

## RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT KESİTİNİN FARKLI SINIR KOŞULLARINDA AERODİNAMİK İNCELEMESİ

Mehmet Fatih Ekinci<sup>1</sup>  
İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa  
İstanbul  
Selman Kaplan<sup>2</sup>  
İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa  
İstanbul

Baha Zafer<sup>3</sup>  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
İstanbul

### ÖZET

*Bu çalışmada NREL S826 kanat kesitinin zamana bağlı akış alanı, farklı sınır koşullarında ve çeşitli hücum açılarında sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analizler açık kaynak kodlu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programı OpenFOAM ile çözülmüştür. OpenFOAM kütüphanelerinde bulunan standart çözücüler yerine, farklı bir hibrit çözücü program içerisine eklenmiştir. Reynolds Sayısı  $1 \times 10^5$  ve serbest akış hızı 15 m/s olan çalışmada  $k-\omega$  SST türbülans modeli kullanılmıştır. Elde edilen aerodinamik sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada iki boyutlu zamana bağlı akış alanı için waveTransmissive ve freestream gibi iki farklı sınır koşulu kullanılmıştır. Bununla birlikte, bu sınır koşulları kullanılarak dört farklı durum için aerodinamik sonuçlar üzerindeki etkileri araştırılmıştır.*

### GİRİŞ

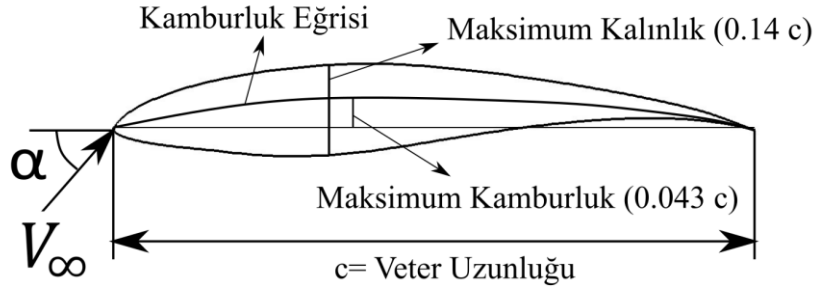
Dünyada, özellikle son birkaç yüzyılda başlayan sanayileşme hareketleri, hızla gelişen teknoloji ve nüfus artışı enerji tüketiminin hızla artmasına neden olmuştur. Günümüzde tüketilen enerjinin en büyük tedarik kaynakları fosil yakıtlardır bu tür enerji kaynaklarının çevreye verdiği zarar tartışılmaz büyüklüktedir. Yenilenemez enerji kaynaklarının sınırlı olması, doğaya ve insan sağlığına olan zararlarından dolayı ülkeler bu kaynaklara alternatif olabilecek temiz, çevreci yenilenebilir enerji kaynakları arayışına girmişlerdir. Bu enerji kaynaklarından en önemli olanlardan biri ise rüzgâr enerjisidir. Teknolojik gelişmeler sayesinde rüzgâr hızının ve yönünün tahmin edilebilir olması rüzgâr enerjisini daha etkili kullanabilmemize yardımcı olmaktadır. Rüzgâr türbinlerinde kritik bir konumda olan türbin kanatlarının aerodinamik performanslarının artırılması geçmişten günümüze sıklıkla araştırılan bir konu olmuştur. Kanat kesiti etrafında gerçekleşen akış için sınır tabakanın incelenmesi aerodinamik performans açısından büyük önemi haizdir. Kanat üzerinde akış ayrılmasının konumu performans kayıplarının azaltılması için türbülans tabakanın kontrolü ile alakalı çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bunu sağlarken üretilecek olan türbin yapı ve tasarımlarında deneysel veriler kullanmakla beraber sayısal analizlere bağlı aerodinamik katsayıların ideal seviyeye getirilmesi üzerine çalışmalar yapılması önem arz etmektedir. Mevcut çalışmada, yatay eksenli rüzgâr türbinleri için özel olarak tasarlanmış Amerika Birleşik Devletleri Enerji Departmanına ait Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy

<sup>1</sup> Öğrenci, Makine Müh. Böl., İÜC, E-posta: mehmetfatih.ekinci@ogr.iuc.edu.tr

<sup>2</sup> Öğrenci, Makine Müh. Böl., İÜC, E-posta: selman.kaplan@ogr.iuc.edu.tr

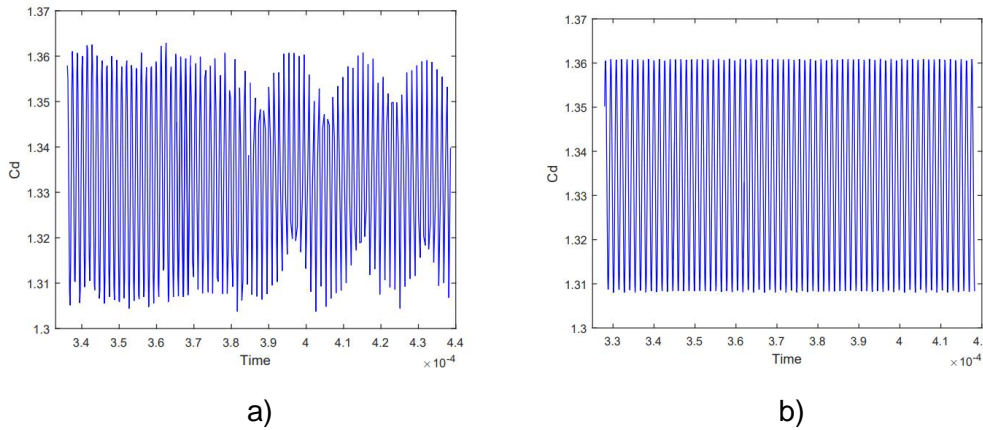
<sup>3</sup> Doç. Dr., Uçak Müh. Böl., İTÜ, E-posta: zaferba@itu.edu.tr

Laboratory - U.S. Department of Energy)' nın geliştirmiş olduğu [Tangler ve Somers, 1995] NREL S826 (Şekil 1) kanat kesitinin farklı sınır koşullarında aerodinamik incelemesi yapılmıştır.



Şekil 1: NREL S826 Kanat Kesiti

OpenFOAM ile yoğunluk tabanlı çözücüler için farklı sınır koşullarının karşılaştırıldığı bir çalışma yapılmıştır [Dong, Deng, Gao, Xiong ve Wang, 2018]. Yapılan çalışmada başlıca iki farklı sınır koşulu üzerinde durulmuştur. Bunlardan ilki, Riemann yöntemi ile ses altı giriş ve çıkış için yansımaya neden olmayan (non-reflecting) sınır koşulu ve diğeri ise hayalet hücre (ghost cell) yöntemidir. Yansıtmayan sınır koşulu için literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi de zamana bağlı akış alanı için yansıtmayan sınır koşuluna farklı bir yaklaşım getiren Zafer ve Delale [Zafer ve Delale, 2014] tarafından yapılmıştır. Standart basınç sınır koşulları, akış alanı içerisinde giden dalgaların yansımaya sebep olur. Bunun sonucunda iç alanda sahte dalga yansımaları meydana gelecektir. Yansıtmayan sınır koşulları (non-reflecting) bu sahte dalga yansımalarının önüne geçerek, sınır bölgelerinde özel bir yaklaşım uygulamaktadır. Bu sebeple aeroakustik çalışmalar için önemli bir sınır koşulu olarak karşımıza çıkar. OpenFOAM içerisinde ise basınç çıkışı için uygulanan, dalga geçiren özellikte ve yansımaya sebep olmayan şarta en uygun olarak çalışan sınır koşulu waveTransmissive bulunmaktadır. Sjöberg [Sjöberg, 2016]' ün bu sınır koşulunun uygulandığı bir çalışması bulunmaktadır. Çalışmadan görüldüğü üzere basınç dalgalanmaları ve aerodinamik katsayılar (Şekil 2), karşılaştırılan diğer basınç çıkışı sınır koşullarına göre daha kararlı bir davranış göstermektedir.



Şekil 2: İki Farklı Sınır Koşulunun Sürükleme Katsayısı Üzerindeki Etkisi; a) Wavetransmissive Koşulu Uygulanmamış Durum, b) Wavetransmissive Sınır Koşulu Uygulanmış Durum [Sjöberg, 2016]

Bu çalışma kapsamında kullanılan bir diğer sınır koşulu ise serbest-akış basıncı (freestreamPressure) koşuludur. Serbest akış hızına bağlı olarak sınırın tanımlandığı bölge boyunca akışı sınırlayan sıfır grandyanlı bir koşuldur. Sarlak [Sarlak ve Ark., 2014] ve Sarmast [Sarmast, 2014] Danimarka Teknik Üniversitesi' nde (DTU) NREL S826 için  $1 \times 10^5$  Reynolds sayısında iki farklı deneysel çalışma yapmışlardır. Ayrıca Sarlak ve arkadaşlarının [Sarlak ve Ark., 2014] çalışmalarında, Büyük Girdap Benzetimi (LES) türbülans modelinin kullanıldığı sayısal çalışmada, DTU' nun kendi geliştirdiği *EllipSys3D* çözücüsü kullanmıştır. Bir diğer deneysel çalışma da Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ)'de Ostovan ve arkadaşları [Ostovan ve Ark. 2013] tarafından yapılmıştır. ODTÜ'nün bu çalışmasında veler 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.

Bu çalışmada freestream ve waveTransmissive sınır koşullarından oluşan dört farklı durum çeşitli hücum açılarında deneysel çalışmalar ve başka bir sayısal çalışma ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın amacı, zamana bağlı dış akışlar için kullanılabilir uygun sınır koşullarının açık kaynak kodlu program ile dışarıdan eklenen hibrit bir çözücü kullanılarak analiz edilmesidir.

## YÖNTEM

Bu çalışmada iki boyutlu zamana bağlı sayısal analizlerin çözümü, açık kaynak bir yazılım olan sonlu hacim çözücüsü OpenFOAM kullanılarak yapılmıştır. Zamana bağlı, viskoz ve sıkıştırılabilir akışın çözümünde Navier Stokes denklemleri, OpenFOAM' un standart çözücüleri yerine Kraposhin ve ark. [Kraposhin ve Ark., 2018] hazırlamış olduğu *pimpleCentralFoam* çözücüsü yardımıyla ayrıklaştırılarak çözülmüştür. Türbülans modeli olarak  $k-\omega$  SST modeli tercih edilmiştir. Çalışma içerisinde farklı sınır koşulları kullanılmış ve bu değişkenlerin çeşitli hücum açılarında kanat kesiti üzerindeki taşıma ve sürüklenme katsayılarına olan etkisi incelenmiştir. Sınır koşullarında yapılan değişiklikler Tablo 1' de yer almaktadır.

Tablo 1: Farklı Durumlar için Sınır Koşulları

	Hız (U)		Basınç (p)	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
Durum 1	freestreamVelocity	freestreamVelocity	freestreamPressure	freestreamPressure
Durum 2	freestreamVelocity	freestreamVelocity	zeroGradient	waveTransmissive
Durum 3	fixedValue	zeroGradient	zeroGradient	waveTransmissive
Durum 4	fixedValue	zeroGradient	waveTransmissive	waveTransmissive

Yapılan bütün sayısal analizlerde aynı ayrıklaştırma şemaları kullanılmıştır (Tablo 2). Zamana bağlı analizlerin zaman adımı ayrıklaştırmasında 'backward' şeması seçilmiştir ve bu sayede ikinci dereceden kapalı (implicit) bir yaklaşım sağlanmıştır. Çözümün zaman ayrıklaştırması ile uyumlu olabilmesi için gradyan ve taşınım terimlerinin ayrıklaştırmalarında da ikinci dereceden yaklaşımlar kullanılmıştır.

Tablo 2: Ayrıklaştırma Şemaları

	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

## Korunum Denklemleri

Sıkıştırılabilir ve viskoz Newton tipi bir akışkanın akışı, kütle, momentum ve enerji için korunum denklemleri kullanılarak tanımlanabilir [Kraposhin ve Ark., 2018].

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

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

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

Burada  $t$  zaman,  $\rho$  yoğunluk,  $v = 1 / \rho$  özgül hacim,  $\vec{U}$  hız için vektör alanı ve  $T$  sıcaklıktır. Gerilim tensörü  $\hat{\Pi}$ , viskoz stres tensörü  $\hat{\sigma}$ , basınç alanı  $p$  ve dinamik viskozite  $\mu$  kullanılarak hesaplanır. Toplam enerji  $e$ ,  $e = u(p, T) + \frac{1}{2} \vec{U} \cdot \vec{U}$  olarak tanımlanır ve burada  $u$  iç enerjidir.

### Türbülans Modeli

Menter' in SST  $k$ - $\omega$  Türbülans modeli, türbülans kinetik enerji  $k$  ve spesifik yayılım oranı  $\omega$  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 [Menter, 1994]. 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  $k$ :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \tilde{P} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

Spesifik yayılım oranı  $\omega$ :

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = a \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (5)$$

$F_1$  ve  $F_2$  harmanlama (blending) fonksiyonu aşağıdaki denklemlerde verildiği gibi hesaplanır.

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \vartheta}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (6)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left( 2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right) \quad (7)$$

$\mu_t$  türbülans viskozitesi  $\Omega$  girdaplılık büyüklüğü ve  $y$  en yakın duvara olan mesafedir.

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} \quad (8)$$

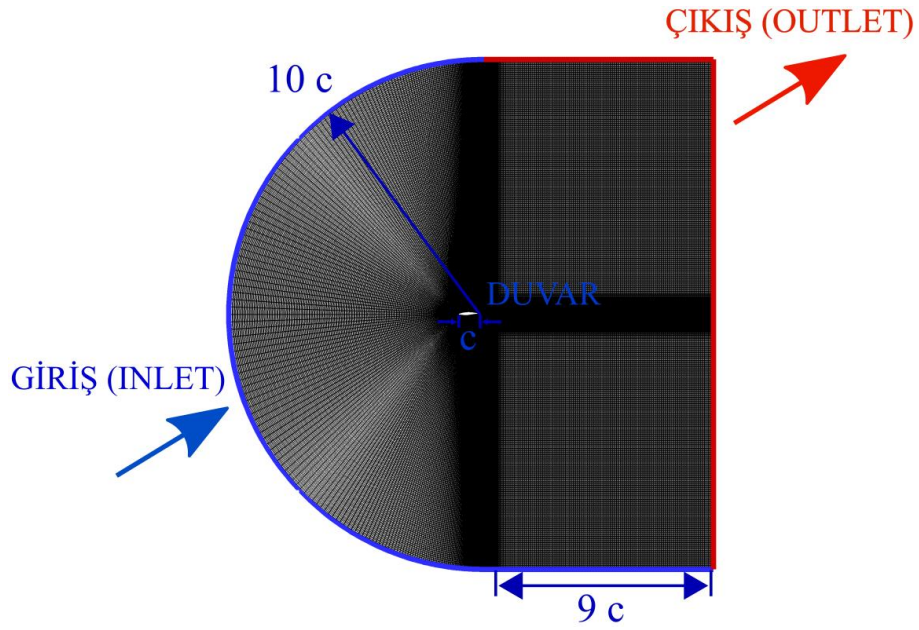
$$F_2 = \tanh \left[ \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \vartheta}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (9)$$

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

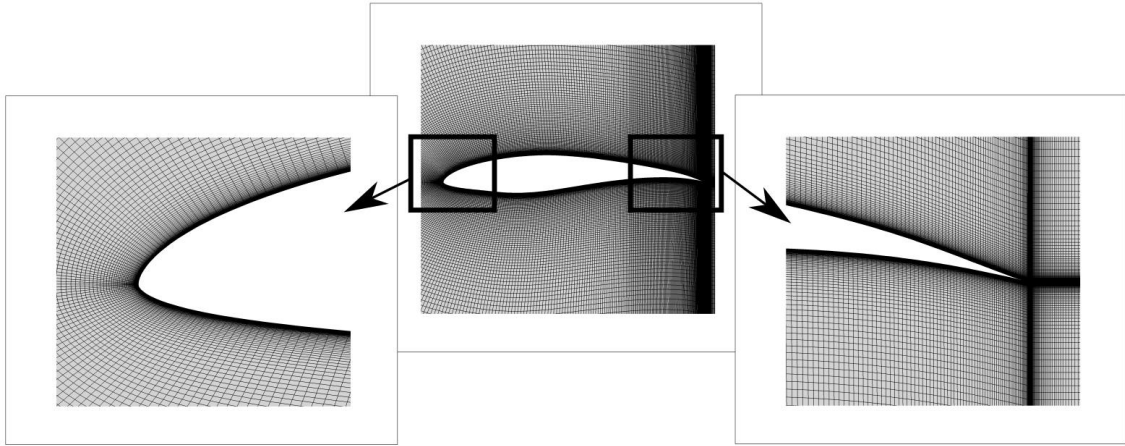
Model sabitleri şunlardır:  $\beta^* = 0,09$ ,  $a_1 = 0,31$ ,  $\beta_1 = 3/40$ ,  $\sigma_{k1} = 0,85$ ,  $\sigma_{\omega 1} = 0,5$ ,  $\beta_2 = 0,0828$ ,  $\sigma_{k2} = 0,85$ ,  $\sigma_{\omega 2} = 0,856$

### Geometrik Model ve Ağ Yapısı

NREL S826 kanat kesiti için gerçekleştirilen analizlerde C-Tip hesaplama alanı kullanılmıştır. Veter uzunluğu 0,1 m, serbest akış hızı 15 m/s ve Reynold sayısı ise  $1 \times 10^5$  olarak belirlenmiştir [Sarlak ve Ark., 2014]. Çalışmada kullanılan hesaplama alanının detayları Şekil 3' te gösterilmektedir. İki boyutlu geometrik modelde, C tarafına ait yarıçapı veter uzunluğunun 10 katı olan bir yarı daire ve firar kenarı arka tarafından çıkış sınırına kadar olan bölge ise 9 katı olacak şekilde uzatılmıştır. Ağ yapısı yapılandırılmış dikdörtgen elemanlardan oluşmaktadır.



Şekil 3: Hesaplama Alanına ait Detaylar ve Sınır Koşullarının Uygulanışı

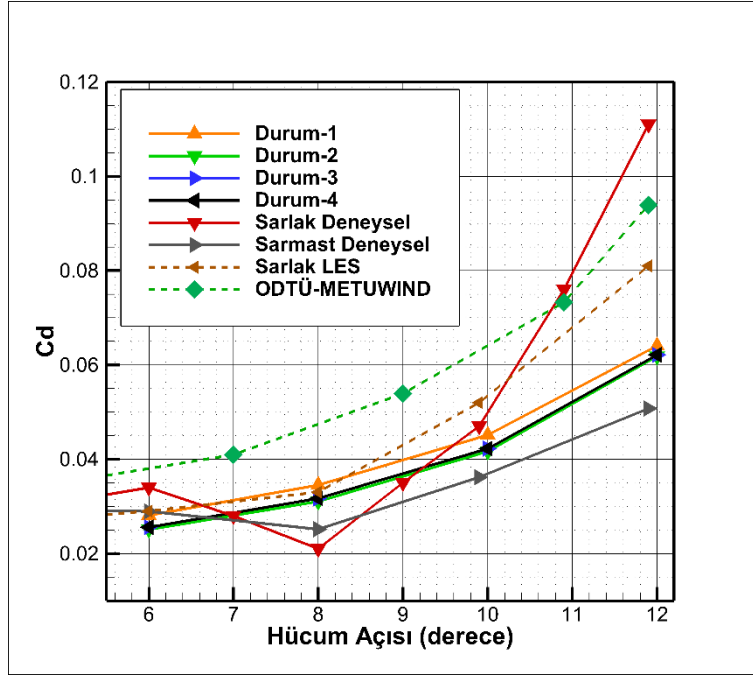
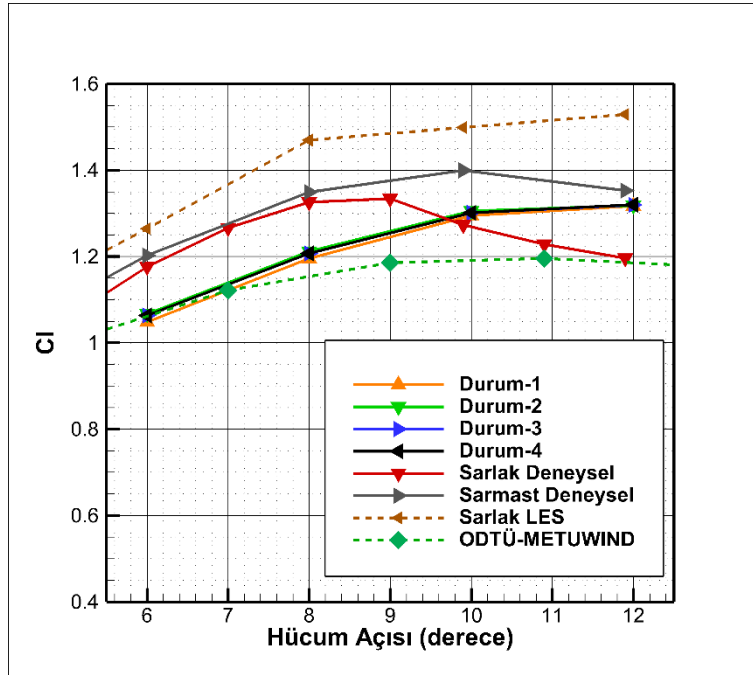


Şekil 4: Kanat Kesiti Etrafında Oluşturulan Ağ Yapısının Hücum Kenarı ve Fırar Kenarı Detayları

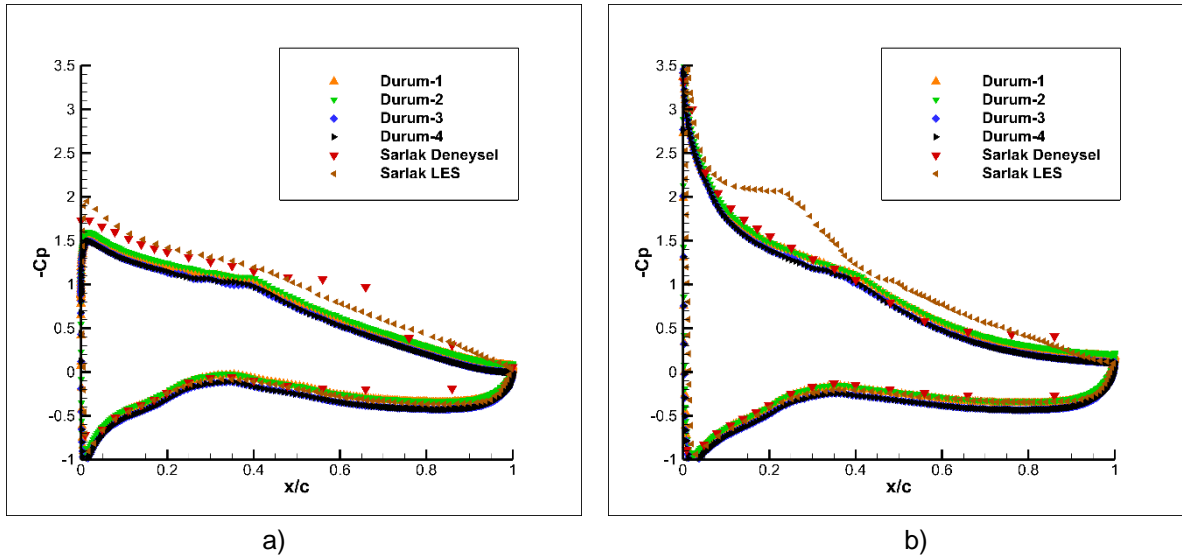
Hesaplama alanı oluşturulduktan sonra sonlu elemanlar yöntemine göre analizin yapılabilmesi için gerekli ağ yapısının oluşturulması gerekmektedir. Kanat kesitinin bütün yüzeyinde ilk hücre uzunluğu  $y^+ = 1$  olacak şekilde ayarlanmıştır. Bununla birlikte üst ve alt yüzeye toplam 500 nokta yerleştirilmiştir. Sınır tabakada yaklaşık 40 eleman bulunmaktadır. Yüzeyde oluşturulan toplam hücre sayısı 300.000' dir.

### UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Farklı sınır koşulları ile elde edilen aerodinamik sonuçlar, çeşitli hücum açıları için deneysel çalışmalar ve LES çalışması [Sarlak ve Ark., 2014] ile karşılaştırıldı. OpenFOAM ile hesaplanan aerodinamik katsayılar Şekil 5 ve Şekil 6' da gösterilmektedir. Aerodinamik katsayılar bakıldığında, çalışma kapsamında incelenen dört durum da  $Re=1 \times 10^5$  için yapılan deneysel çalışmalara oldukça yakın sonuç vermektedir. Sürükleme katsayısı ve taşıma katsayısı üç farklı deneysel çalışmanın da arasında kalmayı başarmıştır. Yapılan sayısal çalışmalar ve LES çalışması [Sarlak ve Ark., 2014] stol açısını tahmin etmekte başarılı olamamıştır. Bunun sebebi kullanılan türbülans modelinin geçiş bölgesini tam olarak çözemesinden kaynaklanıyor olabilmektedir. Freestream ve waveTransmissive gibi farklı sınır koşullarına bakıldığında ise aerodinamik katsayılar da birbirine yakın sonuçlar vermektedir.

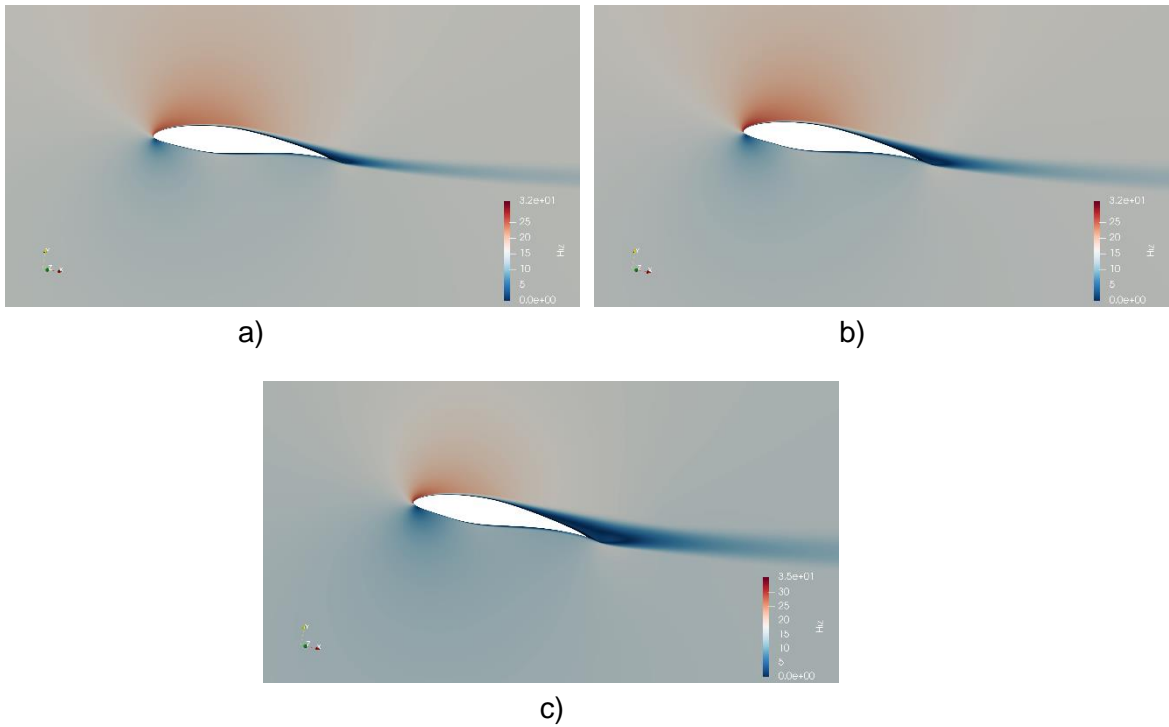
Şekil 5: Çeşitli Hücüm Açılı için Sürüklenme Katsayısı ( $C_d$ ) GrafiğiŞekil 6: Çeşitli Hücüm Açılı için Taşıma Katsayısı ( $C_l$ ) Grafiği

İki farklı hücüm açısında ( $6^\circ$  ve  $10^\circ$ ) NREL S826 kanat kesiti üzerindeki basınç katsayısı dağılımları Şekil 7' de verilmiştir. OpenFOAM ile yapılan zamana bağlı sayısal analizler deneysel çalışma ile [Sarlak ve Ark., 2014] oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Hücüm açısı  $6^\circ$  de kanat kesiti üzerinde  $x/c = 0,5-0,7$  aralığında, incelenen dört farklı durum ve Sarlak LES çalışması basınç dağılımını deneysel veride olduğu gibi yakalayamamıştır. Ancak  $10^\circ$  hücüm açısına bakıldığında dört durum da deneysel veriye oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Kanat kesiti üzerinde  $x/c = 0,1-0,4$  te Sarlak LES çalışması deneysel veriden oldukça uzaklaşmıştır.



Şekil 7: İki Farklı Hücum Açısında Kanat Kesiti Üzerindeki  $C_p$  Dağılımları; a)  $\alpha = 6^\circ$ , b)  $\alpha = 10^\circ$

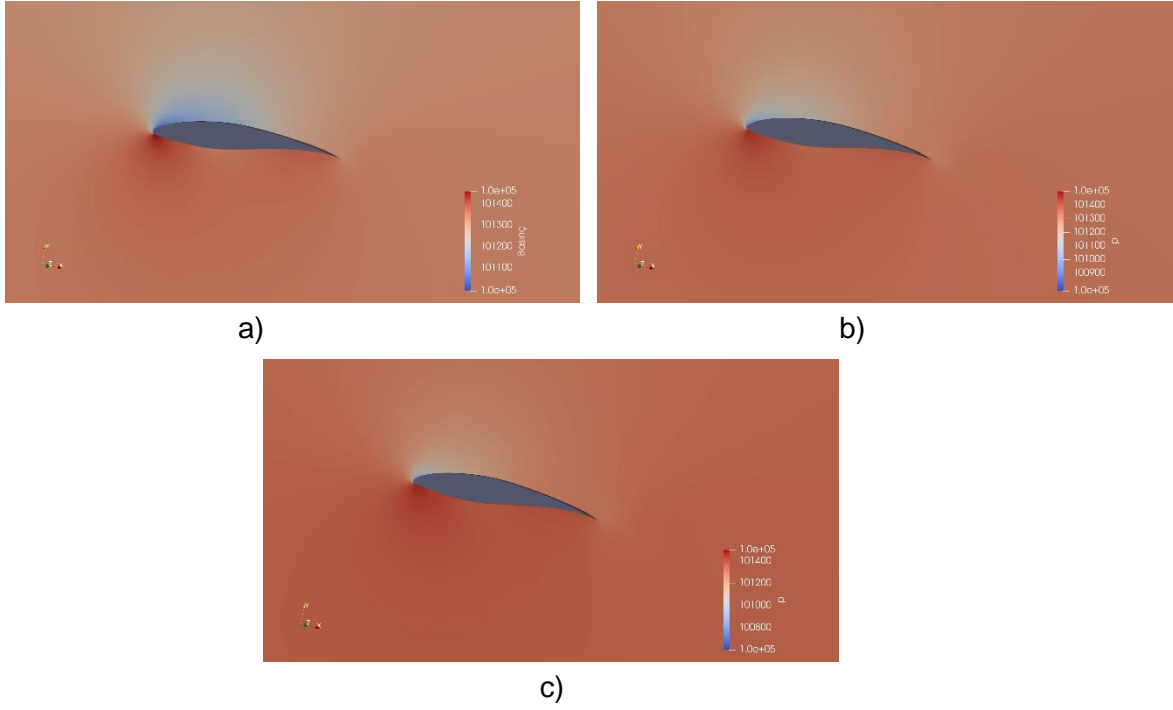
Şekil 8' de üç farklı hücum açısına ait hız dağılımları verilmiştir. Kanat kesiti üzerinde akım ayrılmalarının başladığı bölge hücum açısının da artmasıyla hücum kenarına doğru yaklaşmaktadır. Bununla birlikte art izi bölgesi ve kanat kesitinin üst yüzündeki hız artışı net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 8: Çeşitli Hücum Açılarında Durum 1'e ait Hız Dağılımları; a)  $\alpha = 8^\circ$ , b)  $\alpha = 10^\circ$ , c)  $\alpha = 12^\circ$

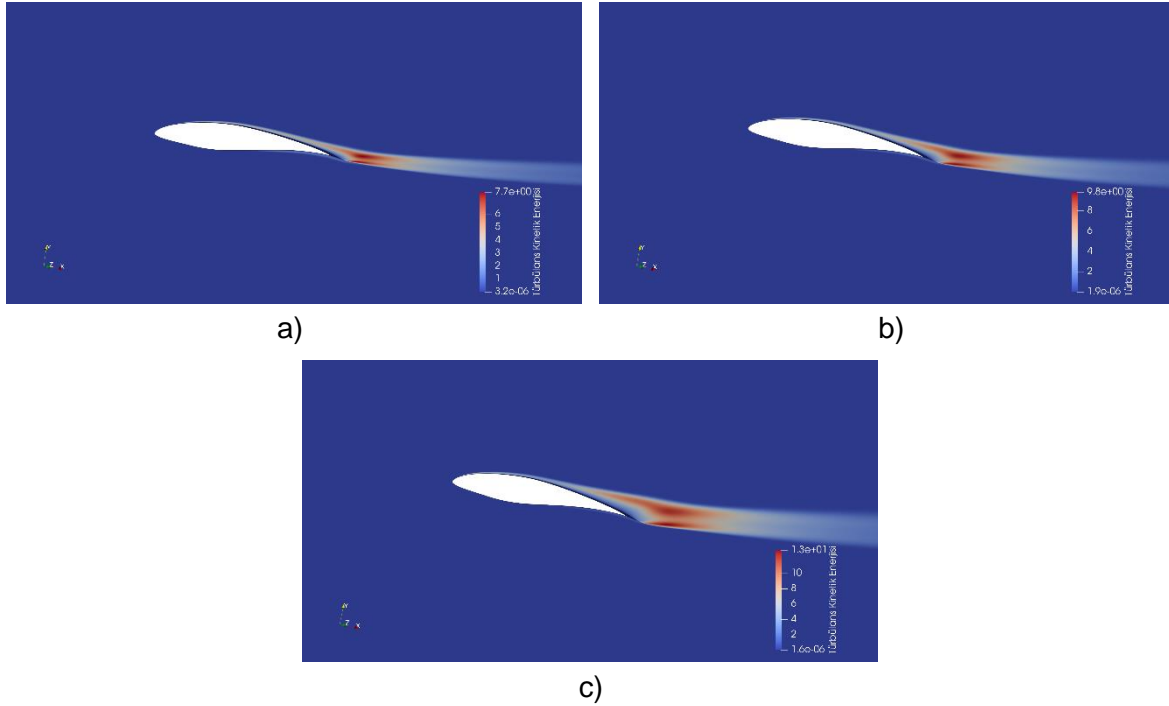
Kanat kesiti etrafında oluşan basınç dağılımları Şekil 9' da verilmektedir. Hız dağılımında da görüldüğü üzere, basınç dağılımında kanat kesitinin üst yüzeyindeki hız artışı aynı zamanda basıncın düşmesine sebep olmaktadır.





Şekil 9: Çeşitli Hücüm Açılarında Durum 1' e ait Basınç Dağılımları; a)  $\alpha = 8^\circ$ , b)  $\alpha = 10^\circ$ , c)  $\alpha = 12^\circ$

Şekil 10' da ise türbülans kinetik enerjisi dağılımları gösterilmektedir. Hücüm açısının da artmasıyla firar kenarından hücüm kenarına kadar uzanan art izi bölgesinde türbülanslı yapılardan kaynaklı türbülans kinetik enerjisi artmaktadır.



Şekil 10: Çeşitli Hücüm Açılarında Durum 1' e ait Türbülans Kinetik Enerjisi Dağılımları; a)  $\alpha = 8^\circ$ , b)  $\alpha = 10^\circ$ , C)  $\alpha = 12^\circ$

## SONUÇ

Bu çalışmada  $Re=1 \times 10^5$  de NREL S826 kanat profili üzerinde farklı sınır koşullarının etkisi incelenmiştir. Aerodinamik incelemeler açık kaynak kodlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsü OpenFOAM içerisine dışarıdan eklenen *pimpleCentralFoam* çözücüsü ile yapılmıştır. Zamana bağlı sayısal analizlerde *k- $\omega$*  SST türbülans modeli kullanılmıştır. Özellikle basınç çıkış



koşullarının değişiminin, aerodinamik katsayılar da nasıl bir etki oluşturacağı araştırılmak istenmiştir. Çalışmada başlıca iki sınır koşulu (freestream ve waveTransmissive) denenmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, incelenen dört durumda da aerodinamik katsayılar birbirine oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Ancak ileride yapılacak çalışmalarda bu sınır koşullarının aeroakustik etkileri incelenebilir. Bununla birlikte bu sınır koşullarının uzak alan (Farfield) içerisinde basınç dalgalanmalarını nasıl etkilediği araştırılabilir. Ayrıca bu çalışma kapsamında açık kaynak kodlu OpenFOAM çözücüsü, deneysel çalışmalarla oldukça uyumlu sonuçlar vermesi ile birlikte zamana bağlı, sıkıştırılabilir ve viskoz akışların incelenmesinde ticari yazılımlar yerine kullanılacak güçlü bir alternatif sunmaktadır.

### Kaynaklar

- Dong, Y., Deng, X., Gao, X., Xiong, M., & Wang, G. (2018). A comparative study of boundary conditions for the density-based solvers in the framework of OpenFOAM. *Computers & Fluids*, 172, 284-300.
- Kraposhin, M. V., Banholzer, M., Pfitzner, M., & Marchevsky, I. K. (2018). 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.
- Ostovan, Y., Amiri, H., & Uzol, O. (2013, October). Aerodynamic Characterization of NREL S826 Airfoil at Low Reynolds Numbers. In *RUZGEM Conference on Wind Energy Science and Technology, METU Ankara Campus* (pp. 3-4).
- Sarlak, H., Mikkelsen, R., Sarmast, S., & Sørensen, J. N. (2014, June). Aerodynamic behaviour of NREL S826 airfoil at  $Re=100,000$ . In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 524, No. 1, p. 012027). IOP Publishing.
- Sarmast, S. (2014). Numerical study on instability and interaction of wind turbine wakes (Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology).
- Sjöberg, E. (2016). Implementation of Aeroacoustic Methods in OpenFOAM.
- Tangler, J L, and Somers, D M. NREL airfoil families for HAWTs. United States: N. p., 1995.
- Zafer, B., & Delale, C. F. (2014). A novel nonreflecting boundary condition for unsteady flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 74(1), 59-72.