



Aerodynamic analysis of airfoil with open source software

Mehmet Fatih Ekinci*^{ID}, Baha Zafer^{ID}

Istanbul Technical University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Aeronautical Engineering, 34467, Istanbul, Türkiye

Highlights:

- Calculation of thermal Aerodynamic analysis using the open source CFD software OpenFOAM
- Comparative evaluation of two different turbulence models
- Utilization of a hybrid solver integrated into OpenFOAM

Keywords:

- OpenFOAM
- RANS
- Aerodynamics
- Wind Turbine Airfoil
- Hybrid Solvers

Article Info:

Research Article
Received: 08.08.2022
Accepted: 23.11.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1156600

Correspondence:

Author: Baha Zafer
e-mail: zaferba@itu.edu.tr
phone: +90 538 054 9373

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the aerodynamic analysis of the NREL S826 wind turbine blade profile, which has been a frequent topic of research in recent years, was conducted using the open-source computational fluid dynamics (CFD) software OpenFOAM. For the solution of the two-dimensional flow field, the $k-\omega$ SST and Langtry-Menter Transition SST ($\gamma - \tilde{R}e_{\theta t}$) turbulence models were employed, while the Transition SST ($\gamma - \tilde{R}e_{\theta t}$) model was used for three-dimensional analyses. All simulations were time-dependent and solved using pimpleCentralFoam, a pressure-based, semi-implicit hybrid solver. The obtained data were compared with experimental results and examined in detail. The findings revealed that the hybrid solver used, combined with the Transition SST ($\gamma - \tilde{R}e_{\theta t}$) turbulence model-frequently preferred for modeling transition to turbulence-worked efficiently together and produced results closely aligned with experimental data. The results, presented in Figure A, demonstrate the model's capability to accurately predict key aerodynamic parameters, including lift and drag coefficients, across a wide range of angles of attack. The figure also highlights the model's effectiveness in capturing the flow characteristics during pre-stall, stall, and post-stall conditions.

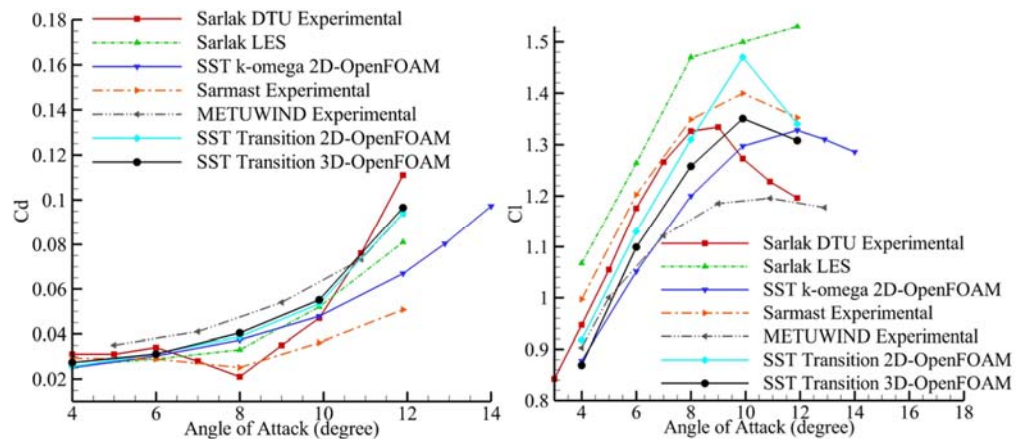


Figure A. C_D and C_L coefficients for the SST Transition turbulence model using OpenFOAM ($\alpha = 8^\circ$)

Purpose: The purpose of this study is to evaluate the accuracy and effectiveness of the Transition SST ($\gamma - \tilde{R}e_{\theta t}$) turbulence model and the hybrid solver pimpleCentralFoam in predicting the aerodynamic performance of the NREL S826 airfoil under various flow conditions.

Theory and Methods: The aerodynamic performance of the NREL S826 airfoil was analyzed using time-dependent (transient) simulations in OpenFOAM, employing the Transition SST ($\gamma - \tilde{R}e_{\theta t}$) turbulence model and the hybrid solver pimpleCentralFoam. Numerical predictions were performed for two- and three-dimensional flow fields to capture detailed flow characteristics.

Results: The results demonstrated that the numerical method accurately predicted the aerodynamic performance of the NREL S826 airfoil, showing strong agreement with experimental data. Additionally, the method effectively captured flow characteristics during critical phases such as pre-stall, stall, and post-stall.

Conclusion: The study concluded that the numerical approach employed provided reliable and accurate predictions of the aerodynamic performance and flow characteristics of the NREL S826 airfoil across various flow conditions.



Zamana bağlı akış alanının açık kaynak programlar ile aerodinamik incelemesi

Mehmet Fatih Ekinci^{ID}, Baha Zafer*^{ID}

İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, 34467, İstanbul, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Açık kaynak kodlu HAD yazılımı OpenFOAM ile analizlerin gerçekleştirilmesi
- İki farklı türbülans modeli karşılaştırmalı olarak incelenmesi
- OpenFOAM içerisine eklenen hibrit çözücü kullanılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 08.08.2022
Kabul: 23.11.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1156600

Anahtar Kelimeler:

OpenFOAM,
RANS,
Aerodinamik,
Rüzgar Türbini Kanat Profili,
Hibrit Çözücüler

ÖZ

Bu çalışmada, son yıllarda sıklıkla araştırma konusu olmuş rüzgar türbini kanat profili NREL S826' nın açık kaynak kodlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı OpenFOAM ile aerodinamik incelemesi yapılmıştır. İki boyutlu akış alanının çözümünde $k-\omega$ SST ve Langtry-Menter' in Transition SST ($\gamma - \tilde{R}e_{\theta t}$) modeli kullanılırken, üç boyutlu analizlerde Transition SST ($\gamma - \tilde{R}e_{\theta t}$) türbülans modeli kullanılmıştır. Yapılan bütün analizler zamana bağlı olup basınca dayalı yarı kapalı hibrit bir çözücü olan *pimpleCentralFoam* ile çözülmüştür. Elde edilen veriler deneysel çalışmalarla karşılaştırılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, kullanılan hibrit çözücünün ve türbülansa geçişi modelleme amacıyla sıklıkla tercih edilen Transition SST ($\gamma - \tilde{R}e_{\theta t}$) türbülans modelinin birbiriyile verimli çalışarak, deneysel değerlerle yakınlık içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte bu çalışmada kullanılan sayısal yöntem literatürde yer alan diğer çalışmalardan farklı bir çözüm sunarak, stol öncesi, stol ve stol sonrası karakterini tahmin etme konusunda oldukça başarılı olmuştur.

Aerodynamic analysis of airfoil with open source software

HIGHLIGHTS

- Aerodynamic analysis using the open source CFD software OpenFOAM
- Comparative evaluation of two different turbulence models
- Utilization of a hybrid solver integrated into OpenFOAM

Article Info

Research Article
Received: 08.08.2022
Accepted: 23.11.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1156600

Keywords:

OpenFOAM,
RANS,
Aerodynamics,
Wind Turbine Airfoil,
Hybrid Solvers

ABSTRACT

In this study, the aerodynamic analysis of the NREL S826 wind turbine blade profile, which has been a frequent topic of research in recent years, was conducted using the open-source computational fluid dynamics (CFD) software OpenFOAM. For the solution of the two-dimensional flow field, the $k-\omega$ SST and Langtry-Menter Transition SST ($\gamma - \tilde{R}e_{\theta t}$) turbulence models were employed, while the Transition SST ($\gamma - \tilde{R}e_{\theta t}$) model was used for three-dimensional analyses. All simulations were time-dependent and solved using *pimpleCentralFoam*, a pressure-based, semi-implicit hybrid solver. The obtained data were compared with experimental results and examined in detail. The findings revealed that the hybrid solver used, combined with the Transition SST ($\gamma - \tilde{R}e_{\theta t}$) turbulence model—frequently preferred for modeling transition to turbulence—worked efficiently together and produced results closely aligned with experimental data. Additionally, the numerical method employed in this study offered a unique approach compared to other studies in the literature, demonstrating significant success in predicting the characteristics of pre-stall, stall, and post-stall conditions.

1. Giriş (Introduction)

Enerji, sosyoekonomik gelişmenin ve ekonomik büyümenin en önemli bileşenidir. Atmosferdeki sera gazlarının seviyesindeki hızlı artış, fosil yakıtların maliyetlerinin kademeli olarak artması ve havzaların ktlığı, yenilenebilir enerji arayışı bilincini oluşturan dünyadaki en önemli sorunlardır [1]. Rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasına yardımcı olabilir [2]. Rüzgâr enerjisi çevre dostu enerji kaynağıdır ve son yıllarda giderek daha önemli hale gelmiştir [3]. Rüzgâr türbini aerodinamiği, rüzgâr enerjisi için özellikle zorlu ve önemli bir araştırma alanı olmaktadır [4]. Rüzgâr türbini rotorunun verimliliği temel olarak, yeterli torku üretmek ve taşımayı artırmak için üst yüzeydeki basıncı azaltma gerekliliğidir ve bu da kanat profili geometrisi ile sağlanır [5]. Bu nedenle, bir kanat profilinin etkinliğini ölçme konusunda uygun bir parametre, onun taşıma-sürüklenme katsayısı oranı (C_l / C_d)'dır; bu miktarın maksimum değeri, kanat profili etkinliğinin iyi bir göstergesidir [6]. Literatürde, düşük ve orta Reynolds sayılarındaki kanat profilleri üzerinde yapılan çalışmalarda, özellikle geçiş rejimlerinin etkisi büyük önem taşımaktadır. Örneğin, hoparlör tipi sentetik jet eyleyicisinin (SJE) aerodinamik performansı üzerinde yapılan sayısal analizlerde, kanat profilinin aerodinamik özelliklerini iyileştirmek için farklı frekans ve jet orifis çaplarının etkileri araştırılmıştır. Çalışma, SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılarak yapılan RANS ve URANS çözümleriyle, düşük ve orta Reynolds sayılarında taşıma katsayısının ve taşıma-sürüklenme katsayısı oranının iyileştirilmesini hedeflemiştir. Bu yöntem, benzer aerodinamik performans iyileştirmelerini inceleyen çalışmalarla paralel olarak kanat profilinin aerodinamik verimliliğini artırmak için etkili bir yaklaşım sunmaktadır. [7]. Benzer şekilde, NACA 4412 kanat profili, türev profilleriyle beraber aerodinamik performansı, hücum açılarında yapılan değişikliklerle optimize edilerek, daha yüksek verim için çeşitli açılar için en uygun olan profil belirlenmiştir. [8]. Bir diğer çalışmada ise kavite akışları üzerine yapılan araştırmalar, aeroakustik gürültü ve aerodinamik performans üzerinde önemli bulgular sunmuştur ve bunun yanında zamana bağlı akışın çözümünde farklı türbülans modellerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. [9]. Ayrıca, Ahmed cismi üzerinde yapılan çalışmalarda, yan ve önden rüzgâr şartlarının aerodinamik etkileri, farklı türbülans modelleriyle analiz edilmiştir [10].

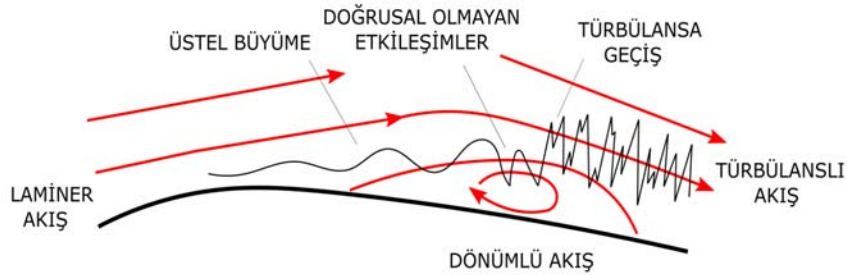
Yatay eksenli rüzgâr türbinleri için özel olarak tasarlanmış NREL (National Renewable Energy Laboratory) kanat profilleri kullanılarak, kanat profili kamburluk ve diğer geometriye bağlı etkilerinden kaynaklanan yıllık enerji üretim kaybı, daha önce kullanılan kanat profillerine göre yarıya indirilebilir [11]. Bu çalışmanın da konusu olan NREL S826 kanat profili de bu amaçla üretilmiş kanat profillerinden biridir [12]. Literatürde NREL S826 kanat profili ile ilgili düşük veya orta Reynolds sayılarını kapsayan deneysel ve sayısal birçok çalışma mevcuttur. Düşük Reynolds sayılarında kanat profili üzerinde meydana gelen laminer bölgeden

türbülanslı bölgeye geçişin (Şekil 1) anlaşılması, araştırmacılar açısından büyük önem taşımaktadır. Sarlak vd. [13] ve Sarmast [14] Danimarka Teknik Üniversitesi'nde (DTU) NREL S826 için 1×10^5 Reynolds sayısında iki farklı deneysel çalışma yapmışlardır. Ayrıca Sarlak vd. [13]'nin çalışmalarında, Büyük Girdap Benzetimi (LES) türbülans modelinin kullanıldığı sayısal çalışmada, DTU'nun kendi geliştirdiği *EllipSys3D* çözücüsünü kullanmıştır. Bir diğer deneysel çalışma da Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ)'de Ostovan vd. [15] tarafından yapılmıştır. ODTÜ'nün bu çalışmasında veter uzunluğu DTU'dan farklı olarak 0.2 m' iken iki farklı Reynolds sayısı ile ($Re=1 \times 10^5$ ve $Re=1,45 \times 10^5$) çalışılmıştır. Ayrıca Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi (NTNU)'dan Bartl vd. [16] düşük ila orta Reynolds sayılarında ($Re=0,5 \times 10^5$ - $Re=6 \times 10^5$) NREL S826 kanat profilinin üzerinde hem deneysel ve hem de sayısal çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yalçın vd. [17] aynı kanat profili üzerinde, zamana bağlı türbülanslı akış problemlerinde son zamanlarda yaygın bir yaklaşım olan DDES ve SLADDES türbülans modellerini detaylı bir şekilde incelemiştir. Çakmakçoğlu vd. [18] ticari *CFD++* Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı ile $k-\omega$ SST Transition ($\gamma - \tilde{Re}_{\theta t}$) ve Realizable $k-\epsilon$ gibi farklı türbülans modellerinin de bulunduğu iki boyutlu ve üç boyutlu sayısal çalışma yapmışlardır.

Geçiş bölgesinin tahmini ile ilgili literatürde yer alan çalışmalardan biri Liu vd. [19] tarafından yapılmıştır. Çalışmada iki farklı kanat profili NACA 0012 ve NACA 4415 kullanılmıştır ve laminerden türbülansa geçiş modellemeye sıklıkla tercih edilen 4 farklı türbülans modeli (LowRe, $\gamma - \tilde{Re}_{\theta t}$, γ , $k-kl - \omega$) detaylıca karşılaştırılmıştır (Şekil 1). Sayısal incelemeler neticesinde $\gamma - \tilde{Re}_{\theta t}$ modelinin, geçiş modeli formülasyonunda farklı yollar izlemesi dolayısıyla diğer modellere göre daha iyi tahmin yeteneğine sahip olduğu görülmektedir. Yakın zamanda yayımlanan diğer bir makale ise rüzgâr türbinlerinde önemli bir yer tutan, doğrusal olmayan ve kararsız bir yapıya sahip dinamik stol (stall) fenomeninin zamana bağlı akışının RANS modelleri kullanılarak OpenFOAM ile incelemesi üzerinedir [20].

Bu makale, temel olarak düşük Reynolds sayılarında çalışan küçük rüzgâr türbinleri gibi geçiş rejiminin önemli olduğu problemlerde açık kaynak kodlu bir programda hibrit (*pimpleCentralFoam*) bir çözücü ile modellemeyi kapsamaktadır. Bu çalışma kapsamında rüzgâr türbinlerinde kullanılan ve üzerinde birçok araştırma yapılmış bir kanat profili olan NREL S826 kanat kesitinin aerodinamik incelemesi, açık kaynak kodlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı OpenFOAM kullanılarak yapılmıştır.

Çalışmada iki farklı türbülans modeli $k-\omega$ SST ve Langtry-Menter' in Transition SST ($\gamma - \tilde{Re}_{\theta t}$) türbülans modelleri OpenFOAM kurulumunda bulunan standart çözücüler yerine hibrit çözücü kullanılarak farklı hücum açılarında sayısal olarak analiz edilmiş ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. Zaman ortalamalı akım çizgilerinin bir çizimiyle laminer ayrılma kabarcığında kararsızlık ve geçiş bölgesi (Instability and transition region in a laminar separation bubble (LSB) with a plot of time-averaged streamlines)

PimpleCentralFoam çözücüsü, düşük Reynolds sayılarında hızlı yakınsama kriterleri elde etmede diğer mevcut OpenFOAM çözücülerine göre avantaj sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem, literatürde sıklıkla kullanılmamaktadır; ancak, farklı koşullara uygulanma kolaylığı ve tutarlı sonuçlar sağlaması bakımından bu çalışma için uygun görülmüştür. Yapılan sayısal hesaplamalarda, açık kaynak kodlu çözücülerin zamana bağlı akış problemlerinde laminardan türbülansa geçişi modelleme hususunda deneysel verilerle uyuşan ve aynı zamanda güvenilir sonuçlar veren bir metodolojinin kurulmasına odaklanılmıştır.

2. Sayısal Yaklaşım (Numerical Method)

Bu çalışmada iki boyutlu NREL S826 kanat profili üzerinde 100.000 Reynolds sayısında $k-\omega$ SST ve Transition SST türbülans modelleri karşılaştırılmıştır. Bunlara ek olarak Transition SST modelinin üç boyutlu analizleri de gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde 4° ila 12° aralığında beş farklı hücum açısı incelenmiştir. Zamana bağlı, viskoz ve sıkıştırılabilir akışın bünye denklemleri hibrit bir çözücü olan *pimpleCentralFoam* ile ayrılaştırılarak çözülmüştür. Bu çözücü OpenFOAM kütüphanesinde hazır bulunmayıp sonradan program içerisine dahil edilmiştir. Bütün analizlerde kullanılan *pimpleCentralFoam* çözücüsü UniCFD Laboratuvarından (UniCFD Web-laboratory) Kraposhin vd. [21] tarafından geliştirilmiş ve kullanıma sunulmuştur. Kurganov ve Tadmor [22]'un central-upwind şemalarına dayanan ve sıkıştırılabilir akışlar için kullanılan basınca dayalı yarı kapalı (pressure-based semi implicit) hibrit bir çözücüdür. Yüksek hızlı akışlarda, Kurganov-Tadmor [22] ve Kurganov-Noelle-Petrova [23] (KT/KNP) şemalarına benzer bir davranış gösterir ve düşük Mach sayılarına sahip akışlar için, PISO/SIMPLE (PIMPLE) algoritmasına dayalı çözücüler gibi davranır [21]. Bu ikili yapısı nedeniyle bu çalışma kapsamında zamana bağlı akış alanı çözümlerinde kullanılmıştır.

2.1. Korunum Denklemleri (Conservation Equations)

Sıkıştırılabilir ve viskoz Newton tipi bir akışkanın akışı, kütle, momentum ve enerji için korunum denklemleri Eş. 1, Eş. 2, Eş. 3 kullanılarak tanımlanabilir [21].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{U}\rho) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{U} \otimes \rho \bar{U}) = \nabla \cdot \hat{\Pi} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{U}\rho e) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\hat{\Pi} \cdot \bar{U}) \quad (3)$$

Burada t zaman, ρ yoğunluk, $v = 1/\rho$ özgül hacim, \bar{U} hız için vektör alanı ve T sıcaklıktır. Gerilim tensörü $\hat{\Pi}$ (Eş. 4), viskoz stres tensörü $\hat{\sigma}$ (Eş. 5), basınç alanı p ve dinamik viskozite μ kullanılarak hesaplanır.

$$\hat{\Pi} = -p\hat{I} + \hat{\sigma} \quad (4)$$

$$\hat{\sigma} = -\hat{I}^2 \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mu \left(\nabla \bar{U} + (\nabla \bar{U})^T \right) \quad (5)$$

Toplam enerji e , $e = u(p, T) + \frac{1}{2} \bar{U} \cdot \bar{U}$ olarak tanımlanır ve burada u iç enerjidir. Genel bir hal denklemini için, ısı iletkenlik katsayısı λ ve dinamik viskozite μ Eş. 6'da olduğu gibi hesaplanabilir.

$$p = p(\rho, T), \lambda = \lambda(\rho, T) \text{ ve } \mu = \mu(\rho, T) \quad (6)$$

Sayısal olarak kararlılığı sağlamak amacıyla enerji denklemini toplam entalpi cinsinden Eş. 7'de gösterildiği şekilde yazmak daha uygundur. 1302

$$h_{\text{toplama}} = h + \frac{1}{2} \bar{U} \cdot \bar{U} = u + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} \bar{U} \cdot \bar{U} \quad (7)$$

Toplam enerji e yerine yukarıda verilen ifade yazılırsa Eş. 8 elde edilir.

$$\frac{\partial \rho h_{\text{toplama}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{U} \rho h_{\text{toplama}}) - \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\hat{\sigma} \cdot \bar{U}) \quad (8)$$

2.2. Menter' in SST $k-\omega$ Türbülans modeli (The Menter Shear Stress Transport Turbulence Model)

Menter' in SST $k-\omega$ Türbülans modeli, türbülans kinetik enerji k (Eş. 9) ve spesifik yayılım oranı ω (Eş. 10) için $k-\omega$ ve $k-\epsilon$ modellerinin karışımından oluşan iki denklemlilik bir modeldir. Yakın duvar bölgesindeki $k-\omega$ modelinin doğru formülasyonunu, uzak alandaki $k-\epsilon$ modelinin serbest akım bağımsızlığı ile harmanlar [24]. Bu model ile bir harmanlama fonksiyonu geliştirildi ve bu harmanlama fonksiyonu F_1 , iç bölgelerde 1 eşit olup sınır tabakanın kenarına yakın bölgede sıfıra yakın değerler almaktadır.

Türbülans Kinetik Enerjisi k :

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j k)}{\partial x_j} = \bar{P} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (9)$$

Spesifik yayılım oranı ω :

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j \omega)}{\partial x_j} &= a \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \\ &+ 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (10)$$

F_1 ve F_2 harmanlama (blending) fonksiyonu aşağıdaki denklemlerden (Eş. 11, Eş. 12, Eş. 14) hesaplanabilir.

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500g}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right]^4 \right\} \quad (11)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right) \quad (12)$$

μ_t türbülans viskozitesi (Eş. 13) Ω girdaphlık büyüklüğü ve y en yakın duvara olan mesafedir.

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} \quad (13)$$

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500g}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (14)$$

$$P_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \rightarrow \bar{P} = \min(P_k, 10\beta^* \rho k \omega) \quad (15)$$

Model sabitleri şunlardır: $\beta^* = 0,09$, $a_1 = 0,31$, $\beta_1 = 3/40$, $\sigma_{k1} = 0,85$, $\sigma_{\omega 1} = 0,5$, $\beta_2 = 0,0828$, $\sigma_{k2} = 0,85$, $\sigma_{\omega 2} = 0,856$

2.3. Langtry-Menter 4-Denklemli SST Geçiş Modeli ($\gamma - \tilde{R}e_{\theta t}$) (The Langtry-Menter 4-equation Transition SST Model)

Bu model Langtry ve Menter [25] tarafından geliştirilmiş, aralıklılık (intermittency (γ)) ve geçiş (transition) başlangıç kriteri $Re_{\theta t}$ olmak üzere iki ek taşıma denkleminin dayanmaktadır. Model, geçiş sürecinin fiziğini doğrudan modellemeye çalışmaz, ancak deneysel korelasyonlara dayalı olması onu geçiş için uygun kılmaktadır. Aralıklılık faktörü 0 ile 1 arasında değişmektedir; 0 laminar bölgeyi, 1 ise türbülanslı bölgeyi simgelemektedir. Geçiş bölgesi ise 0 ile 1 arasında değerler ile gösterilir.

Aralıklılık (intermittency (γ)) için taşınım denklemi Eş. 16'den hesaplanabilir.

$$\frac{\partial(\rho\gamma)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \gamma)}{\partial x_j} = P_\gamma - E_\gamma + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_f} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right] \quad (16)$$

γ denklemi için kaynak terimler P ve E Eş. 17, Eş. 18 ve Eş. 19'daki gibi tanımlanır.

$$P_\gamma = F_{length} c_{a1} \rho S [\gamma F_{onset}]^{0.5} (1 - c_{e1} \gamma) \quad (17)$$

$$E_\gamma = c_{a2} \rho \Omega \gamma F_{turb} (c_{e2} \gamma - 1) \quad (18)$$

$$F_{onset1} = Re_v / 2.193 Re_{\theta c} \quad (19)$$

F_{length} geçiş bölgesinin geçiş uzunluğunu kontrol eden deneysel bir bağıntıdır. $Re_{\theta c}$ sınır tabakada aralıklılığın ilk olarak artmaya başladığı kritik Reynolds sayısındır.

Geçiş momentum kalınlığı Reynolds Sayısı ($Re_{\theta t}$) için taşınım denklemi Eş. 20'de ifade edilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho \bar{R}e_{\theta t})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \bar{R}e_{\theta t})}{\partial x_j} = P_{\theta t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_{\theta t} (\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{R}e_{\theta t}}{\partial x_j} \right] \quad (20)$$

$\bar{R}e_{\theta t}$ için kaynak terimleri Eş. 21 ve Eş. 22' de verilmiştir.

$$P_{\theta t} = c_{\theta t} \frac{\rho}{t} (Re_{\theta t} - \bar{R}e_{\theta t}) (1 - F_{\theta t}) \quad (21)$$

Modelin kapanması için doğru bir şekilde sağlanması gereken üç ampirik korelasyon bulunmaktadır.

$$Re_{\theta t} = f(TI, \lambda); F_{length} = f(Re_{\theta t}); Re_{\theta c} = f(Re_{\theta t}) \quad (22)$$

2.4. Hesaplama Alanı (Computational Domain)

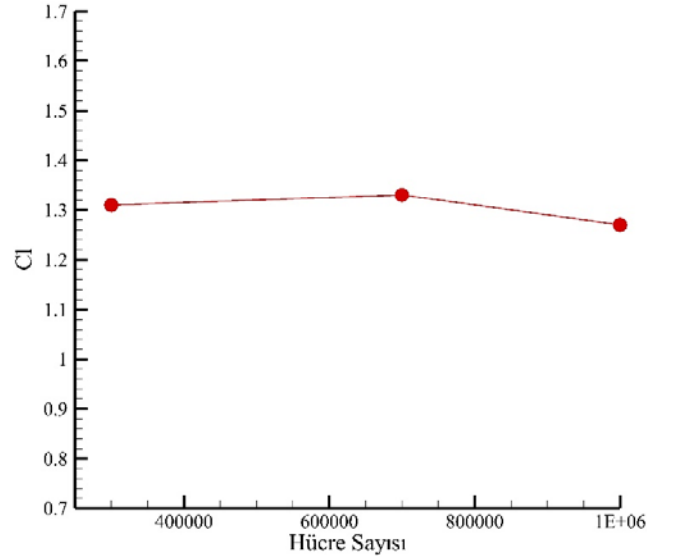
Bu çalışmada C-Tip hesaplama alanı kullanılmıştır. İki boyutlu ağ yapısının C tarafına ait yarıçapı veter uzunluğunun 10 katı olan yarım daire ve firar kenarı arka tarafından çıkış sınırına kadar ise 9 katı olacak şekilde yapılandırılmış dikdörtgen ağ yapısından oluşmaktadır (Şekil 4). Kanat profili etrafına toplamda 500 nokta yerleştirildi ve bunun yanında hücum kenarı ile firar kenarına aerodinamik kuvvetlerin daha doğru sonuç vermesi amacıyla oldukça sık bir ağ yapısı uygulandı. Sınır tabaka kalınlığı boyunca 50 nokta bulunmaktadır ve ilk hücre uzunluğu $y^+ < 1$ olacak şekilde ayarlanmıştır. Uzak alanda ise hücrelerin en boy oranı (Aspect Ratio) oldukça düşük ve sabit bir değerde (uniform) tutuldu. Maksimum ve ortalama çarpıklık (Skewness) değerleri ile birlikte bazı ağ yapısı metriklerine ait değerler Tablo 1'de verilmiştir. Mesh metriklerine bakıldığında çarpıklık ve non-orthogonality değerleri istenilen aralıklardadır. Çarpıklık 0 ve 1 aralığında değerler almaktadır. Bu değerler 0'a yakın değerleri ağ yapısının kalitesinin iyi olduğunu göstermektedir. İki hücre arasında bulunan merkez vektörü ve birim normal vektörü arasındaki ortogonalite açısının (non-orthogonality) ise sayısal analizlerin doğruluğu amacıyla 70° 'den küçük değerlerde olması istenmektedir.

Hücre sayısı belirlenirken 2 boyutta 3 farklı ağ yapısı oluşturularak ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Hücre sayısı artırılarak sırasıyla 300.000, 700.000 ve 1.000.000 sayıları üzerinde inceleme yapılmıştır (Şekil 2). Sarmast [14] deneysel sonuçlarının 8° hücum açısı için karşılaştırma yapılmıştır. Hata oranı 300.000 hücre için %3.1568, 700.000 hücre için %1.5346 ve 1.000.000 hücre için ise %5.1286 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak ağ sayısı artırmanın 300.000 hücre sayısından sonra aerodinamik katsayılarla büyük bir

değişikliğe sebep olmadığı ve sonuçları iyileştirmedeği görülmüştür. Bu sebeple sayısal analizlerde hesaplama maliyetleri ve ağdan bağımsızlık sonuçları göz önüne alındığında 300.000 hücre sayısında çalışılmasına karar verilmiştir

Tablo 1. Ağ yapısına ait bazı kalite özellikleri (Mesh quality)

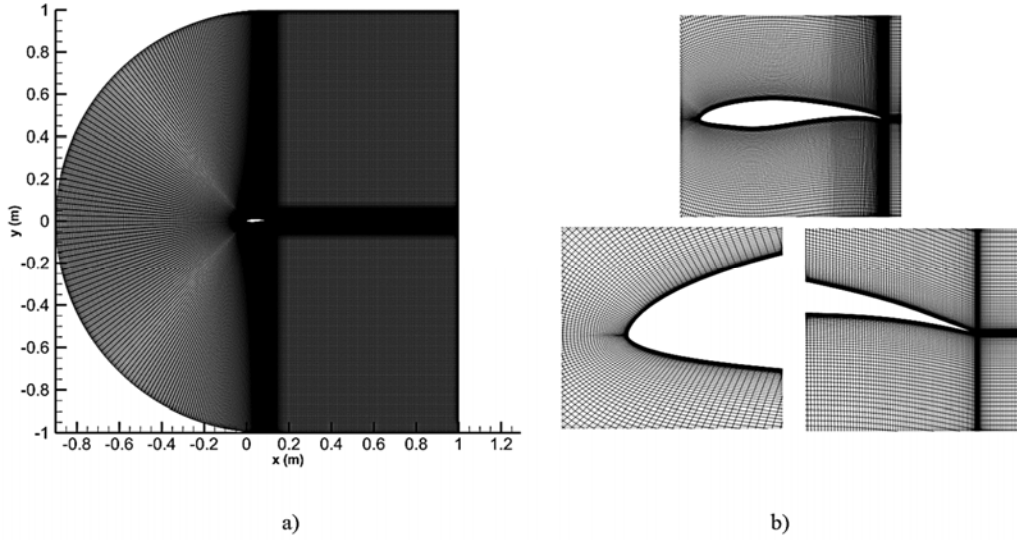
Ağ Yapısı Metrikleri	
Maksimum Çarpıklık (Maximum Skewness)	0,411
Ortalama Çarpıklık (Average Skewness)	0,0364
Ortalama En Boy Oranı (Average Aspect Ratio)	31,068
Maksimum Non-orthogonality	36,1197
Ortalama Non-orthogonality	6,09158



Şekil 2. Ağdan bağımsızlık çalışması, $\alpha = 8^\circ$ için taşıma katsayısının hücre sayısı ile değişimi (Mesh independence study, variation of lift coefficient with number of cell for $\alpha = 8^\circ$)

Ağ yapısı 2 boyutta toplamda 302.000 hücreden oluşmaktadır (Şekil 3). Üç boyutlu çalışmada ise kanat açıklığı veter uzunluğunun %10 ($s/c=0,1$)' u kadarlık bir uzunluktadır ve z yönünde 8 noktada ekstrüzyon edilip toplamda 2.416.000 hücreden meydana gelmektedir. Gerekli hücum açıları, kanat profilinin açısı değiştirilmeden serbest akım hızının geliş yönü değiştirilerek sağlanmıştır. Türbülans yoğunluğu (TI) deneysel çalışmalarda verildiği gibi (Tablo 2) % 0,2 alınmıştır. Veter uzunluğu (c) Sarlak vd. [13]'de yer aldığı gibi 0,1 m' dir. Bunlara ek olarak üç boyutlu SST Transition çalışmasında kanat açıklığı, hesaplama yükünü azaltmak amacıyla deneylerden farklı olarak veter uzunluğunun %10'u olacak biçimde seçilmiştir. Bir diğer önemli parametre ise CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) veya diğer adıyla Courant sayısı olmuştur. Bu parametre hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde sonuçların gerçeğe daha yakın olması açısından önemli bir yer tutmaktadır. Courant sayısı, serbest akım hızı ile zaman adımının çarpımının hesaplama alanı içerisinde yer alan en küçük hücreye bölünmesi ile elde edilen bir orandır [26]. Bu çalışmada zaman adımı yaklaşık 2×10^{-7} olarak çözdürülmüştür ve böylelikle Courant sayısı 1'den küçük tutulmuştur

Hesaplama alanı giriş (Inlet), çıkış (Outlet) ve airfoil (kanat profili)' den oluşmaktadır. Sınır koşullarının uygulanışı Şekil 4'te verilmiştir. Akış alanının C tarafı ve altı hız girişi, üstü ile arkası basınç çıkışı ve yan yüzler ise simetri düzleminde oluşmaktadır. Kanat üzerinde ise duvar sınır koşulu uygulanmıştır.



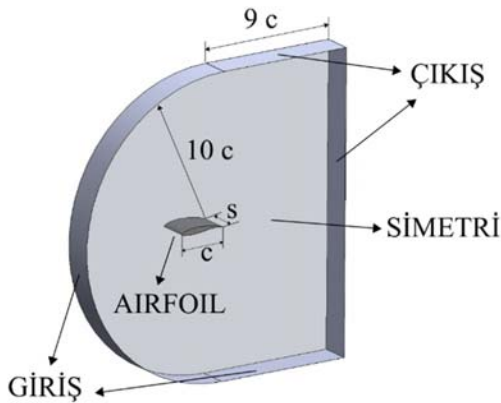
Şekil 3. Ağ yapısı a) C - Tip hesaplama alanı, b) Kanat profili etrafında oluşturulan ağ yapısı (Mesh a) C-Type computational domain, b) Mesh around the airfoil)

Tablo 2. Akış parametreleri ve geometri detayları (Flow parameters and geometry details)

	U_{∞} (m/s)	c (m)	s/c	T.I. (%)
Sarлак DTU Deneysel [9]	15	0,1	5	0,2
Sarлак LES [9]	15	0,1	0,12	0,2
Sarmast Deneysel [10]	15	0,1	5	0,2
METUWIND Deneysel [11]	20	0,2	5	0,2
SST k-omega 2D-OpenFOAM	15	0,1	-	0,2
SST Transition 2D-OpenFOAM	15	0,1	-	0,2
SST Transition 3D-OpenFOAM	15	0,1	0,1	0,2

Tablo 3. Sayısal analizlerin ayrıklaştırma şemaları (Discretization schemes of numerical analysis)

	Ayrıklaştırma Şeması
Zaman Adımı (<i>ddtSchemes</i>)	backward
Gradyan Terimi (<i>gradSchemes</i>)	Gauss linear
Taşınım Terimi (<i>divSchemes</i>)	vanLeer
Laplacian Terimi (<i>laplacianSchemes</i>)	Gauss linear corrected



Şekil 4. Hesaplama alanı (Computational Domain)

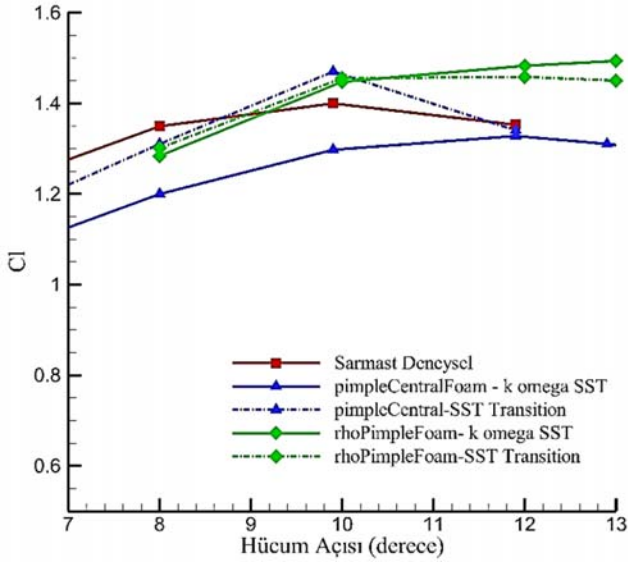
Sonlu hacim yöntemi ile ayrıklaştırılan sayısal analizlerin çözüm şemalarına ait bilgiler Tablo 3'de detaylı olarak verilmiştir. Zamana bağlı analizlerin zaman adımı ayrıklaştırmasında ikinci dereceden bir yaklaşımı kullanan *kapalı backward* şeması kullanılmıştır. Gradyan ve taşınım terimlerinin ayrıklaştırmalarında da çözümün zaman

ayrıklaştırması ile uyumu açısından ikinci dereceden yaklaşımlar uygulanmıştır.

3. Sayısal Bulgular (Numerical Results)

3.1. İki Farklı Çözücünün Karşılaştırması (Comparison of Two Different Solvers)

OpenFOAM içerisine sonradan eklenen *pimpleCentralFoam* çözücüsü, programda hazır bulunan bir başka çözücü ile karşılaştırıldı. Karşılaştırmada iki boyutlu hesaplama alanıyla birlikte aynı sınır koşulları ve çözüm şemaları kullanıldı. İki farklı türbülans modelinde ve çeşitli hücum açılarında zamana bağlı sayısal analizler gerçekleştirildi. Şekil 5'te verilen taşıma katsayısı eğrilerine bakıldığında stol öncesi bir hücum açısında ($\alpha = 8^\circ$) bütün sonuçlar birbirinde yakın gelmektedir. Ancak $\alpha = 10^\circ$ 'den sonraki açılarda *rhoPimpleFoam* ile yapılan sayısal analizler deneysel çalışmadan [14] oldukça uzaklaşmaktadır. Buna rağmen SST Transition türbülans modeli ve *pimpleCentralFoam* çözücüsü ile yapılan analiz stol açısını tahmin etmekte başarılı olmuştur. Standart OpenFOAM çözücüsü ise bu konuda deneysel çalışmadan uzak kalmaktadır. Elde edilen sonuçlardan anlaşıldığı üzere geçiş bölgesinin modellenmesinde, tercih edilen türbülans modelinin uygunluğunun yanı sıra, kullanılan çözücü de oldukça önemli bir yer tutmaktadır.

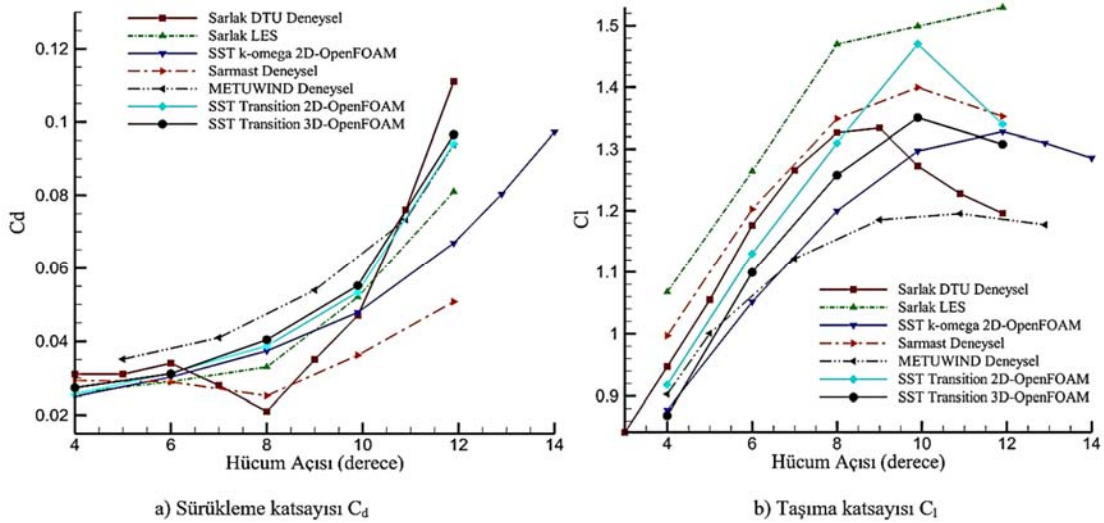


Şekil 5. Çeşitli hücum açılarında taşıma katsayısı eğrileri (Lift coefficients at various angles of attack)

3.2. Hibrit pimpleCentralFoam Çözücüsüne Ait Sonuçlar (Results of pimpleCentralFoam Solver)

Bu bölümde iki boyutlu NREL S826 kanat profili için iki farklı türbülans modelinin çeşitli hücum açılarında zamana bağlı analizlerinin sonuçları verilmiştir. Kullanılan türbülans modellerinin aerodinamik katsayılar (C_d , C_l ve C_p) üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bunun dışında SST Transition modelinin üç boyutlu analizlerinin beş farklı hücum açısında verileri bulunmaktadır. Elde edilen sonuçlar üç farklı deneysel çalışma (Tablo 2) ve Sarlak vd. [13] tarafından yapılan LES çalışması ile karşılaştırılmıştır.

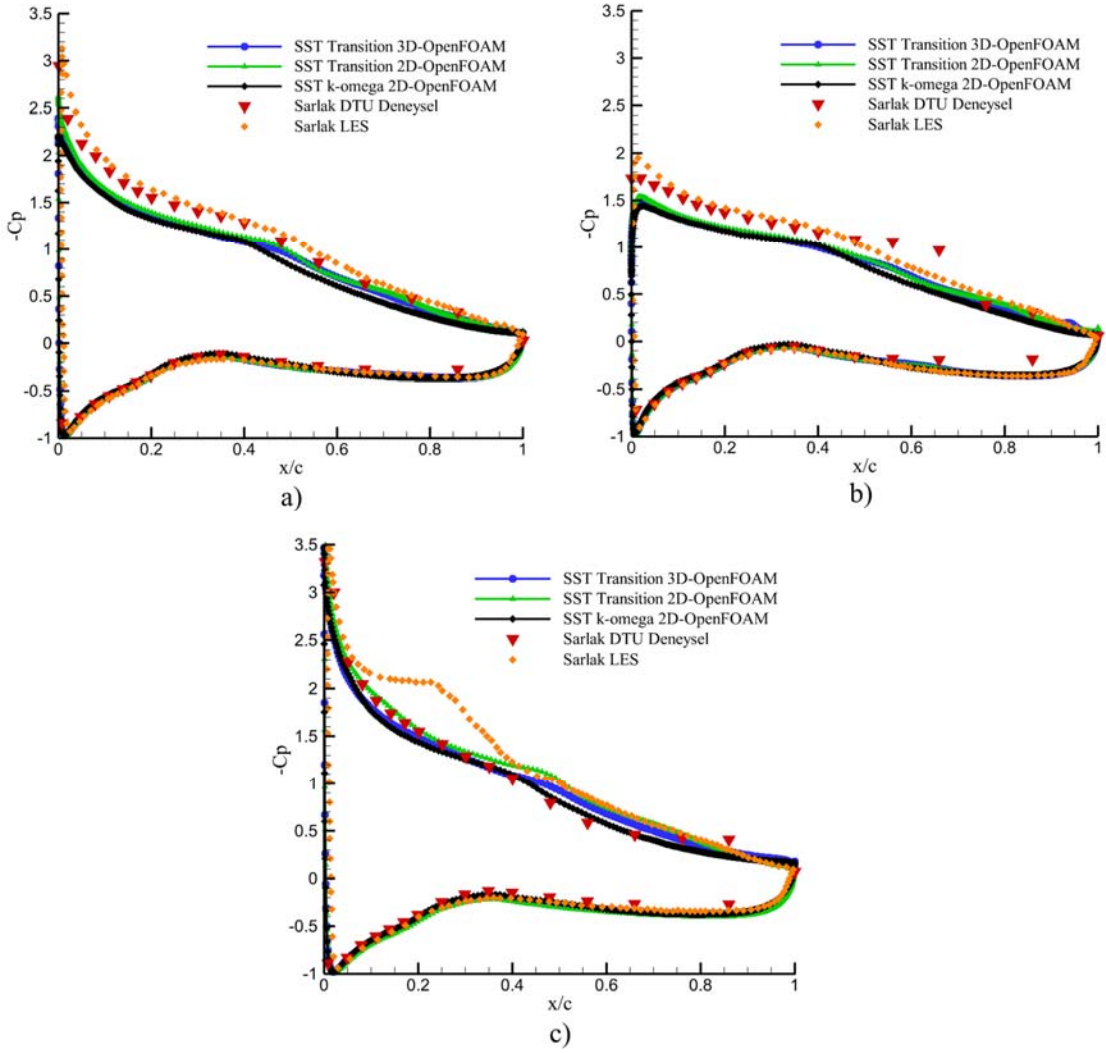
Şekil 6'da sürüklenme katsayısı (C_d) ve taşıma katsayısı (C_l) grafikleri hücum açısına göre verilmektedir. NREL S826 kanat profili üzerinde açık literatürde bulunan $Re=100.000$ için gerçekleştirilen üç farklı deneysel çalışma birbirlerinden oldukça farklı sonuçlar üretmiştir.



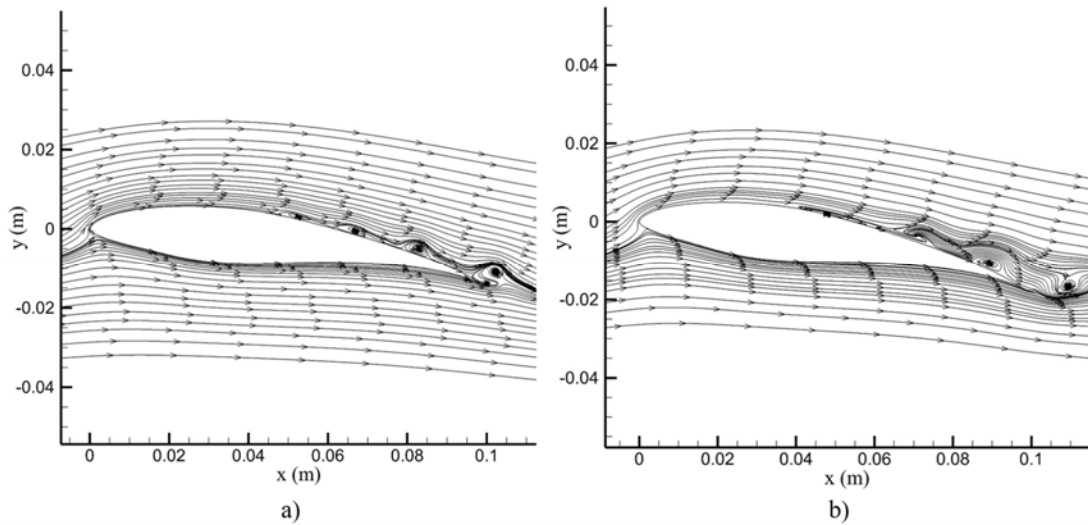
Şekil 6. Çeşitli hücum açılarında aerodinamik katsayılar (Aerodynamic coefficients at various angles of attack)

Sarlak [13] deneysel çalışmasında taşıma katsayısı özellikle $\alpha = 9^\circ$ hücum açısında stol gözlemlenirken, Sarmast [14] ve METUWIND [15] çalışmalarında Sarlak'ın değerlerinden farklı olarak sırasıyla $\alpha = 10^\circ$ ve 11° hücum açılarında gözlemlenmiştir. Ayrıca Sarlak [13] ve Sarmast [14] deneylerinde sürüklenme katsayısı için 8° hücum açısında oldukça keskin bir şekilde düşüş mevcuttur. Ancak bu çalışma dahilinde yapılan sayısal analizlerde ve Sarlak vd. [13]'nin sayısal (LES) çalışmasında sürüklenme katsayısındaki bu düşüş gözlenmemektedir. OpenFOAM üzerinden *pimpleCentralFoam* çözücüsüyle yapılan üç çalışmada, birbirinden farklı sonuçlar veren bu deneysel çalışmaların üst ve alt sınırları arasında kalmaktadır. Özellikle iki boyutta $k-\omega$ SST Transition ($\gamma - \tilde{Re}_{\theta t}$) modeli, $k-\omega$ SST türbülans modeline göre daha yakın sonuçlar vermiştir. İki boyutta ve üç boyutta $k-\omega$ SST Transition modeli stol açısını Sarmast [14] deneyseli ile aynı hücum açısında ($\alpha = 10^\circ$) hesaplamıştır. Bununla birlikte düşük hücum açılarında taşıma katsayısı, bir diğer sayısal çalışma olan Sarlak [13] LES çalışmasına göre oldukça doğru tahmin edilmiştir. Sürüklenme katsayısında ise düşük hücum açılarında ve stol sonrası açılarda OpenFOAM çalışmaları deneysel çalışmaları oldukça yakın eğrilerde takip etmiştir.

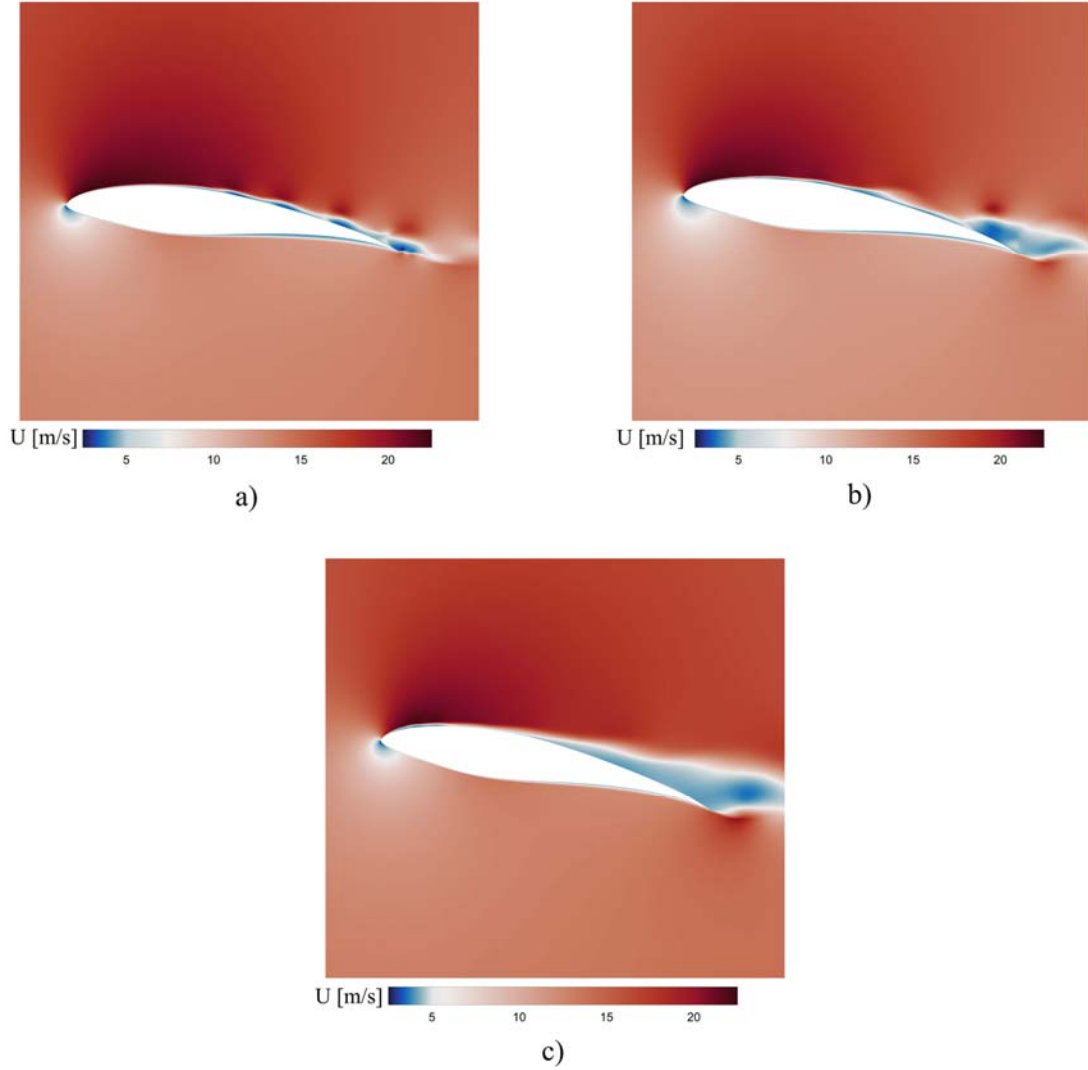
Üç farklı hücum açısında (6° , 8° ve 10°) NREL S826 kanat profili üzerindeki basınç katsayısı dağılımı Şekil 7'de yer almaktadır. OpenFOAM üzerinden yapılan zamana bağlı sayısal analizler DTU'nun deneysel çalışması ile oldukça uyumlu sonuçlar vermektedir. Hücum açısı $\alpha = 6^\circ$ 'de OpenFOAM ile yapılan üç sayısal çalışmada ve Sarlak [13] LES çalışmasında $x/c = 0.5 - 0.7$ aralığında meydana gelen ayrılmalar deneysel verilerde olduğu gibi yakalanamamıştır. Bunun dışında $\alpha = 8^\circ$ 'de bütün sayısal çalışmalar basınç katsayısında kanat profili üzerinde benzer karakteri göstermektedir. Son olarak hücum açısı $\alpha = 10^\circ$ için $x/c = 0.1 - 0.4$ aralığında $k-\omega$ SST ve Transition (geçiş) modeli LES modeline göre çok daha uyumlu sonuçlar vermiştir. Burada ise LES modelinin $k-\omega$ SST geçiş modellerine göre daha kötü sonuç vermesinin nedeni Smagorinsky ağ-altı ölçeğinin yetersizliğinden kaynaklanıyor olmasındandır. Kullanılan SST geçiş modeli, bu çalışmada da olduğu gibi laminerdan türbülanslı akışa geçiş problemlerinde doğru yaklaşımlarda bulunması amacıyla geliştirilmiş olup, uyumlu sonuçları vermesi hâlihazırda beklenmektedir.



Şekil 7. Farklı hücum açılarında kanat profili üzerindeki basınç dağılımları (C_p) a) $\alpha = 6^\circ$, b) $\alpha = 8^\circ$, c) $\alpha = 10^\circ$ (Pressure distributions around the airfoil at different angles of attack)



Şekil 8. SST Transition 3D için akım çizgileri a) $\alpha = 8^\circ$, b) $\alpha = 10^\circ$ (Streamlines for SST Transition 3D)



Şekil 9. SST Transition 3D için hız konturları a) $\alpha = 8^\circ$, b) $\alpha = 10^\circ$, c) $\alpha = 12^\circ$ (Velocity contours for SST Transition 3D)

Üç boyutlu Transition SST modeline ait ortalama akış alanından elde edilen akım çizgileri $\alpha = 8^\circ$ ve $\alpha = 10^\circ$ için Şekil 8'de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere hücum açısının artmasıyla laminar ayrılma kabarcığında hücum kenarına daha yakın bölgelerde oluşmaya başlar.

Sınır tabakanın ilk ayrılması $\alpha = 8^\circ$ için $x = 0.05$ m'de gözlemlenirken, $\alpha = 10^\circ$ 'de sınır tabaka $x = 0.045$ m' ayrılmaya başlar. Bunun yanında artan hücum açısı kanat profili üzerinde büyük ölçekli girdap yapılarının oluşmasına sebep olmaktadır. Kullanılan türbülans modeli laminar ayrılma kabarcığını ve laminardan türbülansa geçiş bölgesini oldukça başarılı bir şekilde modellemiştir.

Üç farklı hücum açısında kanat profili üzerindeki hız dağılımı son zaman adımı için Şekil 9'da verilmiştir. Akım çizgilerinde de görüldüğü gibi hız konturunda da akım ayrılmaları, girdaplar ve art izi bölgesi net bir şekilde belli olmaktadır. Aynı zamanda profilin üst yüzeyindeki hız artışı ve girdaplı akış bölgeleri görülmektedir.

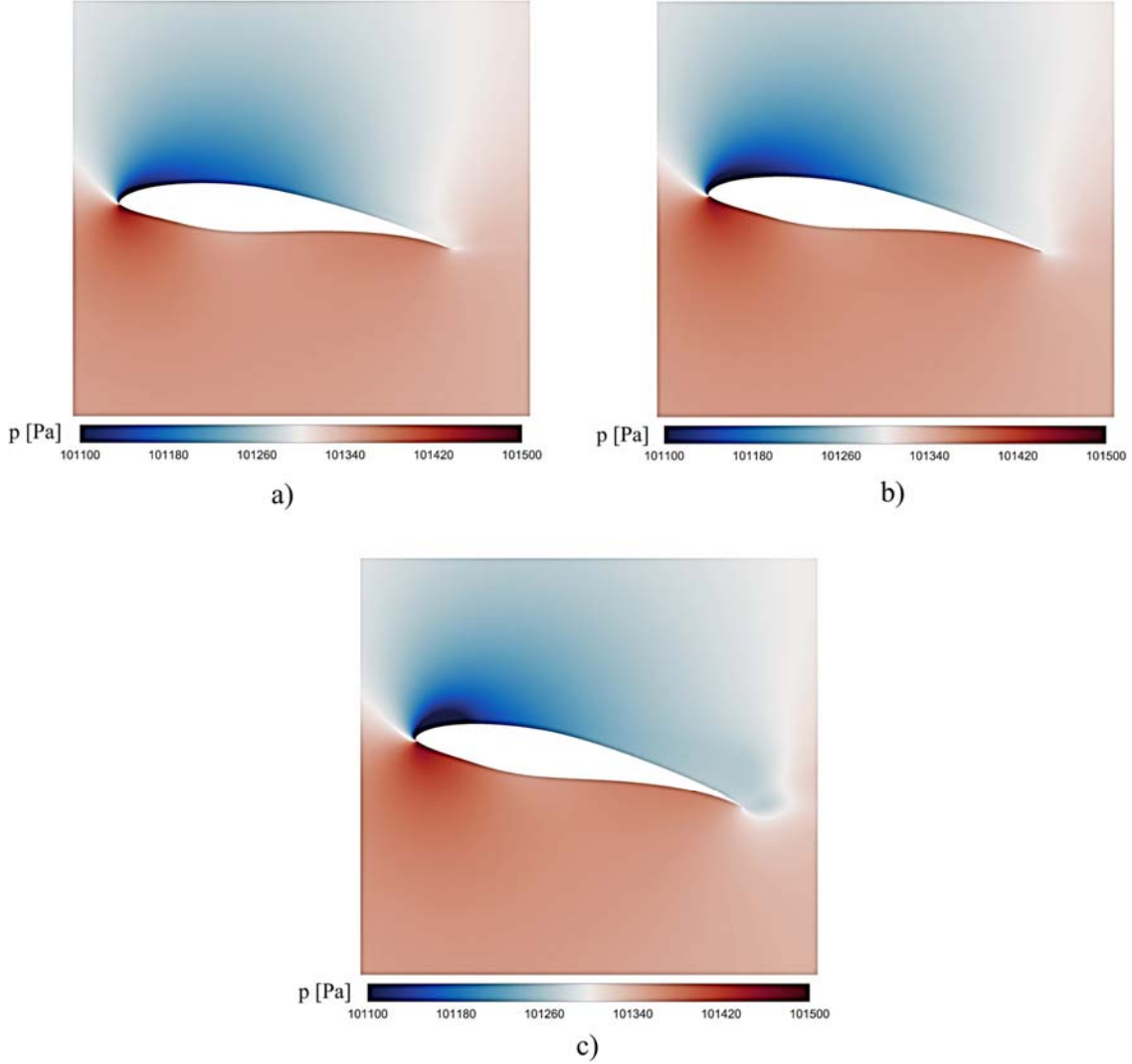
Ortalama akış alanından elde edilen ortalama basınç dağılımları farklı hücum açıları için Şekil 10'da verilmektedir. Stol öncesi ve sonrası ile stol durumunda ($\alpha = 8^\circ$, 10° ve 12°) kanat profil yüzeyindeki basınç dağılımları incelenmiştir. Profilin üst ve alt yüzeyi arasındaki basınç

farkı 8° 'den 10° 'ye geçişte artarken, stol açısı olan 10° 'nin ardından 12° 'de bu farkın azaldığı görülmektedir.

Şekil 11'da ise ortalama türbülans kinetik enerjisi dağılımları gösterilmektedir. Beklenildiği gibi hücum açısının da artmasıyla firar kenarı etrafında oluşan girdaplardan kaynaklı türbülans kinetik enerjisi artmaktadır.

4. Simgeler (Symbols)

α	Hücum Açısı
c	Veter uzunluğu
C_d	Sürükleme Katsayısı
CFL	Courant–Friedrichs–Lewy Sayısı
C_l	Taşıma Katsayısı
C_p	Basınç Katsayısı
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LES	Large Eddy Simulation
NREL	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy Laboratory)
Re	Reynolds Sayısı
SST	Kayma Gerilmesi Taşınımı (Shear Stress Transport)
s	Kanat Açıklığı



Şekil 10. SST Transition 3D için zaman ortalamalı basınç konturları a) $\alpha= 8^\circ$, b) $\alpha= 10^\circ$, c) $\alpha= 12^\circ$
(Mean pressure contours for SST Transition 3D)

p	Basınç Alanı
u	İç Enerji
λ	Isı iletkenlik Katsayısı
μ	Dinamik Viskozite
h	Entalpi
k	Türbülans Kinetik Enerjisi
ω	Spesifik Yayılım Oranı
μ_t	Türbülans Viskozitesi
γ	Aralıklılık (Intermittency)
$\bar{R}e_{\theta t}$	Geçiş Momentum Kalınlığı Reynolds Sayısı
T.I.	Türbülans Yoğunluğu

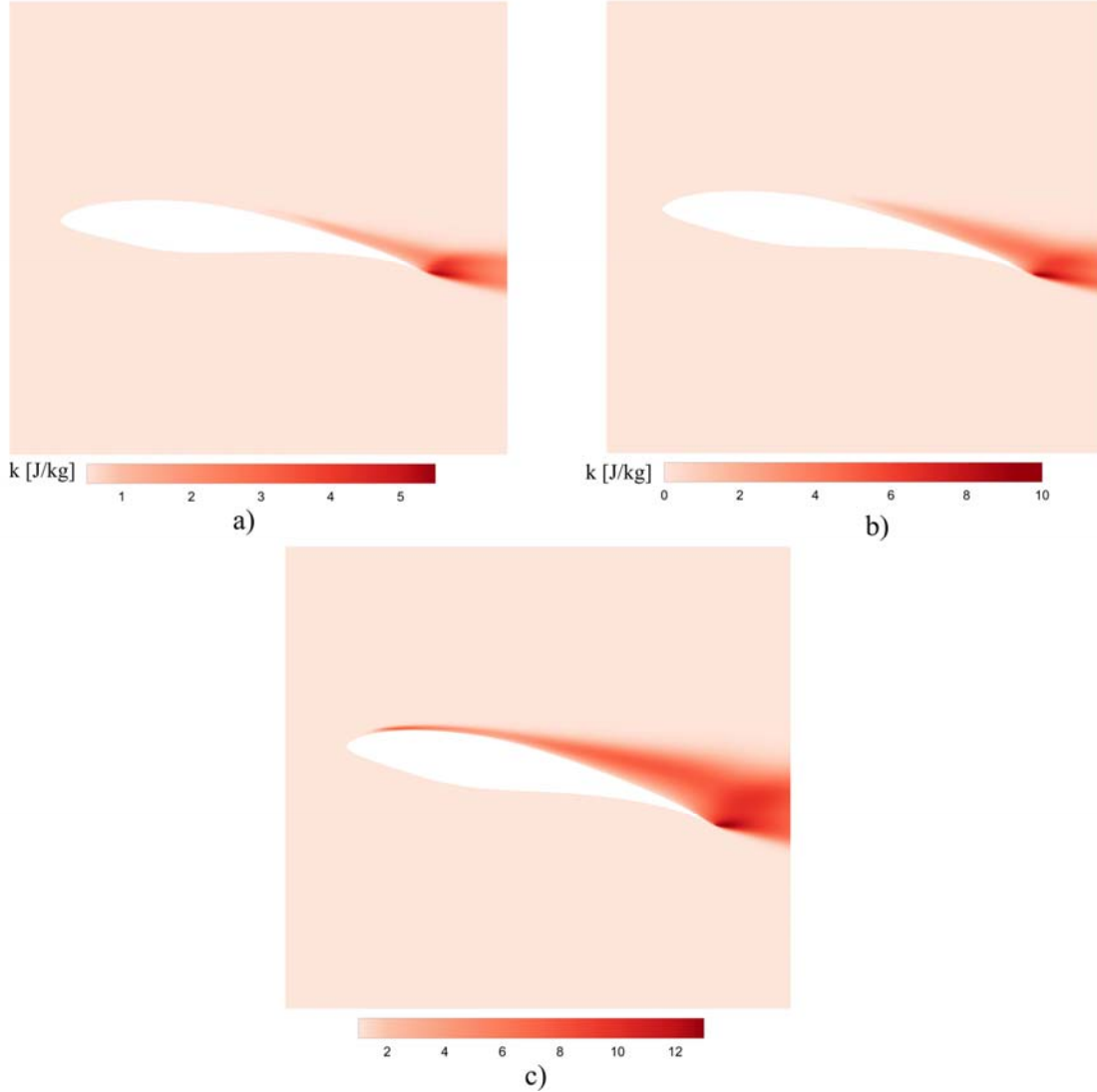
5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada NREL S826 rüzgâr türbini kanat profilinin $Re=100.000$ 'de açık kaynak kodlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan OpenFOAM kullanılarak zaman bağlı aerodinamik incelemesi yapıldı. Program içerisine *pimpleCentralFoam* isimli hibrit bir çözücü eklendi ve zamana bağlı akış alanı çözümlerinde kullanıldı. İki boyutlu türbin profili iki farklı türbülans modeli ile ve üç boyutlu akış alanı için SST Transition modeli deneysel çalışmalarla karşılaştırmalı olarak incelendi. ki boyutlu çalışmada SST Transition

modeli, $k-\omega$ SST modeline göre hem C_d hem de C_l katsayılarını tahmin etmede daha başarılı oldu. Transition (geçiş) modelinin laminardan türbülansa geçiş bölgesini diğer RAS (Reynolds Averaged Simulation) modellerine göre daha doğru bir yaklaşım ile çözdüğü bu çalışmada da görülmektedir.

Bunun yanında 6° ve 8° hücum açılarında basınç katsayılarında deneysel çalışmaya [13] oldukça yakın değerler vermekle birlikte 10° hücum açısında Sarlak [13]'ün LES modelinden daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Üç boyutlu SST Transition çalışmasına baktığımızda iki boyutlu çalışmalara kıyasla sürükleme ve taşıma katsayılarını hesaplama konusunda, üç farklı deneysel çalışmanın arasında kaldığı gözlemlenmiştir. Stol öncesi, stol, ve stol sonrası incelendiğinde ise hibrit çözücü ile yapılan transition modelinin taşıma katsayısı karakteristiğini elde etme noktasında deneysel çalışmalar ile uyumluluğu dikkat çekmektedir. Literatürdeki diğer sayısal çözümlerden farklı bir yöntem ile hesaplama yapılarak kabul edilebilir hata oranları ile sayısal çözüme ulaşılmaktadır.

Bu makale kapsamında incelenen geçiş problemlerinde kanat profili üzerinde meydana gelen kararsız yapıların ve girdapların doğru biçimde modellenmesi aerodinamik kuvvetlerin ve buna bağlı tork



Şekil 11. SST Transition 3D için ortalama türbülans kinetik enerjisi konturları a) $\alpha = 8^\circ$, b) $\alpha = 10^\circ$, c) $\alpha = 12^\circ$
(Mean turbulence kinetic energy contours for SST Transition 3D)

üretiminin tahmin edilmesinde büyük önem taşımaktadır. Elde edilen sonuçlar neticesinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsü olarak OpenFOAM' un, oldukça tatmin edici sonuçlar vermesinin yanı sıra, zamana bağlı, sıkıştırılmaz ve viskoz akışların incelenmesinde deneysel veriler ile yakın ve kararlı sonuçlar verdiği kesin bir şekilde görülmektedir. Bütün bunların, açık kaynak kodlu çözücülerin kullanımında düşük-orta Reynolds sayısına sahip türbülansa geçiş problemleri için doğru metodolojinin kullanımı ile mümkün olduğu görülmektedir.

Kaynaklar (References)

1. Ledo, L., Kosasih, P. B., Cooper, P., Roof mounting site analysis for micro-wind turbines, *Renewable Energy*, 36 (5), 1379-1391, 2011.
2. Herbert, G. J., Iniyar, S., Sreevalsan, E., Rajapandian, S., A review of wind energy Technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (6), 1117-1145, 2007.
3. Eriksson, S., Bernhoff, H., Leijon, M., Evaluation of different turbine concepts for wind power, *Renewable and Sustainable Energy reviews*, 12 (5), 1419-1434, 2008.
4. Schreck, S. J., Robinson, M. C., Horizontal axis wind turbine blade aerodynamics in experiments and modeling, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22 (1), 61-70, 2007.
5. Karthikeyan, N., Murugavel, K. K., Kumar, S. A., Rajakumar, S., Review of aerodynamic developments on small horizontal axis wind turbine blade, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 801-822, 2015.
6. Lissaman, P. B. S., Low-Reynolds-number airfoils, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 15 (1), 223-239, 1983.
7. Canlioglu I.E., Kara E., Computational fluid dynamics study of lift enhancement on a NACA0012 airfoil using a synthetic jet actuator, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (3), 1821-1838, 2023.
8. Zafer B., Coşgun F., Aeroacoustics investigation of unsteady incompressible cavity flow, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (3), 665-675, 2016.
9. Göv İ., Doğru M. H., Korkmaz Ü., Improvement of the aerodynamic performance of NACA 4412 using the adjustable airfoil profile during the flight, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 1109-1126, 2019.
10. Zafer B., Haskaraman F., Numerical investigation of headwind and crosswind conditions of Ahmed body, *Journal of the Faculty of*

- Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (1), 215-230, 2017.
11. Tangler, J. L., Somers, D. M., NREL airfoil families for HAWTs (No. NREL/TP-442-7109), National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States), 1995.
 12. Somers, D. M., The S825 and S826 Airfoils NREL, SR-500-36344, 2005.
 13. Sarlak, H., Mikkelsen, R., Sarmast, S., Sørensen, J. N., Aerodynamic behaviour of NREL S826 airfoil at $Re=100,000$, In Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 524 (1), 012027, 2014.
 14. Sarmast, S., Numerical study on instability and interaction of wind turbine wakes Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology, 2014.
 15. Ostovan, Y., Amiri, H., Uzol, O., Aerodynamic Characterization of NREL S826 Airfoil at Low Reynolds Numbers, In RUZGEM Conference on Wind Energy Science and Technology, METU Ankara Campus, 3-4, 2013.
 16. Bartl, J., Sagmo, K. F., Bracchi, T., Sætran, L., Performance of the NREL S826 airfoil at low to moderate Reynolds numbers—A reference experiment for CFD models, European Journal of Mechanics-B/Fluids, 75, 180-192, 2019.
 17. Yalçın, Ö., Cengiz, K., Özyörük, Y., High-order detached eddy simulation of unsteady flow around NREL S826 airfoil, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 179, 125-134, 2018.
 18. Cakmakcioglu, S. C., Sert, I. O., Tugluk, O., Sezer-Uzol, N., 2-D and 3-D CFD investigation of NREL S826 airfoil at low Reynolds numbers, In Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 524 (1), 012028, 2014.
 19. Liu, Y., Li, P., Jiang, K., Comparative assessment of transitional turbulence models for airfoil aerodynamics in the low Reynolds number range, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 217, 104726, 2021.
 20. Fernández F. J. F., CFD simulations of a pitching aerofoil for the study of dynamic stall, 2022.
 21. Kraposhin, M. V., Banholzer, M., Pfitzner, M., Marchevsky, I. K., A hybrid pressure-based solver for nonideal single-phase fluid flows at all speeds, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 88 (2), 79-99, 2018.
 22. Kurganov, A., Tadmor, E., New high-resolution central schemes for nonlinear conservation laws and convection–diffusion equations, Journal of Computational Physics, 160 (1), 241-282, 2000.
 23. Kurganov, A., Noelle, S., Petrova, G., Semidiscrete central-upwind schemes for hyperbolic conservation laws and Hamilton–Jacobi equations, SIAM Journal on Scientific Computing, 23 (3), 707-740, 2001.
 24. Menter, F. R., Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, AIAA journal, 32 (8), 1598-1605, 1994.
 25. Langtry, R. B., Menter, F. R., Correlation-based transition modeling for unstructured parallelized computational fluid dynamics codes, AIAA journal, 47 (12), 2894-2906, 2009.
 26. Courant, R., Friedrichs, K., Lewy, H., Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik, Mathematische annalen, 100 (1), 32-74, 1928.