



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Farklı açıklık oranlarındaki NACA-0018 rüzgâr türbini kanat modeli performansının sayısal ve deneysel incelenmesi

Numerical and experimental investigation of NACA-0018 wind turbine aerofoil model performance for different aspect ratios

Yazar(lar) (Author(s)): Himmet Erdi TANÜRÜN¹, İsmail ATA², Mehmet Emin CANLI³, Adem ACIR⁴

ORCID¹: 0000-0001-7814-7043

ORCID²: 0000-0003-0412-8397

ORCID³: 0000-0002-8745-0877

ORCID⁴: 0000-0002-9856-3623

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Tanürün H. E., Ata İ., Canlı M. E. ve Acır A., “Farklı açıklık oranlarındaki NACA-0018 rüzgâr türbini kanat modeli performansının sayısal ve deneysel incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 371-381, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.500043

Farklı Açıklık Oranlarındaki NACA-0018 Rüzgâr Türbini Kanat Modeli Performansının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Himmet Erdi TANÜRÜN^{1*}, İsmail ATA², Mehmet Emin CANLI³, Adem ACIR¹

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

²Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uzay Müh. Bölümü, Erciyes Üniversitesi, Türkiye

³Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Müh. ABD, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 20.12.2018 ; Kabul/Accepted : 19.04.2019)

ÖZ

Rüzgâr enerjisinin yararlı enerjiye dönüştürülmesinde kullanılan rüzgâr türbinleri, farklı kanat modellerinden oluşmaktadır. Türbin performansını etkileyen en önemli etkenlerden biri kanat modeli aerodinamik performansının değişimidir. Rüzgâr türbin kanatlarında kullanılması muhtemel olan NACA-0018 kanat modelinin aerodinamik performansı bu çalışma kapsamında, sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Performans analizi için yapılan sayısal çalışmalar hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) esasına göre çalışan ANSYS Fluent™ 14,5 yazılımında SST (Shear Stress Transport) türbülans modeli altında incelenmiştir. Sayısal çalışmalarda Reynolds (Re) sayısı $5,7 \times 10^4$ kabul edilmiş, 0° den 60° ye kadar her $2,5^\circ$ lik hücum açısı için analizler tekrarlanmıştır. Deneysel çalışmalar ise açık çevrimli rüzgâr tüneline her 5° hücum açısı için 0° - 60° aralığında gerçekleştirilmiştir. Her iki çalışmada da belirlenen hücum açılarındaki kanat modelinin kaldırma katsayısı (C_L), sürüklenme katsayısı (C_D) ve aerodinamik verimlilik (C_L/C_D) değerleri bulunmuştur. Sayısal sonuçlara göre açıklık oranı-1 (AR1) kanat modelinde $32,5^\circ$ de irtifa kaybı gözlenirken, açıklık oranı-2 (AR2) kanat modelinde ise 25° de irtifa kaybı söz konusudur. AR1 ve AR2 kanat modelleri için yapılan deneysel çalışma sonuçlarına göre her iki kanadın C_L değeri, sayısal çalışmalar neticesinde elde edilen verilerden sırasıyla %0,41 ve %2,71 oranında daha olumludur. Benzer şekilde deneysel olarak elde edilen C_D değerlerinin AR1 ve AR2 kanat modeli için sayısal verilerden sırasıyla %6,35 ve %5,16 kadar daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sayısal çalışma sonucu AR1 ve AR2 kanat modelleri için elde edilen C_L/C_D değerleri aynı yapılar için ölçülen deneysel verilerden her bir kanat modeli için sırasıyla %3,86 ve %12,04 daha yüksektir. Hem deneysel hem de sayısal çalışma sonucunda NACA-0018 kanat modelinin iki farklı açıklık oranına sahip yapılarından AR1 yapısının aerodinamik verimi, irtifa kaybı öncesi ve sonrasında AR2 kanadına göre belirgin bir avantaja sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr enerjisi, rüzgâr türbini, NACA-0018 kanat modeli, en-boy oranı, aerodinamik verim.

Numerical and Experimental Investigation of NACA-0018 Wind Turbine Aerofoil Model Performance for Different Aspect Ratios

ABSTRACT

Wind turbines used in the conversion of wind energy into useful energy consist of different aerofoil models. One of the most important factors affecting turbine performance is the change in aerodynamic performance of the aerofoil model. The aerodynamic performance of the NACA-0018 aerofoil model, which is likely to be used in wind turbine blades, has been investigated numerically and experimentally. Numerical studies for performance analysis were studied using ANSYS Fluent™ 14,5 software, which is based on computational fluid dynamics (CFD), using SST (Shear Stress Transport) turbulence model. In numerical studies, Reynolds (Re) number was accepted as $5,7 \times 10^4$, and the analyses were repeated for every $2,5^\circ$ angle of attack from 0° to 60° . Experimental studies were carried out in the open loop wind tunnel between 0° - 60° for every 5° angle of attack. In both studies, the lift coefficient (C_L), drag coefficient (C_D) and aerodynamic efficiency (C_L/C_D) values of the NACA-0018 aerofoil model were determined for selected attack angles. According to the numerical results, a stall occurred at $32,5^\circ$ angle of attack for the AR1 model, while at 25° for the AR2 model. Considering with the results of experimental study for AR1 and AR2, the C_L value of both models was 0,41% and 2,71% better than the data obtained as a result of numerical studies, respectively. Similarly, it was concluded that the experimentally obtained C_D values were 6.35% and 5.16% better than the numerical data for the AR1 and AR2 models, individually. As a result of numerical study, the C_L/C_D values obtained for AR1 and AR2 were 3.86% and 12.04% higher for each aerofoil model than the experimental data for the same structures. As a consequence of both experimental and numerical study, the aerodynamic efficiency of the AR1 structure from the structures of NACA-0018 aerofoil models having two different aspect ratios had a significant advantage compared to the AR2 before and after the stall.

Keywords: Wind energy, wind turbine, NACA-0018 aerofoil model, aspect ratio, aerodynamic efficiency.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : erdi.tanurun@gazi.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Refah seviyesi artışı beraberinde enerji talebinde yükseliş meydana getirmektedir. Günümüzde enerji arzı fosil kaynaklara dayalı enerji üretim mekanizmalarıyla sağlanmaktadır. Fosil kaynakların sonlu oluşu ve çevreye zararlı salınımlarından ötürü bu kaynakların alternatifleri ve daha verimli enerji üretim yöntemlerinin bulunması zorunludur. Bu kapsamda muhtemel alternatif enerji kaynaklarının başında yenilenebilir enerji kaynakları gelmektedir. Fosil kökenli enerji kaynaklarının zararlı etkileri yenilenebilir enerji kaynakları aracılığıyla bertaraf edilmekte ve çevreye duyarlı enerji dönüşüm yöntemlerinin kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretilmesi ile yararlı hale dönüşüm gerçekleşmekte ve dönüşüm sistemlerinin yüksek dönüşüm verimine sahip olması en uygun yöntemin ve donanımın seçilmesi ile sağlanmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisi, rüzgâr türbinleri ile yararlı hale dönüştürülmektedir. Rüzgâr türbinlerinin bireysel kullanılması ile kırsal bölgelerde yaşayan toplumların ihtiyaçları karşılanmakta bunun yanında endüstriyel olarak kurulan ve işletimi yapılan tesisler aracılığıyla da modern toplumların elektrik tabanlı enerji ihtiyaçları karşılanmaktadır. Rüzgâr enerjisinin daha verimli ve etkin kullanılması için bölgeye özel rüzgâr türbinlerinin kullanılması ve daha verimli kanat geometrilerinin ve enerji dönüşüm sistemlerinin tasarlanması gerekmektedir [1]. Rüzgâr türbinlerinde bulunan kanat duvarlarına etkiyen kaldırma kuvveti türbin rotorunun dönmesine neden olmakta ve rotorun bağlı olduğu jeneratör grubu da elektrik üretmektedir [2]. Bu nedenle türbin kanatlarının aerodinamik performansı türbin verimini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Türbin kanatlarının veya kanat profillerinin aerodinamik performansı üzerine farklı araştırmacılar tarafından birçok sayısal ve deneysel çalışma yapılmış ve bu çalışmalardan bazıları şu şekilde sıralanmıştır. Erişen ve Bakırcı [3], NACA-0012 ve NACA-4412 kanat profilleri üzerinde bir takım değişiklikler yaparak yeni kanat profilleri oluşturmuş ve tüm kanatların aerodinamik performansını ifade eden C_L , C_D ve C_L/C_D katsayılarını hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi sonucunda elde etmiştir. -10 ile 10° arasındaki düşük hücum açılarında (α) gerçekleştirilen analizlerde, hücum açısı 6° olduğunda en yüksek aerodinamik verim elde edilmiştir. Düşük hücum açılarında Mach sayısının artması sürtünme kuvvetini lineer olarak yükseltirken, hücum açısının artması ile sürtünme kuvvetinde parabolik bir artış gözlenmiştir. Gugliya ve ark. [4] NACA-0012 kanat profiline sahip bir modelin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizini ses altı akış şartları altında Spalart Allmaras türbülans modeli kullanarak 3×10^6 Re sayısı için sayısal olarak gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışma sonucunda mevcut fiziksel yapının HAD ile kabul edilebilir seviyede modellenebildiği sonucuna varılmıştır. Patel ve ark. [5] tarafından 3×10^6 Re sayısı altında, 0° ve 6° hücum açısında NACA-0012 kanat modeli aerodinamik

performansını incelemek için sayısal inceleme yapılmıştır. Sayısal çalışmada hücum açısının 0° den 6° 'ye getirilmesi durumunda sürtünme kuvvetinde meydana gelen artışın, kaldırma kuvvetine göre çok daha düşük olduğunu gözlenmiştir.

Şahin ve Acır [6], NACA-0015 rüzgâr türbini kanat profilini, düşük Re sayısında (6×10^4) 0 ile 20° hücum açılarında deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Araştırmacılar deneysel olarak elde ettikleri verileri Spalart Allmaras ve k- ϵ türbülans modeline sahip HAD analizleri ile karşılaştırmış ve elde edilen sonuçların benzer yapıda olduğunu ifade etmiştir. Chen ve ark. [7], çalışmalarında yüksek performanslı rüzgâr türbini kanat grubunun tasarımını yaparak hem serbest hem de sabit geçişli hücum açılarında kanatların sahip olduğu kaldırma/sürüklenme oranını (C_L/C_D) maksimize etmeye çalışmıştır. Bu amaçla genetik algoritma ve akış çözücü RFOIL™ yazılımını kullanarak optimize bir matematiksel model oluşturulmuştur. Elde edilen matematiksel modele göre üretilen WT kanat profili grubu imal edilerek rüzgâr türbininde hem normal hem de ağır hava şartlarında test edilmiştir. Yapılan tasarımlar ile yüksek kaldırma katsayısına ve aerodinamik verime sahip kanat grubu elde edilmiş ve tasarlanan yüksek performanslı kanat profili deneysel ve sayısal çalışma ile doğrulanmıştır. Maulana ve ark. [8], NACA-63 serisi kanat profili değişiminin Darrieus tipi dikey eksenli rüzgâr türbini (DERT) performansına etkisini üç boyutlu HAD analizi yöntemiyle incelemiştir. Yapılan çalışmada $2,5$ m/s rüzgâr hızı altında çalışan kanat yapılarından en iyi kaldırma ve sürüklenme katsayısına sahip olan -12 ile 12° arasındaki her 4° 'lik hücum açıları için sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre $2,5$ m/s rüzgâr hızında çalışabilecek Darrieus tipi DERT'de NACA-63-412 kanat profilinin kullanılması en iyi güç çıktılarının elde edilmesine imkân vermektedir. Saad ve ark. [9], yaptıkları çalışmada, rüzgâr türbinlerinde kullanılması muhtemel altı farklı kanat modeli (FX 63-137, FX 76-100, S835, S809, NACA-63415 ve NACA-63215) kullanarak 4×10^6 Re sayısı bölgesinde ve -15 ile 15° hücum açısı aralığında en iyi C_L/C_D 'ye sahip yapıyı sayısal olarak ANSYS Fluent™ ve XFOIL™ programlarıyla belirlemeye çalışmıştır. Tüm kanat profilleri için yapılan sayısal çalışma sonuçları uyumlu bulunmuştur. Ayrıca elde edilen sayısal sonuçlar FX 63-137 tipi kanat profilinin deneysel verileri ile doğrulanmıştır. Suvanjumrat [10], açık kaynak kodlu HAD analiz programı olan OpenFOAM™ kullanarak NACA-0015 kanat profili etrafındaki akışı Spalart Allmaras, Wilcox k- ω ve Menter SST k- ω modelinden oluşan üç farklı ekonomik türbülans modeli ile ayrı ayrı incelemiş ve kanat profilinin performansını ifade etmede kullanılan C_L ve C_D katsayılarını elde etmiştir. Çözümlenen sayısal sonuçlar NACA-0015 kanat profili için yapılan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve yapılan karşılaştırılma neticesinde C_L ve C_D katsayıları sırasıyla %13,15 ve %22,36 kadarlık bir hata ile en iyi ifade eden türbülans modelinin Menter SST k- ω modeli olduğu sonucuna varılmıştır. Chumbre ve ark. [11], beş

farklı kanat profiline (NACA-0012, NACA-2412, NACA-6409, NACA-4412, NACA-E387) C_L ve C_D katsayılarının detaylı HAD analizlerini yapmıştır. Yapılan HAD analizleri neticesinde NACA-E387 kanat profiline yüksek kaldırma kuvveti ve düşük sürüklenme kuvveti olduğu ve böyle bir kanat profiline sahip uçak kullanıldığında yakıt sarfiyatının daha az olacağı sonucuna varılmıştır.

Tanürün ve Acır [12], kambur balina yüzgecindeki tüberkül kanat yapısının canlıya kazandırdığı manevra kabiliyetinden esinlenerek, mevcut NACA-0015 kanat profiline sinüzoidal yapı geometrisi (tüberkül) uygulayarak elde edilen tasarımların aerodinamik performanslarını sayısal olarak değerlendirmiştir. Kanat profilleri $7,2 \times 10^5$ Re sayısında, 0 ile 46° arasındaki hücum açılarında analiz edilmiştir. İrtifa kaybı sonrasında aerodinamik verimin, $0,05a0,16w$ kanat profili için düz kanat profiline kıyasla %3,81 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Tasarlanan iyileştirmeler neticesinde standart haldeki NACA-0015 kanadına yapılan müdahale ile aerodinamik verim artışı sağlanmıştır. Xiao ve Chen [13], 50 m/s hava hızında NACA-0010-35 kanat modelinin C_L , C_D ve C_L/C_D değerleri iki boyutlu HAD analizleriyle -5 ile 19° kanat hücum açılarında sayısal olarak incelenmiştir. En yüksek aerodinamik verim 4° hücum açısında gerçekleşmiştir. Değerlendirilen kanat için irtifa kaybı 14° hücum açısında meydana gelmiş ve hücum açısının arttırılması kanat üzerinde girdap (vortex) bölgeleri oluşturmuştur. Ameer ve Boukhadia [14], farklı Re sayılarında NACA-0015 kanat modeli üzerinde sayısal analizler gerçekleştirmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, çalışmada kullanılan 3 farklı Re sayısında da hücum açısı arttıkça C_L ve C_D değerlerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca Re sayısının, kanat üzerindeki statik basınç dağılımına herhangi bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Rao ve ark. [15], NACA-0012 kanat modeli üzerinde $0-12^\circ$ hücum açısı aralığında C_L ve C_D değerlerinin değişimini incelemek amacıyla sayısal analiz gerçekleştirmiştir. Analizlerde asimetrik kanat modellerinin C_L değerlerinin simetrik kanatlara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Baykuş kanat yapısına sahip kanat modelinin C_L , C_D ve C_L/C_D değerlerinin değişimi 4,7-12 m/s arasındaki hava hızlarına karşılık gelen 5 farklı Re sayısında deneysel olarak Anyoji ve ark. [16] tarafından incelenmiştir. Çalışmada akış görselleştirme metodu kullanılarak kanat üst yüzeyindeki akış ayrışmaları incelenmiştir. -5 ile 20° hücum açılarında gerçekleşen deneysel sonuçlar incelendiğinde Re sayısının artışı C_L değerinin de lineer olarak artmasına neden olmuştur. Rogowski ve ark. [17], DU-91-W2-250 kanat modeli aerodinamik performansını 3×10^6 Re sayısında deneysel ve 4 farklı türbülans modelinin dikkate alındığı sayısal çalışmalarla karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Reynolds ortalamalı Navier Stokes (Reynolds averaged Navier Stokes-RANS) denklemlerine bağlı çözülen türbülans modellerinde -20 ile 20° hücum açılarında analizler yapılırken, ayrılmış eddy simülasyonu (Detached Eddy

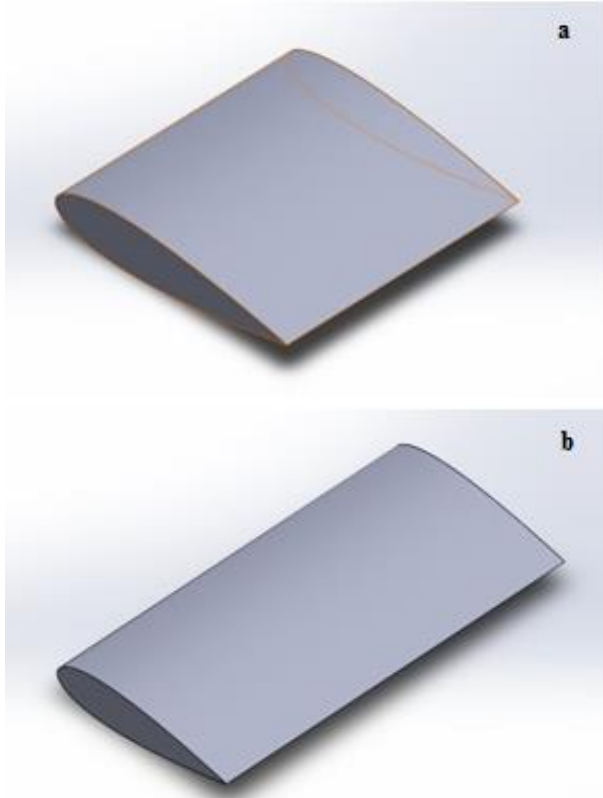
Simulation-DES) denklemlerine bağlı çalışmada sadece $7,08^\circ$ hücum açısında hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, $k-\epsilon$ SST türbülans modelinin C_D değeri deneysel çalışmaya göre 2 kat daha büyük bulunmuştur. Negatif hücum açılarında $k-\epsilon$ SST türbülans modelinde diğer türbülans modellerine göre en kötü sonuçlar hesaplanmıştır. Geçiş SST türbülans modeli laminardan türbülansa geçiş bölgesini en iyi çözümlen türbülans modeli olmuştur. Gore ve ark. [18], NACA-4412 kanat modelinin basınç dağılımını 0 ile 27° hücum açısı aralığında sayısal olarak incelemiştir. Sonuçlar yorumlandığında en yüksek C_L 'ye 25° hücum açısında ulaşılmıştır. Hücum açısı artışının neden olduğu kanadın alt ve üst yüzeyindeki basınç farkının artması C_L 'nin yükselmesiyle sonuçlanmıştır. Bedon ve ark. [19] tarafından dikey eksenli rüzgâr türbinleri arasında olan DeepWind tipi türbinde NACA-0015 ve NACA-0018 tipi kanat profiline sahip yapıların türbinden maksimum güç üretmek için ayrı ayrı veya birleştirilmiş tasarımları üzerine sayısal inceleme yapılmıştır. Çalışma sonucunda DeepWind tipi rüzgâr türbinini verimini yükseltmek için NACA-0015 ve NACA-0018 kanat profillerinin kombine edilmesiyle yeni bir yapının kullanılmasının gerektiği sonucuna varılmıştır. 5 farklı türbülans modeli (standard, RNG ve Realizable $k-\epsilon$, standard ve SST $k-\omega$) kullanılarak, dikey eksenli rüzgâr türbinlerinde (DERT) NACA-0018 kanat modelinin aerodinamik performansı sayısal olarak Hassan ve ark. [20] tarafından incelenmiş ve literatürde bulunan deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Re sayısı 300 000 ile 1 000 000 arasında ve hücum açısı 0 ile 25° aralığında kabul edilmiştir. Karşılaştırmada kullanılan deneysel verilerle en uyum içerisinde olan sayısal sonuçlara SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılarak erişilmiştir. DERT tasarımları için benzer bir çalışma Rogowski ve ark. [21] tarafından yapılan NACA-0018 kanat profiline sahip Darrieus tipi rüzgâr türbinin daimi ve daimi olmayan akış şartları için yapılan aerodinamik performans incelemesidir. Zamana bağlı sayısal çalışmadan, SST türbülans modeli kullanılmasıyla en iyi çözümler elde edilmiş ve deneysel sonuçlar daha doğru yorumlanmıştır.

Bu çalışmada, rüzgâr türbinlerinde kullanılması muhtemel, farklı açıklık oranlarındaki NACA-0018 kanat profiline sayısal ve deneysel olarak incelenmesi yapılmıştır. Seçilen iki farklı NACA-0018 kanat profiline her ikisinde de veter uzunluğu 8 cm ve kanat uzunluğu ise 8 cm ve 16 cm olarak belirlenmiştir. Mevcut çalışmaların çoğunluğunda yüksek en-boy oranına sahip sayısal ve deneysel modeller kullanılmaktayken bu çalışmada düşük en-boy oranına sahip kanat profillerinin akış karakteristikleri ve aerodinamik performansları incelenmiştir. NACA-0018 kanat profiline aerodinamik performansını ifade eden C_L , C_D ve C_L/C_D değerleri ANSYS Fluent™ 14,5 ticari HAD programıyla analiz edilmiş ve elde edilen bulgular deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

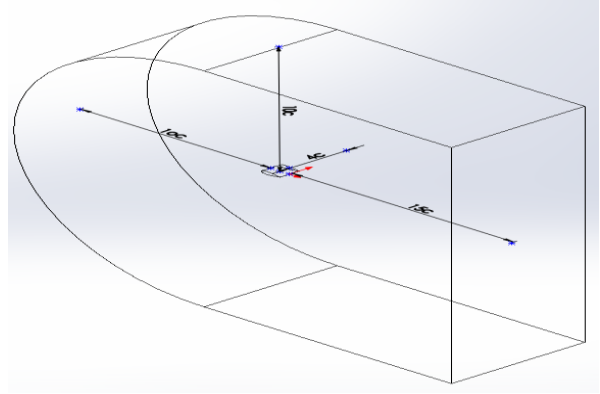
2.1 Sayısal Çalışma (Numerical Study)

NACA-0018 kanat profili ilk olarak iki farklı açıklık oranında bilgisayar destekli tasarım (BDT-CAD) programlarından olan Solidworks™ ile tasarlanmış ve elde edilen modeller Şekil 1'de gösterilmiştir. Kullanılan NACA-0018 kanat profilinin veter çizgisi alt ve üst yüzeylerin tam ortasından geçtiği yani kamburluk eğrisi bulunmadığı için simetrik kanat olarak tanımlanmıştır [22]. Her iki kanat yapısında veter uzunluğu 8 cm olarak belirlenirken, kanat açıklığı ise sırasıyla AR1 için 8 cm ve AR2 için 16 cm olarak alınmıştır.



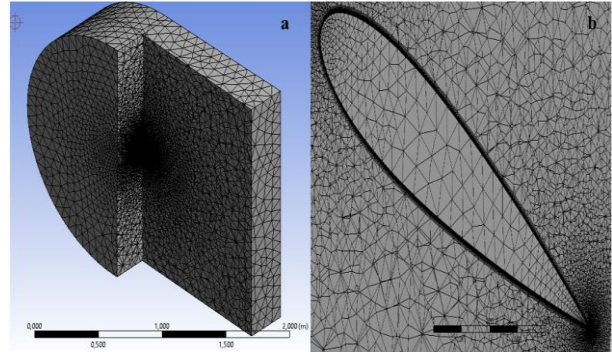
Şekil 1. a) AR1, b) AR2 kanat profilleri (AR1 and AR2 aerofoil profiles)

Kanat profillerinin alanı deneysel çalışmada kullanılan rüzgâr tüneli boyutlarıyla uyumlu olması açısından AR1 ve AR2 kanadı için sırasıyla 0,0064 m² ve 0,0128 m² olarak hesaplanmıştır. Sayısal analizlerde akışkanın belirlenen hacme başka bir ifadeyle akış hacmi içerisinde bir noktadan girmesi (inlet) ve diğer bir noktadan çıkması (outlet) için kullanılan ticari yazılımda tanımlama yapılması gerekmektedir. Şekil 2'de gösterildiği gibi giriş, çıkış ve yan yüzeylerin kanat modeline olan uzaklığı sırasıyla 10C, 15C ve 4C olarak alınarak akış hacminin boyutları literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir.



Şekil 2. Sayısal analiz için kullanılan C tipi akış alanı boyutları (C-type flow area for numerical analysis)

Kısa ve en az ağ örgüsü (mesh) sayısı ile en ideal yapıyı elde edebilmek için C tipi akış hacmi ve ağ örgüsü olarak ise üçgen (triangular) yapı kullanılmıştır. C tipi akış hacmi, yüksek derecede kontrol ve doğruluk, daha düşük bellek tüketimi ve daha hızlı yakınsama sağlaması açısından tercih edilmiştir [23]. Akış hacmi içerisinde hava akışı her noktada aynı etkiyi göstermemektedir [6, 9]. Ağ yapısı içerisinde en fazla değişiklik kanat profili ve çevresinde meydana gelmektedir. Şekil 3a'da verilen C tipi akış alanı içerisinde bulunan kanat bölgesinde ağ örgüsü yoğunluğu Şekil 3b'de gösterildiği gibi kanada yakın bölgelerde yoğunlaştırılmış ve bu bölgelere etkiyen havanın etkilerini detaylı inceleyebilmek için bölgeye düşen ağ örgüsü sayısı artırılmıştır.



Şekil 3. a) Ağ yapısı, b) Yoğunlaştırılmış ağ bölgesi (a) Mesh structure, b) Intensified mesh zone)

Yapılan sayısal çalışmada hava olarak seçilen akışkan ideal gaz olarak kabul edilmiştir. Akış alanı viskoz, türbülanslı ve $5,7 \times 10^4$ Re sayısında enerji denklemlerinin çözüme ilave edilmemesi için sıkıştırılmaz kabul edilmiştir. Mevcut RANS hesaplaması için geçerli denklemler, süreklilik denklemi ve momentumun korunumu denklemlerinden oluşmakta ve şu şekilde ifade edilmektedir [23-27].

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi;

$$\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{u}\vec{u}) = \nabla(\mu\nabla\vec{u}) - \nabla p + \rho\vec{g} \quad (2)$$

Burada, \vec{u} x, y ve z doğrultusundaki hız vektörünü, p basıncı, μ dinamik viskoziteyi, ρ akışkanın yoğunluğunu tanımlamaktadır. Farklı fiziksel olaylara göre geliştirilen cebirsel, tek denklemlilik, iki denklemlilik ve Reynolds gerilme modelleri bulunmaktadır [26]. Cisimler etrafındaki akışı modellemek için en yaygın kullanılan türbülans modelleri arasında Spalart Allmaras, k- ϵ , k- ω ve SST türbülans modelleri bulunmaktadır [22-28]. Tüm akışlar için belirli bir türbülans modeli belirlemek mümkün değildir.

Yapılan sayısal çalışmada ise Suvarajumrat [10] tarafından yapılan çalışma göz önüne alınarak Menter SST k- ω türbülans modeli tercih edilmiştir. Menter SST k- ω türbülans modeli, sınır tabaka problemlerinde ve duvar dibi bölgesi olarak adlandırılan kanat çevresi bölgelerinde daha hassas çözüm yapmaktadır [10]. Bunun dışında yüksek hücum açılarında kanat üst yüzeyinde oluşan türbülanslı bölgelerin daha doğru şekilde çözümlenmesine imkân sağlamaktadır [10]. Menter SST k- ω türbülans modeli, sınır tabakada içerisinde daha hassas çözüm elde etme için Wilcox k- ω modelinin yeniden değerlendirilmesi sonucu geliştirilmiştir [10]. İki denklemlilik olan Menter SST k- ω modeli aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [10, 22-28]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U_i) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\rho k}{\omega \sigma_k} \right) \nabla k \right] + 2 \frac{\rho k}{w} S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial U_i}{\partial x_j} S_{ij} - \beta^* \rho k \omega \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega U_i) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\rho k}{\omega \sigma_{\omega 1}} \right) \nabla \omega \right] + 2 \rho \gamma_2 S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \gamma_2 \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} S_{ij} - \beta_2 \rho \omega^2 + 2 \frac{\rho}{\omega \sigma_{\omega 2}} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \quad (4)$$

Burada, k türbülans kinematik enerji, w türbülanslı frekans, μ dinamik viskozite, y katı duvara olan mesafe olarak tanımlanmıştır. Eşitliklerde bulunan sabitlerden olan σ_k , β^* , $\sigma_{\omega 1}$, γ_2 , β_2 ve $\sigma_{\omega 2}$ sırasıyla 1, 0,09, 2, 0,44, 0,083 ve 1,17 değerlerine sahiptir [10].

Kanat profillerinin aerodinamik performanslarının incelenmesinde kaldırma katsayısı (C_L), sürüklenme katsayısı (C_D) ve aerodinamik verim (C_L/C_D) en önemli değişkenlerdir. C_L ve C_D aşağıda verilen eşitlikler ile tanımlanmaktadır [2]:

$$C_L = \frac{F_L}{0.5 \rho U_{\infty}^2 A} \quad (5)$$

$$C_D = \frac{F_D}{0.5 \rho U_{\infty}^2 A} \quad (6)$$

Burada, U_{∞} (m/s) serbest akış hızı, A (m²) kanat genişliğinin veter uzunluğuna çarpımı ile elde edilen kanat gölgesinin karakteristik alanı, F_L (N) kanada etkiyen kaldırma kuvveti, F_D (N) kanada etkiyen sürüklenme kuvveti ve ρ (kg/m³) havanın yoğunluğu olarak ifade edilmektedir.

Sayısal analizden elde edilen sonuçların doğruluğunun tescil edilebilmesi için ağ yapısından bağımsızlığın

gösterilmesi gerekmektedir [27]. Ağ yapısından bağımsızlık çalışmasında hem AR1 hem de AR2 kanat modellerinin 20° hücum açısında, 6 farklı ağ yapısı kullanılarak sayısal olarak hesaplanan C_L ve C_D değerlerinin değişimi aşağıda verilen Çizelge 1 ve Çizelge 2'deki gibidir. Çizelge 1'de AR1 kanadında 942 864 ve Çizelge 2'de AR2 kanadında 1 052 956 mesh sayısından sonra C_L ve C_D katsayılarında %0,1'den daha küçük değişimler olduğu görülmektedir. Dolayısıyla AR1 ve AR2 kanatları için sırasıyla 942 864 ve 1 052 956 ideal ağ sayıları olarak belirlenmiştir.

Çizelge 1. 20° hücum açısında AR1 kanadının ağ yapısından bağımsızlığı (Mesh independence of AR1 aerofoil at 20° angle of attack)

Mesh Sayısı	C_L	C_D
761 329	0,728	0,161
875 431	0,738	0,209
942 864	0,741	0,223
1 017 875	0,74236	0,22478
1 187 144	0,74234	0,22477
1 428 783	0,74235	0,22479

Çizelge 2. 20° hücum açısında AR2 kanadının ağ yapısından bağımsızlığı (Mesh independence of AR2 aerofoil at 20° angle of attack)

Mesh Sayısı	C_L	C_D
774 129	0,847	0,147
878252	0,858	0,171
987100	0,869	0,189
1 052 956	0,87233	0,20285
1 214 426	0,87232	0,20384
1 702 116	0,87232	0,20384

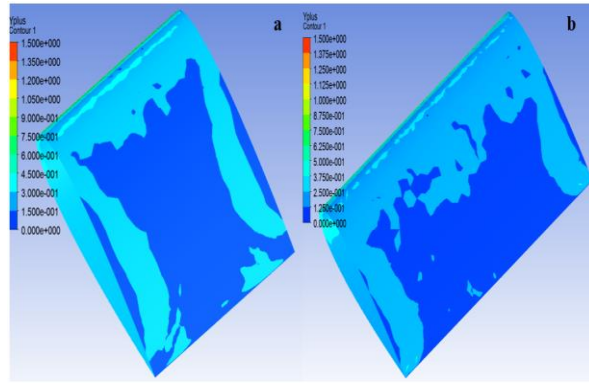
Ağ kalitesi ve doğruluğunun değerlendirilmesinde sadece C_L ve C_D değerlerinde meydana gelen değişimlerin minimuma ulaşmasının amaçlanması, elde edilen çözümün hatalı olmasına sebep olabilmektedir. ANSYS Fluent™ programı kullanılarak elde edilen ağ yapısının geçerliliği 2 farklı yöntem ile kontrol edilebilmektedir. Birincisi, her bir ağ örgüsünün geometrisine bağlı olarak, 0 ile 1 değerlerine sahip olan çarpıklık (skewness), eleman kalitesi (element quality) ve ortogonal kalite (orthogonal quality) değerleridir [25, 28]. Kaliteli bir ağ yapısı için çarpıklık değeri 0 değerine yakın olması gerekirken eleman ve ortogonal kalite

değeri 1 değerine yakın olmalıdır [25, 28]. Seçilen ağ yapısına bağlı olarak AR1 ve AR2 kanat modelleri için elde edilen çarpıklık, eleman ve ortogonal kalite değerleri Çizelge 3’de verilmiştir. Bulunan sonuçların sayısal çalışmalarda ulaşılması gereken değerlerle uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Çizelge 3. 20° hücum açısında AR1 ve AR2 için ağ yapısı özellikleri (Mesh properties for AR1 and AR2 at 20° angle of attack)

	Eleman kalitesi (Element quality)	Ortogonal kalite (Orthogonal quality)	Çarpıklık (Skewness)
AR1	0,79	0,89	0,22
AR2	0,77	0,86	0,24

Ağ yapısının kalitesini belirleyen ikinci unsur ise kanat modelinin akış alanı içerisinde yakın bölgesindeki ağ katmanına bağlı oluşan kalite olarak tanımlanan y^+ değeridir [29]. Bu değer duvardan olan uzaklığı tanımlayan boyutsuz bir sayı olmakla birlikte literatürde iç akış için 30 ile 100 arasında ve dış akış için 0 ile 5 arasındaki olması tavsiye edilmektedir [25, 27-29]. Mevcut sayısal çalışma için oluşturulan ağ yapısının maksimum y^+ dağılımı Şekil 4’de sunulmuştur. Şekil 4 incelendiğinde her iki kanat modelinin de y^+ değeri dış akış şartlarına bağlı olarak 1,5’den küçük bulunmuş ve böylece oluşturulan ağ yapısının geçerliliği sağlanmıştır.



Şekil 4. Kanat yüzeyindeki y^+ dağılımı; a) AR1, b) AR2 (y^+ distribution on aerofoil surface; a) AR1, b) AR2)

2.2 Deneysel Çalışma (Experimental Study)

CAD programında çizilen NACA-0018 kanat profiline sahip model, deneysel çalışma kapsamında öncelikle ahşap türü olan ladin malzemeden uygun kalıplar kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen kanat modelleri yüzeyindeki pürüzlülüğü engellemek için zımparalama ve vernikleme işlemleri de yapılmış ve Şekil 5’deki gibi modeller elde edilmiştir. Belirlenen kanat profillerine sahip modeller rüzgâr tünellerinde test edildiklerinde, test odasının iki yan duvarı ve tavanıyla sınırlanmaktadır.

Bu durum model ile test odasının duvarları arasındaki daralan bölgelerde akışın ivmelenmesine ve model üzerindeki akış yüklerinin artmasına neden olarak blokaj etkisinin meydana gelmesine neden olmaktadır [26]. Bu etki, blokaj oranının (model iz düşüm alanı/rüzgâr tüneli test odası kesit alanı) düşük seçilmesiyle engellenmektedir [30-32]. Yapılan deneysel çalışmada NACA-0018 profiline sahip AR1 ve AR2 tipi kanat modelleri için blokaj oranı sırasıyla 0,075 ve 0,15 olarak belirlenerek blokaj etkisinin zararlı etkilerinden kaçınılmıştır.



Şekil 5. AR1 ve AR2 kanat modelleri (AR1 and AR2 aerofoil models)

Deneysel çalışmada Şekil 6’da görülen GUNT marka HM-170 tipi açık çevrimli rüzgâr tüneli kullanılmıştır. Rüzgâr tüneline hava girişi emiş yönünde ve akış hızı şalter kutusu üzerindeki fan devir ayar şalteri kullanılarak fan devrinin değiştirilmesiyle ayarlanmıştır. Kullanılan tünelin ait teknik özellikler Çizelge 4’de detaylandırılmıştır [33].



Şekil 6. Açık çevrimli rüzgâr tüneli (Open loop wind tunnel)

Çizelge 4. Kullanılan rüzgâr tünelinin teknik özellikleri [33] (Technical specifications of the used wind tunnel)

Fan motoru devir sayısı	2800 dev/dk
Test odası boyutları	292 x 292 mm ²
Akış hızı aralığı	3,1...28 m/s
Tünel ana boyutları	2850 x 750 x 1700 mm ³
Tünel kütlesi	250 kg

Deneysel, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Ankara'nın hava koşullarını dikkate alarak yoğunluk (ρ) ve dinamik viskozite (μ) değerleri sırasıyla $1,15 \text{ kg/m}^3$ ve $1,768 \text{ kg/ms}$ olarak alınmıştır. Havanın akış kanalındaki hızı GERATECH marka sıcak tel anemometresi ile ölçülmüştür. Sıcak tel anemometresi kullanılarak HM170 açık çevrimli rüzgâr tünelineki hava hızı 11 m/s hızı ayarlanmış ve deneysel çalışmadaki Re sayısı Eşitlik 3 kullanılarak $5,7 \times 10^4$ olarak hesaplanmıştır.

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} L_c}{\mu} \quad (7)$$

Burada, L_c kanat modelinin karakteristik uzunluğu olarak ifade edilmiştir. Hava hızının ayarlanmasında sonra AR1 ve AR2 kanat modelleri rüzgâr tüneli test odasına yerleştirilerek 0 ile 60° aralığındaki hücum açılarında her 5° için kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri ölçülmüştür. Kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin ölçümü için Şekil 6'da gösterilen GUNT HM-170 marka kuvvetölçer kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan ölçüm cihazlarının belirsizlik analizinde Kline ve McClintock [34] metodundan yararlanılmıştır. Bu yöntem kullanılarak Eş. 4 ve 5'deki ifadeler kullanılarak, belirsizliği meydana getiren her bir değişkenin toplam belirsizliğe etkisi dikkate alınmıştır.

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N) \quad (8)$$

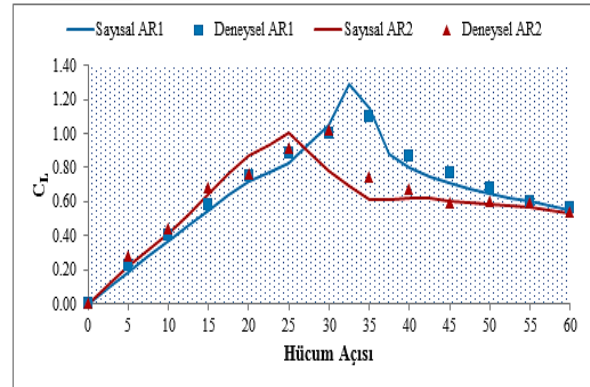
$$W_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} w_3\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_N} w_N\right)^2} \quad (9)$$

Kaldırma ve sürüklenme kuvveti için elde edilen ölçüm belirsizliği $\pm 0,014 \text{ N}$ ve akışkan hızı için hesaplanan ölçüm belirsizliği ise $\pm 0,10 \text{ m/s}$ 'dir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, AR1 ve AR2 olmak üzere 2 farklı en boy oranına sahip NACA-0018 kanat modelinin deneysel ve sayısal olarak aerodinamik performansları incelenmiştir. Aerodinamik performansın temelini oluşturan C_L , C_D , C_L/C_D değerleri aşağıdaki şekillerde sırasıyla verilmiştir. Şekil 7 'de 2 farklı kanat açıklık oranında NACA-0018 kanat modelinin C_L değerleri deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Şekil 7 incelendiğinde, AR1 ve AR2 kanat modellerinin deneysel çalışma sonucunda irtifa kaybı açısı sırasıyla 35° ve 30° olarak belirlenirken, sayısal analizde AR1 ve AR2 kanatlarının irtifa kaybı açısı $32,5^\circ$ ve 25° olarak bulunmuştur. AR1 kanat modelinin hem sayısal olarak hem de deneysel olarak irtifa kaybı açısının AR2 kanat modeline göre büyük olması, kanat uç girdaplarının AR1 kanat yüzeyinin daha büyük bir bölümünde oluşmasından kaynaklanmaktadır. AR1 ve AR2 kanat modelinin deneysel ve sayısal sonuçlarında $2,5^\circ$ ve 5° 'lik bir fark olduğu görülmektedir. Bu durum sayısal çalışmada kanat modeli yüzeylerinin pürüzsüz olarak tanımlanması, deneysel çalışmada malzeme kaynaklı pürüzlülük meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. 0 ile 15° arasındaki

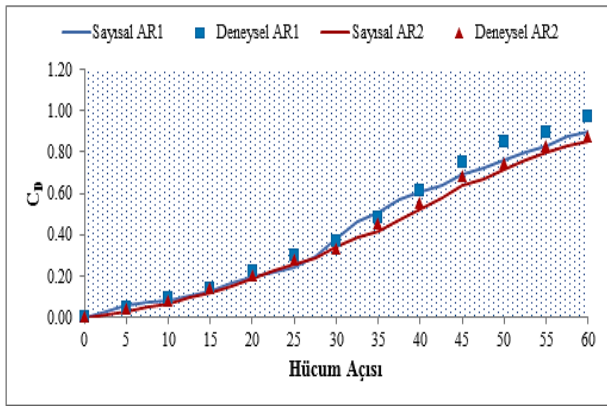
hücum açılarında AR2 kanadının deneysel ve sayısal analizlerinde C_L değerleri birbirine benzer davranış gösterirken, 15° 'den sonra irtifa kaybı açısına kadarki hücum açılarında, irtifa kaybı açılarının farklılığına bağlı olarak sayısal analizlerin C_L değerinin deneysel çalışmaya nazaran daha yüksek olduğu gözlenmektedir. AR2 kanadında irtifa kaybı açısından sonraki süreçte hem deneysel hem de sayısal analizde C_L değeri hızlı bir şekilde azalmaktadır. 40° 'den sonra AR1 kanadı için yapılan her iki çalışmada da benzer bir ivmeyle azaldığı görülmektedir. AR1 kanadı için irtifa kaybı öncesi, deneysel ve sayısal çalışmaların C_L değerleri, AR2 kanadına nazaran çok daha benzer davranış göstermektedir. AR1 kanadında irtifa kaybı açısından sonra C_L değeri ise AR2 kanadına göre daha keskin bir şekilde azalmaktadır. İrtifa kaybı öncesi AR1 kanadı için deneysel çalışma sonucunda elde edilen C_L değerinin, sayısal sonuca göre %5,19 daha yüksek olduğu görülmektedir, irtifa kaybı sonrasında bu değer %12,56 ile sayısal çalışma yönündedir. AR2 kanadında ise irtifa kaybı öncesi için deneysel bulgulardan elde edilen C_L değeri, sayısal sonuçlardan elde edilen C_L değerine göre %10,88 daha büyükken, irtifa kaybı sonrasında bu değer %1,60 ile sayısal çalışma yönünde iyileşme göstermiştir.



Şekil 7. Deneysel ve sayısal analizdeki C_L değerleri (C_L values in experimental and numerical analysis)

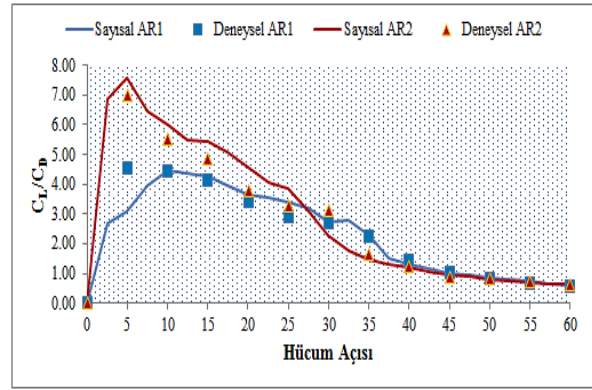
Dikkat edilecek olursa AR1 kanadının hem deneysel hem de sayısal çalışmalarında C_L karakteristik eğimi birbirine çok yakındır. AR1 kanadının deneysel ve sayısal çalışma sonucunda irtifa kaybına uğradığı hücum açıları arasındaki $2,5^\circ$ fark olmasının temel sebebi sayısal çalışmada kanat yüzeyi pürüzsüz seçilirken, deneysel çalışmada malzemenin özelliğine bağlı olarak kanat yüzünde pürüzlülük oluşmasıdır. Deneysel çalışmada kanat yüzeyinde oluşan pürüzlülük, sayısal çalışmaya göre kanat profilinin üst yüzeyinde akışın daha geç ayrılmasına ve buna bağlı olarak irtifa kaybı açısının deneysel çalışmada $2,5^\circ$ daha büyük olmasına neden olmuştur. AR2 kanadında ise deneysel ve sayısal çalışmaların irtifa kaybı açısı sırasıyla 30 ve $27,5^\circ$ hücum açısı olduğu görülmektedir. AR1 kanadında meydana gelen benzer yüzey pürüzlülüğü sebebinden dolayı AR2 kanadının deneysel ve sayısal sonuçları arasında da $2,5^\circ$ 'lik bir hücum açısı farkı meydana gelmiştir.

Şekil 8’de 2 farklı kanat açıklık oranında NACA-0018 kanat modelinin C_D değerleri deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılmıştır. 0 ile 25° arasındaki hücum açılarında AR1 ve AR2 kanatlar modelleri için yapılan deneysel ve sayısal analizlerde C_D değerleri birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Ancak 30° hücum açısından sonra AR1 kanadında irtifa kaybı başlangıcına bağlı olarak kanat üst yüzeyinde laminer ayrışma bölgeleri (LAB) oluşmaktadır. LAB oluşumunun bir sonucu olarak AR1 kanadının C_D değeri hızlı bir şekilde artmıştır. AR2 kanadında C_D değerinin sabit bir eğimle artması ise AR1 kanadındaki kadar keskin irtifa kaybı meydana gelmemesinden kaynaklanmaktadır. Bu yüzden AR2 kanadında C_D değeri 60° hücum açısına kadar sabit bir eğimle artarken, AR1 kanadında dalgalanma olmaktadır. Deneysel olarak AR2 kanadından elde edilen C_L ve C_D dağılımları boutilier [35] tarafından yapılan çalışma sonucunda elde edilen bulgularla benzerlik göstermektedir.

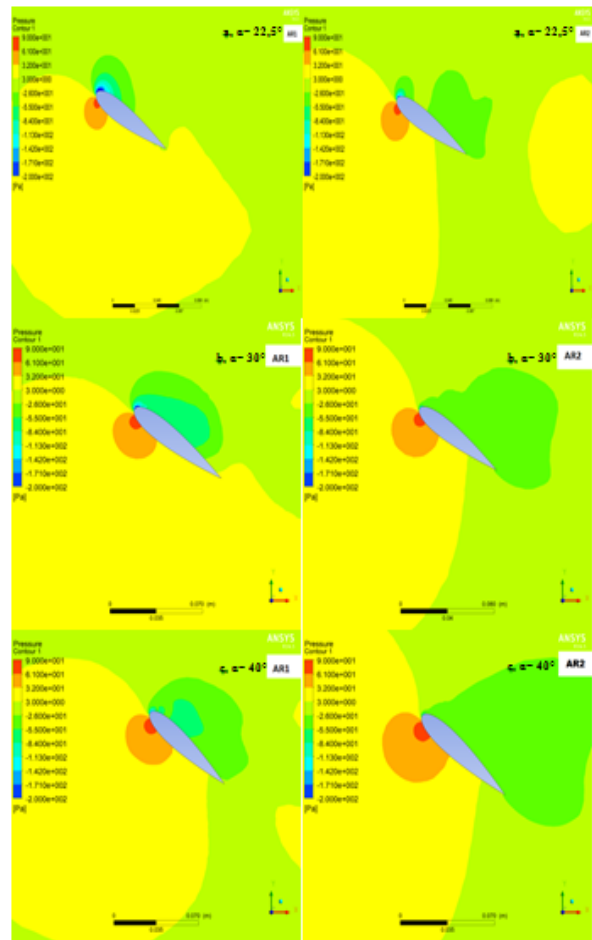


Şekil 8. Deneysel ve sayısal analizdeki C_D değerleri (C_D values in experimental and numerical analysis)

Şekil 9’da 2 farklı kanat açıklık oranında NACA-0018 kanat modelinin C_L/C_D değerleri deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılmıştır. 0 ile 5° hücum açısında AR2 kanadının deneysel ve sayısal çalışmalarından elde edilen C_L/C_D değerleri AR1 kanadına göre belirgin şekilde daha yüksektir. 5° hücum açısında AR2 kanadı için deneysel ve sayısal sonuçlarda C_L/C_D değerleri sırasıyla 7 ve 7,59 elde edilirken, AR1 kanadında deneysel ve sayısal sonuçlar sırasıyla 4,54 ve 3,11 olarak bulunmuştur. 5°’den sonra her iki kanat modelinde de C_L/C_D değerleri lineer bir ivmeyle azalmaktadır. 40° hücum açısından sonra her iki kanat modelinin deneysel ve sayısal değerleri aynı seviyeye ulaşmaktadır.

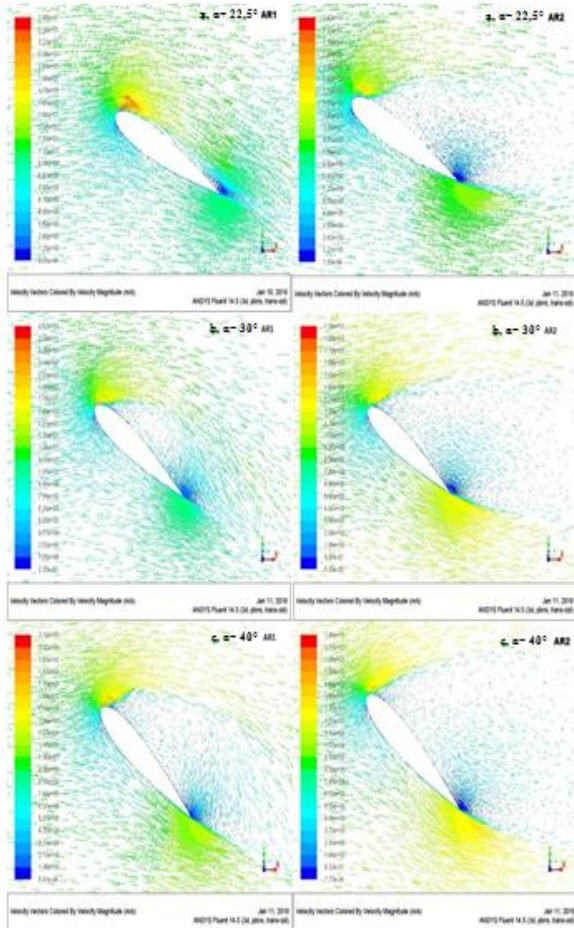


Şekil 9. Deneysel ve sayısal analizdeki C_L/C_D değerleri (C_L/C_D values in experimental and numerical analysis)



Şekil 10. AR1 ve AR2 kanat modelleri için basınç farkı; a) $\alpha=22,5^\circ$, b) $\alpha=30^\circ$, c) $\alpha=40^\circ$ (Pressure gradient for AR1 and AR2 aerofoil models; a) $\alpha=22,5^\circ$, b) $\alpha=30^\circ$, c) $\alpha=40^\circ$)

Elde edilen dağılım şekillerini daha iyi anlamak ve yorumlamak için her iki kanat modelinin irtifa kaybı öncesi ve sonrası değerlerinin $22,5^\circ$, 30° ve 40° hücum açılarındaki basınç farkları ve hız vektörleri incelenmiştir. Şekil 10'da AR1 ve AR2 kanat modellerinin $22,5^\circ$, 30° ve 40° hücum açılarındaki basınç farkları gösterilmiştir. Verilen basınç farkı şekillerinde renk göstergesindeki koyu mavi en düşük basıncı, koyu kırmızı ise en yüksek basıncı temsil etmekte ve aradaki renkler ise kademeli olarak basınç değişimlerini göstermektedir. $22,5^\circ$ hücum açısında AR1 ve AR2 kanat modellerinin alt yüzeylerinde yüksek basıncı temsil eden kırmızı renk aralığı hâkim iken kanat üst yüzeylerinde basınç dağılımlarının farklı davranış gösterdiği görülmektedir. AR2 üst yüzeyinde koyu renge sahip basınç alanları kanadın %80'lik bir bölgesinde oluşurken, AR1 kanadında bu oran %45'dir. Kanat üst yüzeylerinde oluşan bu farklılık $22,5^\circ$ hücum açısında, AR2 kanadının C_L değerinin AR1 kanadına göre daha yüksek olmasına neden olmaktadır.

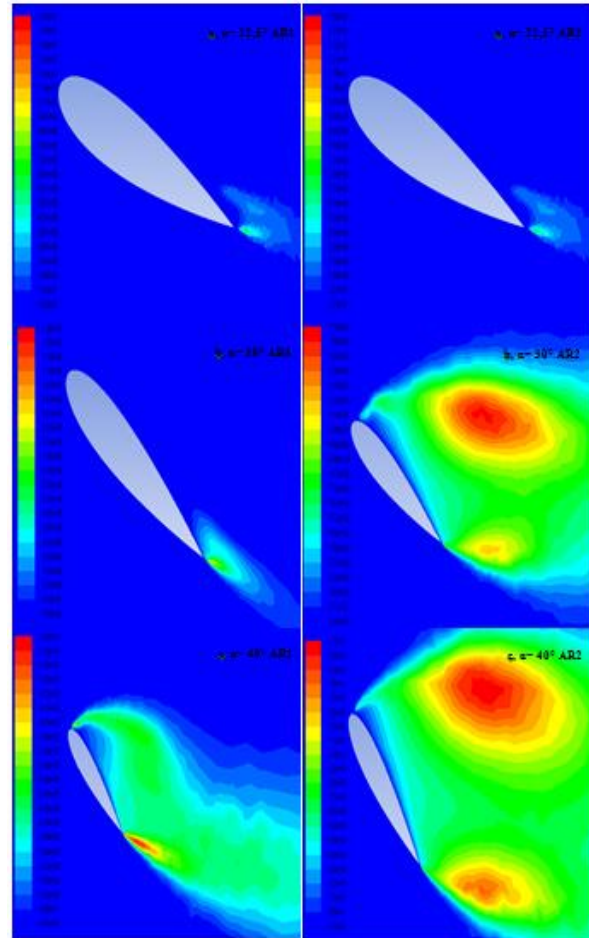


Şekil 11. AR1 ve AR2 kanat modelleri için hız vektörleri; a) $\alpha = 22,5^\circ$, b) $\alpha = 30^\circ$, c) $\alpha = 40^\circ$ (Velocity vectors for AR1 and AR2 aerofoil models; a) $\alpha = 22,5^\circ$, b) $\alpha = 30^\circ$, c) $\alpha = 40^\circ$)

30° hücum açısında her iki kanadın alt yüzeyinde, $22,5^\circ$ hücum açısında olduğu gibi yine birbirine benzer şekilde yüksek basınç alanları oluşmaktadır. AR1 kanadının üst

yüzeyinde turkuaz rengine sahip düşük basınç alanları oluşurken, AR2 kanadında ise daha yüksek basınç alanları olduğu görülmektedir. Kanat üst yüzeyinde oluşan bu durum Şekil 7'yi doğrular niteliktedir. Çünkü Şekil 7'de 30° hücum açısında AR1 kanadının sayısal analizinden elde edilen C_L değeri, AR2 kanadına göre daha yüksek bulunmuştur.

40° hücum açısında her iki kanadın alt ve üst yüzeylerinde basınç farklarının benzer olduğu görülmektedir. Ancak AR1 kanadının üst yüzeyinde %20'lik bir bölgede çok düşük alana sahip bölge, AR2 modelinde oluşmadığı için AR1'e ait C_L değerinin büyük olmasına sebep olmuştur.



Şekil 12. AR1 ve AR2 kanat modelleri için türbülans kinetik enerji değerleri; a) $\alpha = 22,5^\circ$, b) $\alpha = 30^\circ$, c) $\alpha = 40^\circ$ (Turbulence kinetic energy values for AR1 and AR2 aerofoil models; a) $\alpha = 22,5^\circ$, b) $\alpha = 30^\circ$, c) $\alpha = 40^\circ$)

Şekil 11'de AR1 ve AR2 kanat modellerinin $22,5^\circ$, 30° ve 40° hücum açılarında hız vektörleri verilmiştir. $22,5^\circ$ hücum açısında, AR1 kanadının üst yüzeyinin fırac kenarında sadece %10'luk bir akış ayrışması gerçekleşirken, AR2 kanadının üst yüzeyinde meydana gelen akış ayrışmasının %80 oranında olduğu görülmektedir. Bu durum AR2 kanadında irtifa kaybının gerçekleşmek üzere olduğunun ispatıdır. 30° hücum açısında AR1 kanadının %90'lık bir bölgesinde akış

ayrışması gerçekleşirken, AR2 kanadında ise akışın, kanadın hücum kenarından itibaren ayrıldığı görülmektedir. 30° hücum açısında gerçekleşen bu durum AR2 kanadında irtifa kaybının gerçekleştiğinin göstergesidir. 40° hücum açısında her iki kanat modelinde de irtifa kaybı gerçekleşmiştir. Ancak AR1 kanadında akış ayrışmasına bağlı olarak oluşan laminer ayrışma bölgeleri kanat yüzeyine yakın bir bölgede, AR2 kanadında laminer ayrışma bölgeleri kanat yüzeyinden uzak bir bölgede gerçekleşmektedir. Bu durum 40° hücum açısında elde edilen basınç farkları görüntüleri ile uyumludur. Çünkü AR1 kanadın üstünde oluşan düşük basınç alanı laminer ayrışma bölgelerinden kaynaklanmaktadır. Laminer akış bölgeleri, düşük basınç alanları oluşturmakta ve buna bağlı olarak C_L değerinin de büyük olmasına neden olmaktadır. Şekil 12’de AR1 ve AR2 kanat modellerinin 22,5°, 30° ve 40° hücum açılarındaki türbülans kinetik enerji değerleri gösterilmektedir. Kanat yüzeyinde LAB’ye bağlı olarak oluşan girdap bölgelerinde türbülans kinetik enerjinin yüksek olması gerekliliği literatürdeki çalışmalardan beklenmektedir. Yapılan sayısal çalışma sonucunda elde edilen Şekil 12 incelendiğinde, kanat yüzeyinde akış ayrışmalarının gerçekleştiği bölgelerde yüksek türbülans yoğunluğunun oluştuğu kanıtlanmıştır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada NACA-0018 kanat profiline sahip farklı açıklık oranlarındaki iki farklı modelin aerodinamik karakteristikleri sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir:

- Yapılan sayısal çalışma sonucunda AR1 ve AR2 kanat modellerinin irtifa kaybı açıları sırasıyla 32,5° ve 25° olarak bulunurken deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde ise sırasıyla 35° ve 30° olarak bulunmuştur.
- AR1 modeli için deneysel çalışma sonucu elde edilen C_L değeri, sayısal çalışma sonucu ulaşılan değerden %0,41 daha yüksek bulunmuştur. Benzer şekilde AR2 modelinin C_L değeri, deneysel çalışmada sayısal yöntemden %2,71 daha yüksek ölçülmüştür.
- AR1 modeli için deneysel çalışmada elde edilen C_D değeri, sayısal sonuca göre %6,35 ve AR2 modelinin deneysel çalışmasından elde edilen C_D değeri sayısal çalışmaya göre %5,16 kadar daha yüksek hesaplanmıştır.
- Aerodinamik verim açısından elde edilen sonuçlar incelendiğinde AR1 modeli için yapılan sayısal çalışma aynı kanat için yapılan deneysel çalışmadan %3,86 kadar daha iyi sonuç vermiştir.
- Her iki kanat modelinin sayısal çalışmaları kıyaslandığında AR1 kanadı için hesaplanan C_L ve C_D değerleri sırasıyla %9,15 ve %8,40 oranında AR2 kanadı için elde edilen değerlerden daha yüksek değerlere ulaşmıştır. C_L/C_D açısından karşılaştırıldığında ise AR2 için hesaplanan değer

AR1’den %25,99 kadar daha yüksektir. Bunun nedeni C_D değerlerinin AR2 kanadı için düşük değerlere sahip olmasıdır.

- AR1 ve AR2 modellerinin deneysel çalışmaları kıyaslandığında, AR1 için hesaplanan C_L ve C_D değerleri sırasıyla %7,07 ve %9,42 oranında AR2’den daha yüksek bulunmuştur. C_L/C_D açısından karşılaştırıldığında ise AR2 için hesaplanan değer AR1’den %15,27 kadar daha yüksektir.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

c	Kanat veter uzunluğu
C_L	Kaldırma katsayısı
C_D	Sürüklenme katsayısı
C_L/C_D	Aerodinamik verim
μ	Dinamik viskozite (kg/ms)
ρ	Havanın yoğunluğu (kg/m ³)
F_L	Kaldırma kuvveti (N)
F_D	Sürüklenme kuvveti (N)
L_C	Karakteristik uzunluk (m)
Re	Reynolds sayısı
W_R	Toplam belirsizlik
BDT	Bilgisayar Destekli Tasarım
CAD	Computer Aided Design
DETR	Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini
LAB	Laminer Ayrışma Bölgesi
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği
SST	Shear Stress Transport
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
DES	Detached Eddy Simulation

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, ANSYS Fluent™ programını kullanımına izin verdiği için Gazi Üniversitesine teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Čarija Z., Marušić E., Novak Z. and Fućak S., “Numerical analysis of aerodynamic characteristics of a bumped leading edge turbine blade”, *Engineering Review*, 34(2): 93-101, (2014).
- [2] Düz H. ve Yıldız S., “Numerical performance analyses of different aerofoils for use in wind turbines”, *International Journal of Renewable Energy Development*, 7(2): 151-157, (2018).
- [3] Erişen A. ve Bakırcı M., “NACA 0012 ve NACA 4412 kanat kesitlerinin yeniden tasarlanarak HAD ile analiz edilmesi”, *Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 1: 50-82, (2014).
- [4] Gugliya P. S., Jaiswal Y. R., Chhajed A. B., Jain S. V. and Thakare H. R., “CFD analysis of airfoil NACA0012”, *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*, 2(7): 1605-1609, (2015).

- [5] Patel K. S., Patel S. B., Patel U. B. and Ahuja A. P., "CFD analysis of an aerofoil", *International Journal of Engineering Research*, 3(3): 154-158, (2014).
- [6] Şahin İ. ve Acır A. "Numerical and experimental investigations of lift and drag performances of NACA 0015 wind turbine aerofoil", *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 3(1): 22-25, (2015).
- [7] Chen J., Wang Q., Zhang S., Eecen P. and Grasso F., "A new direct design method of wind turbine aerofoils and wind tunnel experiment", *Applied Mathematical Modelling*, 40(3): 2002-2014, (2016).
- [8] Maulana M. I., Qaedy T. M. A. and Nawawi M., "Design analysis of vertical wind turbine with aerofoil variation", *Proceeding of the 4th International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced materials (ICE-SEAM 2015)*, 1717: 1-6, (2016).
- [9] Saad M. M. M., Bin Mohd S., Zulkafli M. F. and Shibani W. M. E., "Numerical analysis for comparison of aerodynamic characteristics of six aerofoils", *AIP Conf. Proc.*, 1831(1): 20004, (2017).
- [10] Suvanjumrat C., "Comparison of turbulence models for flow past NACA0015 airfoil using OpenFOAM", *Engineering Journal*, 21(3), 207-221, (2017).
- [11] Chumbre V., Rushikesh T., Umatar S and Kerur S. M., "CFD analysis of aerofoil sections", *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(7): 349-353, (2018).
- [12] Tanürün H. E ve Acır A., "Modifiye edilmiş NACA-0015 kanat yapısında tüberkül etkisinin sayısal analizi", *Politeknik Dergisi*, 22(1): 185-195, (2019).
- [13] Xiao S. and Chen Z., "Investigation of flow over the aerofoil NACA-10-35 with various angle of attack" *2nd International Conference on Mechanical, Material and Aerospace Engineering*, 1-10, Wuhan, China, (2018).
- [14] Ameer H. and Boukhadia K., "Numerical study of air flow over a NACA 0015 wind turbine aerofoil", *Preprints Journal*, (2018), (Baskıda).
- [15] Rao K. S., Chakravarthy M. A., Babu G. S. and Rajesh M., "Modelling and simulation of aerofoil element", *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(2): 2056-2059, (2018).
- [16] Anyoji M., Wakui S., Hamada D. and Aono, H., "Experimental study of owl-like aerofoil aerodynamics at low Reynolds numbers", *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, 6(3): 185-197, (2018).
- [17] Rogowski K., Hansen M. O. L., Hansen R., Piechna J. and Lichota P., "Detached eddy simulation model for the DU-91-W2-250 aerofoil", *Journal of Physics: Conference Series*, 1037(2): 1-9, (2018).
- [18] Gore K., Gote A., Govale A., Kanawade A. and Humane S., "Aerodynamic analysis of aircraft wings using CFD", *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(6): 639-644, (2018).
- [19] Bedon G., Paulsen U. S., Madsen H. A., Belloni F., Castelli M. R. and Benini E., "Computational assessment of the DeepWind aerodynamic performance with different blade and airfoil configurations", *Applied Energy*, 185, 1100-1108, (2017).
- [20] Hassan G. E., Hassan A. and Youssef M. E., "Numerical investigation of medium range Re number aerodynamics characteristics for NACA0018 airfoil", *CFD Letters*, 6(4): 175-187, (2014).
- [21] Rogowski K., Hansen M. O. L. and Maronski R., "Steady and unsteady analysis of NACA 0018 airfoil in vertical-axis wind turbine", *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 56, 203-212, (2018).
- [22] Shukla V. and Kaviti A. K., "Performance evaluation of profile modifications on straight-bladed vertical axis wind turbine by energy and Spalart Allmaras models", *Energy*, 126, 766-795, (2017).
- [23] Sadikin A., Yunus N. A. M., Hamid S. A. A., Ismail A. E., Salleh S., Ahmad S., Rahman M. N. A., Mahzan S. and Ayop S. S., "A comparative study of turbulence models on aerodynamics characteristics of a NACA0012 airfoil", *International Journal of Integrated Engineering*, 10(1): 134-137, (2018).
- [24] Islam Md. S., Hakim S. M., Ali M. and Islam Md. Q., "Numerical investigation on boundary layer control through moving surface in NACA 0012 airfoil", 7th BSME International Conference on Thermal Engineering AIP Conference Proceedings, 1851, 20111-20117, (2017).
- [25] Ansys Fluent 2012. Shear-Stress Transport (SST) k- ω model, Ansys Fluent 12 theory guide. <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node67.htm>.
- [26] Bakırcı M., Ceylan H. ve Yılmaz S., "NACA 23012 ve NREL S 809 kanat kesitlerinin HAD ile analizi", *Electronic Journal of Vocational Colleges*, 5(1): 52-61, (2015).
- [27] Anderson J. D., "Computational Fluid Dynamics; The Basics with Applications", *McGraw-Hill*, USA, (1995).
- [28] https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/flu_ug/flu_ug_mesh_quality.html.
- [29] Ariff M., Salim S. M. and Chea S. C., "Wall y^+ approach for dealing with turbulent flow over a surface mounted cube: Part 1-low Reynolds number", *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, Australia, 1-6, (2009).
- [30] Özmen Y. ve Baydar E., "15° eğimli beşik çatıya sahip iki bina modeli üzerindeki basınç dağılımlarına blokaj etkisi", *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi A-Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik*, 17(1): 65-77, (2015).
- [31] Hanumanthu and Rao S. V. K., "CFD study of solids wind tunnel wall effects on wings characteristics", *Indian Journal of Science and Technology*, 9(45): 1-5, (2016).
- [32] Medici D., Ivanell S., Dahlberg A. J. and Alfredsson H. P., "The upstream flow a wind turbine: blockage effect", *Wind Energy*, 14(5), 691-697, (2011).
- [33] Gunt 2018. HM-170 open cycle wind turbine test equipment data sheet. https://www.gunt.de/images/datasheet/769/HM-170-Open-wind-tunnel-gunt-769-pdf_1_en-GB.pdf.
- [34] Kline S. J. and McClintock F. A., "Describing uncertainties in single sample experiments", *Mechanical Engineering*, 75, 3-8, (1953).
- [35] Boutilier M. S. H., "Experimental investigation of transition over a NACA 0018 airfoil at a low Reynolds number", Yüksek Lisans Tezi, University of Waterloo, 2011.