_D yönünden karşılaştırıldığında K_1 kanat profili K_0 'dan %4 fazladır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Ahmet Giray AKIN: Sayısal analizleri gerçekleştirip yorumlanmış ve yazım işlemini yapmıştır.

Himmet Erdi TANÜRÜN: Model tasarımı gerçekleştirmiş ayrıca analizleri yorumlamış ve yazım işlemini yapmıştır.

Adem ACIR: Analizleri yorumlamış ve yazım işlemini yapmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur

SİMGELER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

c	Veter Uzunluğu (Chord)
C_D	Sürüklenme Katsayısı (Drag Coefficient)
C_L	Kaldırma Katsayısı (Lift Coefficient)
C_L / C_D	Aerodinamik Performans (Aerodynamic Performance)
D	Sürüklenme (Drag)
L	Kaldırma (Lift)
K_0	Düz Kanat Profili (Smooth Airfoil Profile)
K_1	Modifiyeli Kanat Profili (Modified airfoil Profile)
NACA	Ulusal Havacılık Danışma Komitesi (National Advisory Committee for Aeronautics)
m/s	Hız Birimi (SI) (Speed Unit)
α	Hücum Açısı (Derece) (Angle of Attack)
ρ	Yoğunluk (Density)
Re	Reynolds sayısı (Reynolds number)
σ_k	Prandtl Sayısı (Prandtl Number)
V	Hız (Velocity)
A	Yüzey Alanı (Surface Area)
G_D	Yoğunluktan kaynaklı türbülans kinetik enerji (Turbulent kinetic energy due to density)
G_k	Hızdan kaynaklı türbülans kinetik enerji (Turbulent kinetic energy due to velocity)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Jurasz, J., Canales, F. A., Kies, A., Guezgouz, M., ve Beluco, A. "A review on the complementarity of renewable energy sources: Concept, metrics, application and future research directions" *Solar Energy*, 195, 703-724, (2020).
- Wagner, H. J. "Introduction to wind energy systems. In EPJ Web of Conferences" Vol. 189, p. 00005, *EDP Sciences*, (2018).
- Schlichting, H. ve Gersten, K. "Boundary-layer theory", Springer, 9th Edition, Berlin (2017).
- Saha, S. K., ve Alam, M. M. "Numerical and Experimental Investigation Of The Influence Of Serrated Gurney Flap Over a NACA 2412 Airfoil.", *Mechanical Engineering Research Journal*, 11, 7–12, (2018).
- Mohamed, M. A. R., Guven, U., ve Yadav, R. "Flow separation control of NACA-2412 airfoil with bio-inspired nose." *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 91(7), 1058-1066, (2019).
- Hao, W., ve Li, C." Performance improvement of adaptive flap on flow separation control and its effect on VAWT", *Energy*, 213, 118809, (2020).
- Arra, A., Anekar, N., ve Nimbalkar, S. "Aerodynamic effects of leading edge (LE) slats and slotted trailing edge (TE) flaps on NACA-2412 airfoil in prospect of optimization." *Materials Today: Proceedings*, (2020).
- Tanürün, H. E., Ata İ., Canli, M.E., ve Acir A. "Farklı açıklık oranlarındaki NACA-0018 rüzgâr türbini kanat modeli performansının sayısal ve deneysel incelenmesi." *Politeknik Dergisi*, 23(2), 371-381. (2020).
- Dwivedi, Y. D., Bhargava, V., Rao, P. M. V., ve Jagadeesh, D. "Aerodynamic Performance of Micro Aerial Wing Structures at Low Reynolds Number." *INCAS Bulletin*, 11(1), 107-120. (2019).
- Venkatesan, S. P., Kumar, V. P., Kumar, M. S., ve Kumar, S. "Computational Analysis of Aerodynamic Characteristics of Dimple Airfoil NACA 2412 at Various Angles of Attack." *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9(9), September 2018, 41–49, (2018).
- Raiesi, H., Piomelli, U., ve Pollard, A. "Evaluation of turbulence models using direct numerical and large-eddy simulation data", *ASME Journal of Fluids Engineering* 133(2): 021203, (2011).
- A. Tools, "NACA 4 digit airfoil generator," *National Advisory Committee for Aeronautics*, 2015. <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit> (accessed Jul. 12, 2020).
- Jin, J. Y., ve Virk, M. S. "Study of ice accretion along symmetric and asymmetric airfoils" *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 179, 240-249, (2018).
- Castelli, M. R., Giulia, S., ve Ernesto, B. "Numerical analysis of the influence of airfoil asymmetry on VAWT performance", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 61, 312-321, (2012).
- Yılmaz, M., Köten, H., Çetinkaya, E., ve Coşar, Z. "A comparative CFD analysis of NACA0012 and NACA4412 airfoils" *Journal of Energy Systems*, 2(4), 145-159, (2018).
- Yousefi, K., ve Saleh, R. "The effects of trailing edge blowing on aerodynamic characteristics of the NACA 0012 airfoil and optimization of the blowing slot geometry" *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 52, 165-179, (2014).
- Almohammadi, K. M., Ingham, D. B., Ma, L., ve Pourkashan, M. "Computational fluid dynamics (CFD) mesh independency techniques for a straight blade vertical axis wind turbine" *Energy*, 58, 483-493, (2013).
- Garimella, R. V., Shashkov, M. J., ve Knupp, P. M. "Triangular and quadrilateral surface mesh quality optimization using local parametrization" *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193(9-11), 913-928, (2004).
- Egorova, O., Kojekine, N., Hagiwara, I., Savchenko, M., Semenova, I., ve Savchenko, V. "Improvement of mesh quality using a statistical approach" *In Proceedings of the 3rd IASTED International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing (VIIP), Spain*, 2, 1016-1021, (2003).
- Shukla, I., Tupkari, S. S., Raman, A. K., ve Mullick, A. N. "Wall Y+ approach for dealing with turbulent flow through a constant area duct" *AIP Conference Proceedings* 1440(1), 144-153. American Institute of Physics. (2012).

- [21] Tanürün, H. E., ve Acir A. “Modifiye edilmiş NACA-0015 kanat yapısında tüberkül etkisinin sayısal analizi” *Politeknik Dergisi*, 22(1), 185-195i (2019).
- [22] Siddiqui, M. S., Rasheed, A., Kvamsdal, T., ve Tabib, M. “Effect of turbulence intensity on the performance of an offshore vertical axis wind turbine” *Energy Procedia*, 80, 312-320, (2015).
- [23] Şahin, İ., ve Acir, A. “Numerical and experimental investigations of lift and drag performances of NACA 0015 wind turbine airfoil” *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 3(1), 22-25. (2015).
- [24] Song, C., Zheng, Y., Zhao, Z., Zhang, Y., Li, C., ve Jiang, H. “Investigation of meshing strategies and turbulence models of computational fluid dynamics simulations of vertical axis wind turbines” *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 7(3), 033111, (2015).
- [25] Kaya A.F., Tanürün H.E. and Acir A., “Numerical investigation of radius dependent solidity effect on H-type vertical axis wind turbines”, *Politeknik Dergisi*, doi: 10.2339/politeknik.799767.
- [26] Ives, R., Bassey, E., ve Hamad, F. A. “Investigation of the flow around an aircraft wing of section NACA 2412 utilising ANSYS fluent” *INCAS Bulletin*, 10(1/ 2018), 95 – 104, (2018).
- [27] Meghani, P. “A 2D Aerodynamic Study on Morphing in The NACA 2412 Aerofoil” *13th Research and Education in Aircraft Design Conference*, Brno, Czech Republic, (2018).