

## RÜZGAR TÜRBİNİ ROTORLARI İÇİN KALIN KANAT PROFİLLERİNİN HAD SİMÜLASYONLARI

Ezgi Orbay Akcengiz<sup>1</sup>, Nilay Sezer Uzol<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, ODTÜ

<sup>1,2</sup>ODTÜ RÜZGEM

<sup>1</sup>eorbay@metu.edu.tr, <sup>2</sup>nuzol@metu.edu.tr

### ÖZET

Bu çalışmada rüzgar türbini rotorlarında kullanılan çeşitli kalın kanat profillerinin üzerindeki akış simülasyonları daimi ve zamana bağlı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılarak yapılmıştır. Kalın kanat profilleri genellikle büyük rüzgar türbini rotorlarının kanat tasarımında tercih edilmektedir. Kanat profiline kalınlığı, kanatların dış kısımlarında aerodinamik performans açısından, kanatların kök kısmına yaklaştıkça ise hem yapısal hem de aerodinamik performans gereksinimleri açısından artmaktadır. Bu tür kanat profilleri için doğru aerodinamik özelliklerin hem deneylerle hem de sayısal analizlerle elde edilmesi büyük ölçüde ayrılan akışlardan dolayı oldukça zordur. Bu çalışmada, seçilen kalın kanat profillerinin HAD simülasyonları gerçekleştirilerek akış karakteristikleri incelenmiş ve sonuçlar literatürdeki mevcut deneylerle karşılaştırılmıştır.

### 1. GİRİŞ

Kalın kanat profilleri, büyük rüzgar türbinlerinde büyük bükülme yüklerini absorbe etmek için tasarlanmıştır. Güçlü yapılar elde etmek için kalın kanat profilleri rotor kanatlarının yani palaların kök kısımlarından ortalarına kadar uygulanmaktadır. Son yıllarda, kalın profillerin rüzgar türbini kanatlarına uygulanması artmaktadır. Kalın kanat profilleri genel olarak keskin ya da küt firar kenarına sahip olabilir. Keskin firar kenarıyla kıyaslandığında, küt firar kenarlı profiller rüzgar türbinlerinde daha yaygın kullanılır, çünkü daha geniş kesit alanlarına uyarlanabilirler. Ayrıca, daha fazla taşıma kuvveti üretebilir ve yapısal dayanıklılığı arttırmak için kullanılabilirler.

Literatürde, farklı kalın kanat profilleri üzerine yapılmış birçok deneysel ve hesaplamalı çalışmalar bulunmaktadır [1-14]. Bu kanat profillerinin etrafındaki akışı incelemek ve profil kalınlığının aerodinamik performansa olan etkisini incelemek için farklı türbülans modelleri ve hesaplama yöntemleri de kullanılmıştır. 2001 yılında Bertagnolio vd. [1] birçok farklı kanat profiline içeren bir rüzgar türbini kanat profili kataloğu yayınlamıştır. Bu katalogta, hem deneysel aerodinamik verileri hem de 2-boyutlu Navier-Stokes çözücü EllipSys2D ve panel yöntemi kodu XFOIL kullanılarak elde edilen sayısal veriler bulunmaktadır. Deneysel verilerle hesaplama sonuçları arasında genel olarak iyi bir uyuma olduğu belirtilmiştir.

Küt firar kenarlı kanat profillerinin yaygın örneklerinden olan DU kanat profilleri, Delft Teknoloji Üniversitesi tarafından rüzgar türbinlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Timmer ve Rooij [2,3] tarafından 2003 yılında deneysel ve sayısal olarak bir dizi DU kanat profili araştırılmıştır. Pürüzlülüğün çeşitli kanat profillerinin performansı üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. V-girdap yaratıcılarının DU91-W2-250 kanat profiline aerodinamik performansına olan etkisi Velte [4] tarafından 2008 yılında incelenmiştir. 2009'da Barone ve Berg [5], DU97-W-300 profiline değiştirilmemiş ve düz kalın firar kenarlı (flatback) versiyonlarının Reynolds sayısı  $3 \times 10^6$  için hem deneysel hem de hesaplamalı analiz sonuçlarını sunmuştur. Kanat profillerinin, aerodinamik ve aeroakustik özelliklerini incelemiştir.

Farklı araştırma amaçlı rüzgar türbinleri için yapılan çalışmalarda, 2011 yılında Bechmann vd. [6], MEXICO rüzgar türbinin arkasında oluşan iz bölgesini HAD kodu EllypSys3D kullanarak incelemişlerdir. DU 91-W2-250, RISOE-A1-21 ve NACA 63-418 kanat profilleri, MEXICO rüzgar türbinini palinin sırasıyla kök kısmından uç kısmına doğru kullanılır. Sıkıştırılabilen RANS denklemlerini k-omega SST çevrinti viskozitesi yöntemi ile birlikte çözmüşlerdir. Elde ettikleri sonuçları kullanarak, 3-boyutlu kanat profilinin aerodinamik özelliklerini çıkartıp 2-boyutlu deneysel aerodinamik verilerle karşılaştırmışlardır. 2013'de Lago vd. [7], NREL 5 MW rüzgar türbinini için farklı kanat konfigürasyonlarını analiz etmiştir. NREL 5 MW rüzgar türbininde farklı kalınlıklarda DU40-DU21 kanat profilleri ve NACA64 serisi profilleri kullanılmaktadır. Fischer vd. [8] 2014'te ve Yang vd. [9] 2016'da kalın profillere sahip rüzgar türbinini palalarının aerodinamik ve yapısal optimizasyonu üzerine çalışmıştır. Cakmakcioglu vd. [10] 2014'te, düşük Reynolds sayılarında NTNU model rüzgar türbininde kullanılan S826 kanat profili için 2 ve 3-boyutlu HAD analizleri yapmış deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. 2015 yılında Gao vd. [11], Reynolds sayıları  $3 \times 10^6$  ve  $2 \times 10^6$ 'da girdap yaratıcıları olan ve olmayan DU97 profilli kanatlar üzerinde oluşan akış ayrılmalarını araştırmıştır. HAD analizleri Spalart-Allmaras türbülans modeli ile Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleri çözülerek FLUENT yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Bu analizler için, iz bölgesinde 30 veter uzaklığında uzak alan sınırlarına sahip 3-boyutlu C-H tipi hesaplama alanı kullanılmıştır. Hız girişi ve basınç çıkışı, alanın girişi ve çıkışında tanımlanmış olup, kanat ve girdap yaratıcılar duvar sınır şartları olarak tanımlanmıştır.

Yakın zamanda yapılan deneysel ve sayısal çalışmalarda ise, 2018 yılında Özçakmak vd. [12], serbest akış türbülansı ve hücum kenarı pürüzlülüğü etkileriyle NACA 63-418 kanat üzerindeki Laminer-Türbülans Geçişini araştırmıştır. DAN-AERO rüzgar tüneline farklı Reynolds sayıları  $1.6 \times 10^6$  -  $6 \times 10^6$  ve farklı hücum açıları için elde edilen aerodinamik ölçümleri sunmuşlardır. Rogowski vd. [13] 2018'de, DU91 kanat profilinin Reynolds sayısı  $3 \times 10^6$ 'daki aerodinamik karakteristiğini incelemek için 2-boyutlu RANS denklemlerini ve 3-boyutlu DES yöntemini kullanmıştır. Simülasyon sonuçları incelendiğinde, Laminer-türbülans geçiş modelinin, k-w SST tam türbülans modeline göre deney verileri ile daha uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Deneysel ölçümler, LM Wind Power Düşük Hızlı Rüzgar Tüneli'nde elde edilmiştir. Li vd. [14] 2018'de, DU91-W2-250 kanat profilinin düşük Reynolds sayısı  $3 \times 10^5$ 'te dinamik tutunma kaybı altındaki aerodinamik performansını, geçiş SST türbülans modeli ile daimi olmayan RANS (URANS) denklemlerini çözerek incelemiştir. 2-boyutlu bir hesaplama alanı kullanılmış olup, kanat profili ile birlikte hareket eden dairesel çözüm ağının salınım hareketi ile dinamik tutunma kaybının benzetimi sağlanmıştır.

Bu bildiriye, Şekil 1'de gösterilen 3 farklı kalın kanat profilleri için, keskin firar kenarlı profilden NACA 63-418 ve küt firar kenarlı profillerden DU91-W2-250 ve DU97-W-300, 2-boyutlu HAD simülasyonları yapılarak kanat profilleri etrafındaki akış alanları ve aerodinamik performans karakteristikleri incelenmektedir. DU 97-W-300, yaklaşık %1.74 veter uzunluğunda küt firar kenarı kalınlığına sahip olup maksimum kalınlığı veterin %30'unda bulunmaktadır. Bu profil, kanat boyunca diğer kanat profillerine sorunsuz bir şekilde dönüşebildiği için genellikle rüzgar türbinlerinde kanat buyunun kökten %40'ına kadar kullanılmaktadır. Reynolds sayısı  $3 \times 10^6$  iken DU97-W-300 1,5 ila 1,6 aralığında maksimum taşıma kuvveti katsayısına sahiptir. DU91-W2-250 kanat profili, %25'lik bir maksimum kalınlığa ve %0.65 veter uzunluğunda küt firar kenarı kalınlığına sahiptir. Bu çalışmada ele alınan bir diğer kalın kanat profili olan NACA 63-418, %18'lik bir profil kalınlığına ve keskin bir firar kenarına sahiptir.

## 2. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZLERİ

Sayısal analizler, ön koşullandırılma tekniği ile birlikte sıkıştırılabilir Reynolds-Ortalama Navier-Stokes denklemleri ve k- $\omega$  SST türbülans modeli çözülerek, ticari bir sonlu hacim HAD akış çözücü yazılımı olan CFD++ [15] kullanılarak yapılmıştır. 2-boyutlu C-H tipi yapısal çözüm ağı hesaplama alanı Pointwise [16] yazılımı kullanılarak üretilmiştir.

### **Cözüm Ağları**

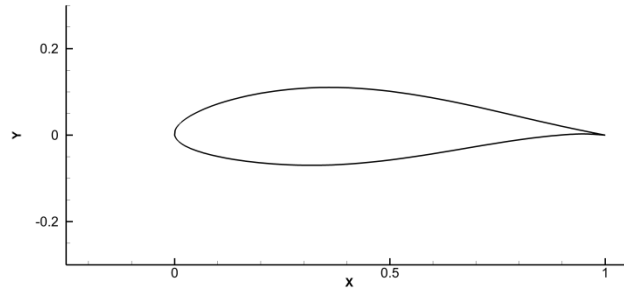
Bütün çözüm ağları kanat profilinin üst ve alt yüzeylerinden itibaren 20 veter uzunluğunda olup, iz bölgesi 30 veter uzunluğu boyunca uzanmaktadır. Keskin firar kenarlı NACA63-418 için üretilen çözüm ağı yaklaşık olarak 120 bin dörtgen (quadrilateral) grid hücresi içerirken, küt firar kenarlı DU91-W2-250 kanat profilinin çözüm ağı yaklaşık olarak 150 bin dörtgen hücreden oluşmaktadır. Daha geniş küt firar kenarından dolayı daha seyrek olarak yapılabilen DU97-W-300 kanat profilinin çözüm ağında ise yaklaşık olarak 80 bin dörtgen hücre bulunmaktadır. Çözüm ağları, kanat profil geometrisin etrafında ve iz bölgesinde yoğunlaştırılmıştır. NACA 63-418 ve DU91-W2-250 profillerinin üst ve alt yüzeylerinde 200'er ağ noktası bulunurken, DU97-W-300 profilinin etrafına toplamda 200 ağ noktası yerleştirilmiştir.  $y^+$  değerini olabildiğince küçük tutmak için, bütün kanat profillerinde ızgara aralığı, ilk hücre için  $10^{-5}$  veter uzunluğunda verilmiştir.

Şekil 2'de NACA 63-418 kanat profili için üretilmiş olan C-H tipi yapısal çözüm ağı ve hesaplama alanı görülebilmektedir. Diğer kanat profilleri için de benzer geometriye sahip çözüm ağları yapılmıştır. Şekil 3'te, kanat profili etrafındaki ağ hücreleri sırasıyla NACA 63-418, DU91-W2-250 ve DU97-W-300 profilleri için verilmiştir. Sınır tabakası bölgesinde, ağ çizgileri kanat yüzeyine dik bir şekilde uzanmaktadır.

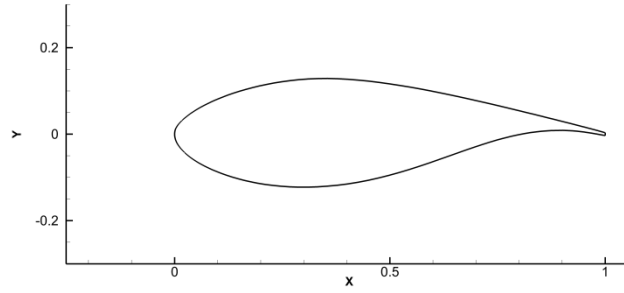
### **HAD Analizleri**

Daimi durum simülasyonları 2000 iterasyon adımı boyunca yürütülmüştür. Analizlerin yakınsama süreleri farklılık göstermekle birlikte, NACA63-418 ve DU91-W2-250 profilleri için yaklaşık olarak 500 iterasyon adımı yakınsama gerçekleşmiştir. Böylece, akış alanının yakınsama durumuna ulaştıktan sonraki davranışları da gözlenmiştir. Kanat profillerinin aerodinamik özellikleri standart deniz seviyesi koşulları için ve Reynolds sayısı  $3 \times 10^6$  iken incelenmiştir. Standart deniz seviyesi koşullarında, açık hava basıncı 101325 Pa, sıcaklık 288.15 K olarak hesaplanmıştır. Bu koşullarda, serbest akış hızı 42.86 m/s olarak verilmiştir. Hesaplama alanın dış kenarlarına, karakteristik uzak alan sınır koşulları uygulanmıştır. Ayrıca, kanat profili duvar sınır koşulu (kaymazlık koşulu) olarak tanımlanmıştır. Böylece, kanat profilinin yüzey akış hızı sıfır olacak ve kanat profili üzerinde sınır takası oluşabilecektir. Yürütülen bütün simülasyonlar temiz/pürüzsüz yüzey koşullarında yapılmış olup, kanat profili etrafındaki akış  $k-\omega$  SST'nin tam türbülans modeli kullanılarak çözülmüştür.

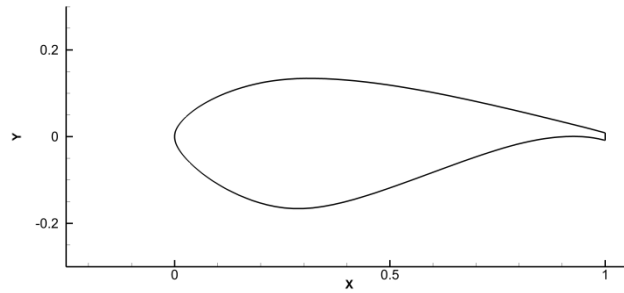
Bütün kanat profilleri için, aerodinamik analizler  $-10^\circ$  ila  $20^\circ$  aralığındaki hücum açıları (Angle of Attack, AoA) için yapılmıştır. Hücum açısına bağlı olarak hız vektörü bileşenlerinin değişimi de akış koşulları olarak verilmiştir. Taşıma ve sürüklenme kuvveti katsayıları son 1000 iterasyonun ortalaması olarak hesaplanmıştır. NACA 63-418 profili için Reynolds sayısı  $3 \times 10^6$ 'da elde edilen sayısal sonuçlar Bertagnolio vd., 2001, [1]'de verilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. DU91-W2-250 ve DU97-W-300 profilleri için sayısal analizler de aynı Reynolds sayısında yapılmıştır ve sırasıyla Gao vd., 2015, [11] ve Rogowski vd., 2018, [13] deneysel verileri ile karşılaştırılmıştır. Bütün hesaplamalar, ODTÜ RÜZGEM'deki Yüksek Başarımli Hesaplama öbek bilgisayarlarında 16 işlemci kullanılarak yapılmış olup, 2000 iterasyonluk daimi durum simülasyonlarını elde etmek yaklaşık olarak 10 dakika sürmektedir.



a) NACA 63-418 kanat profili [1, 17]

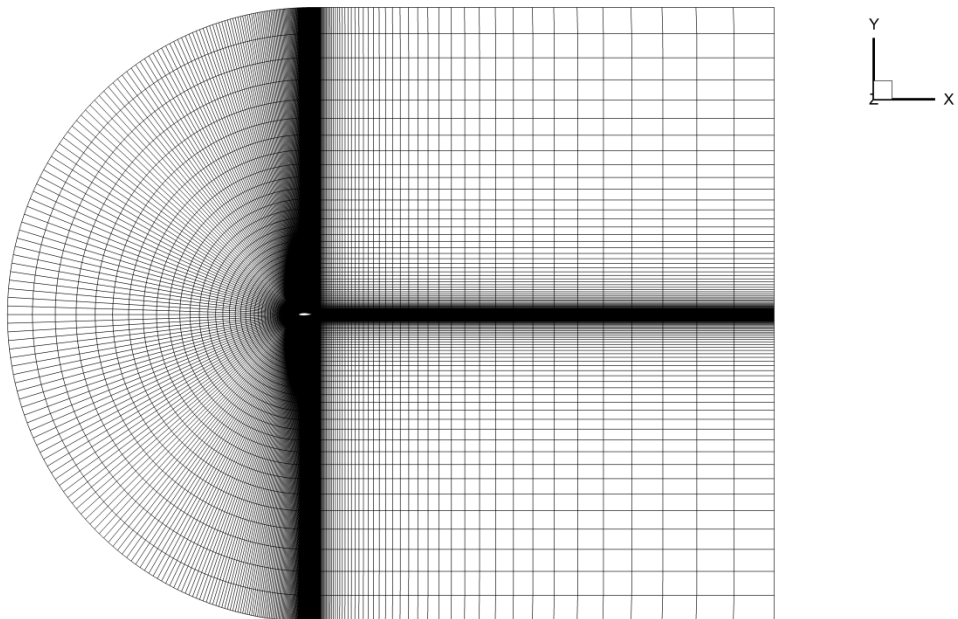


b) DU91-W2-250 kanat profili [3, 14]

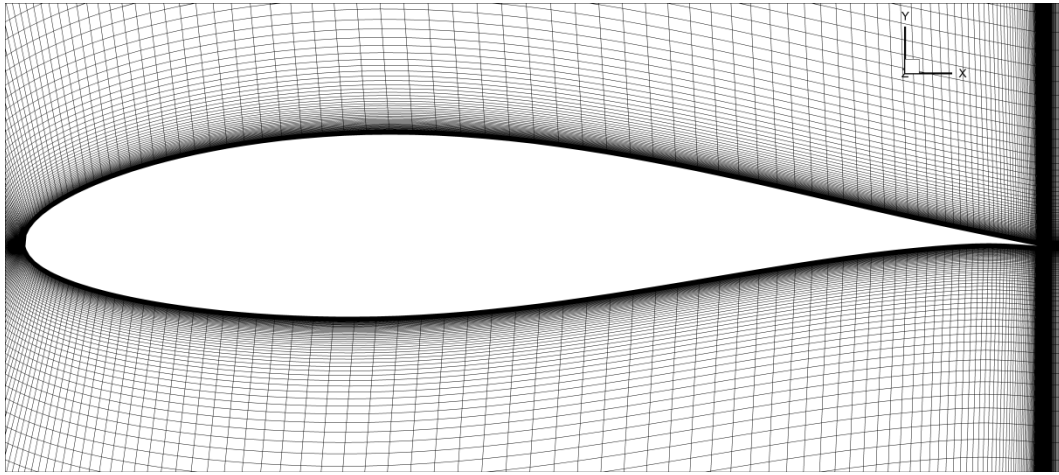


c) DU97-W-300 kanat profili [3, 5]

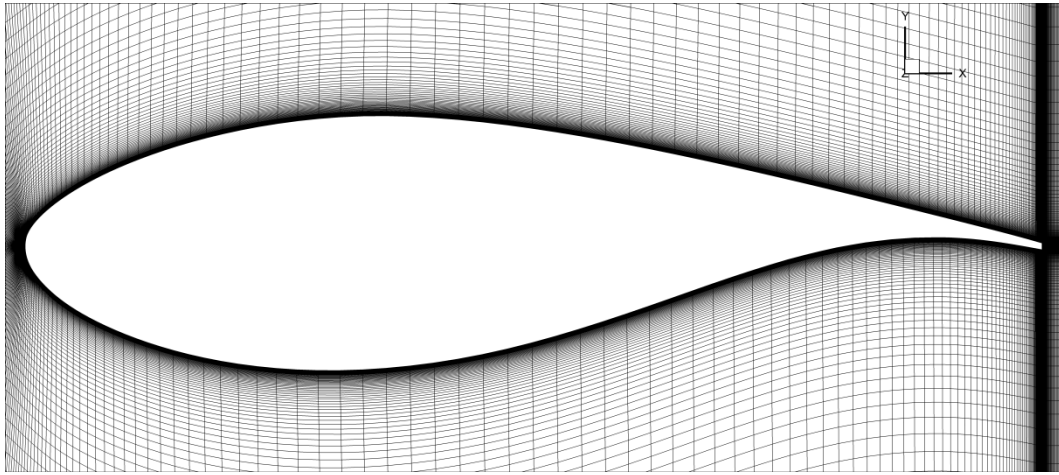
Şekil 1. Rüzgar Türbini Kalın Kanat Profili Geometrileri



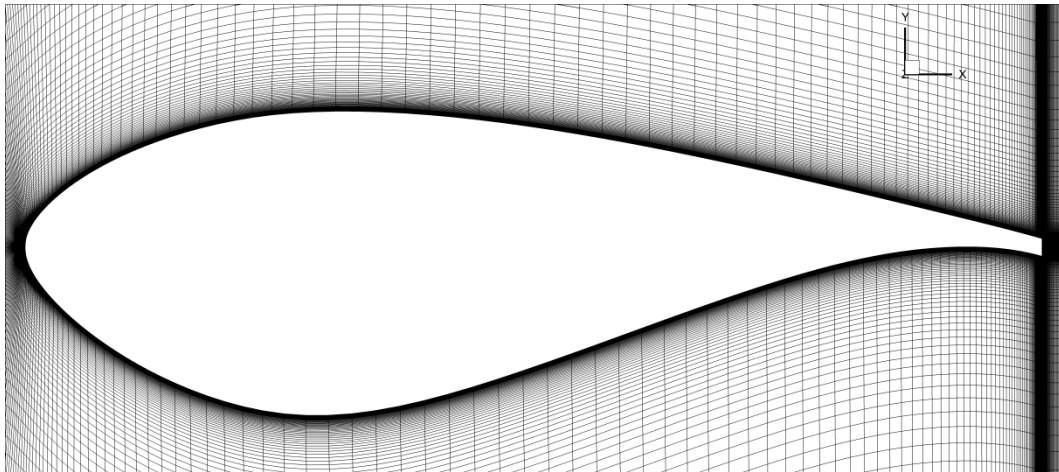
Şekil 2. NACA 63-418 kanat profili için üretilmiş yapısal çözüm ağı ve C-H tipi hesaplama alanı



a) NACA 63-418 kanat profili



b) DU91-W2-250 kanat profili



c) DU97-W-300 kanat profili

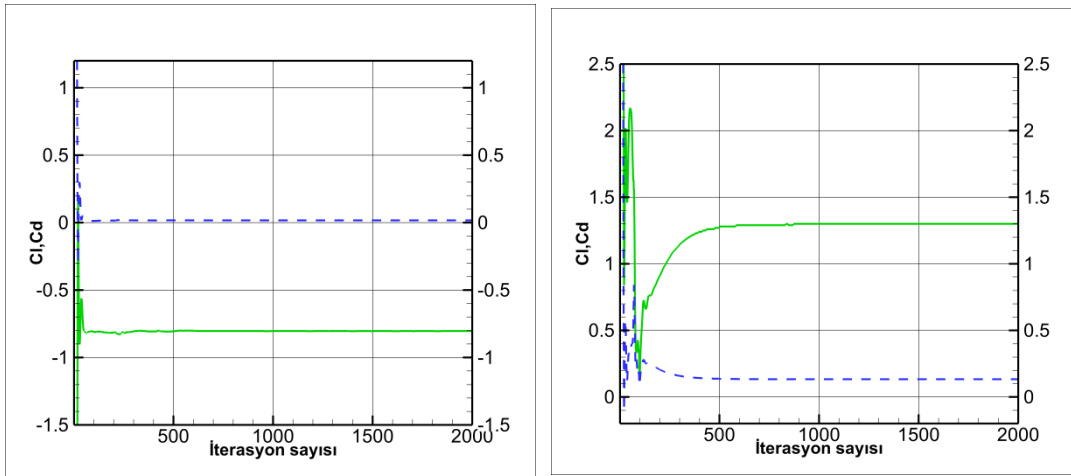
Şekil 3. Kanat profilleri etrafındaki 2-boyutlu, yapısal çözüm ağları

### 3. HAD ANALİZ SONUÇLARI

3 farklı kalın kanat profili için yapılan HAD simülasyon sonuçları aşağıda değerlendirilmiştir.

#### NACA 63-418 Kanat Profili

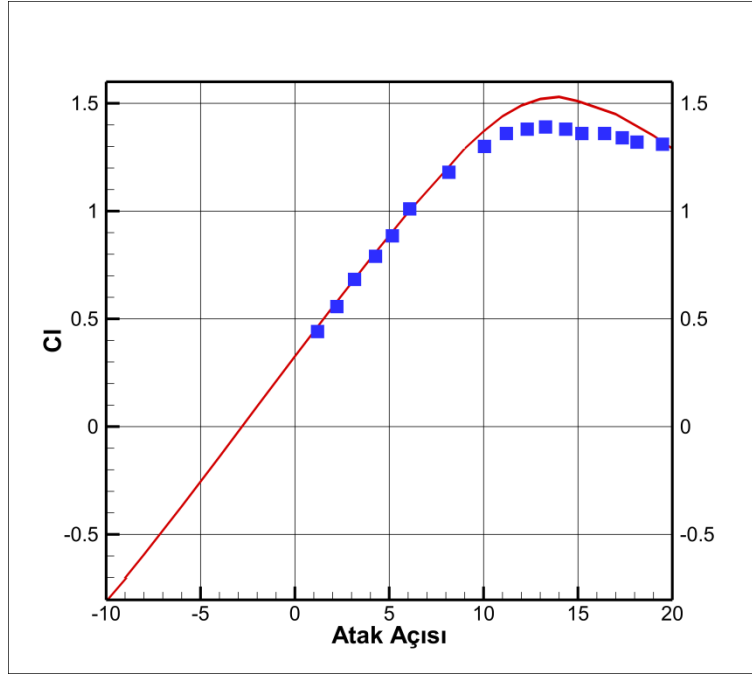
Taşıma kuvveti ve sürüklenme kuvveti katsayılarının  $20^\circ$  ve  $-10^\circ$  lik hücum açılarındaki yakınsama grafikleri Şekil 4'te verilmektedir. Sonuçlar NACA 63-418 kanat profili için elde edilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere, yakınsama elde edildikten sonra, taşıma kuvveti ve sürüklenme kuvveti katsayılarında salınımlar olmamaktadır. Hücum açısı arttıkça grafiklerin belirli bir değere yakınsamaları daha uzun sürmektedir. Hücum açısı  $20^\circ$  iken, grafik 500. adımdan sonra yakınsarken,  $10^\circ$ 'lik hücum açısı için grafikler çok daha erken daimi durum değerine ulaşmaktadır.



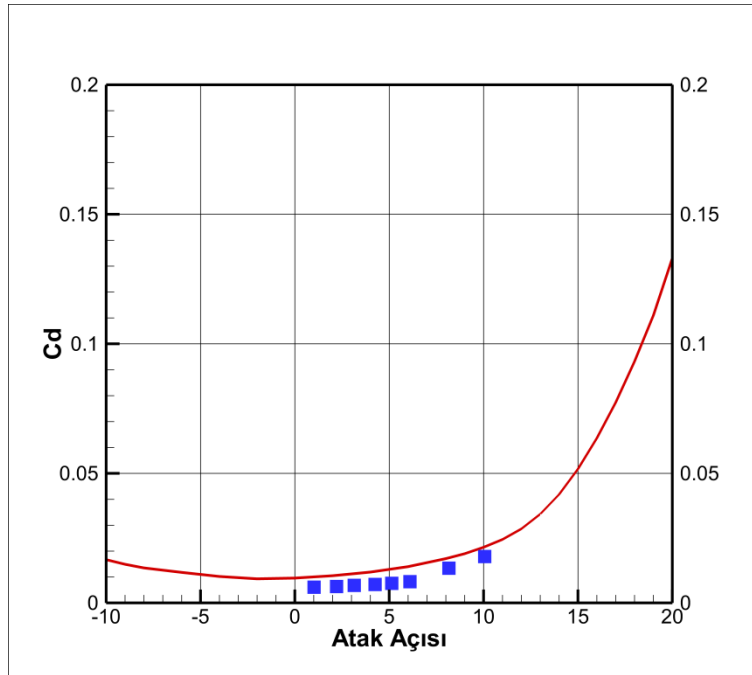
**Şekil 4.** NACA 63-418 kanat profilinin  $-10$  (sol) ve  $20$  (sağ) derecelik hücum açıları için yapılan analizlerin yakınsama grafiği (düz yeşil çizgi taşıma kuvveti katsayısını gösterirken, kesik mavi çizgi sürüklenme kuvveti katsayısını.)

Taşıma kuvveti ve sürüklenme kuvveti katsayılarının hücum açısına göre değişimi Şekil 5 ve 6'da sırasıyla verilmektedir. Hesaplama sonuçları, literatürden elde edilen deneysel veriler [1] ile karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Grafiklerden anlaşıldığı üzere, NACA 63-418  $14^\circ$  lik tutunma kaybı açısına ve 1.5 değerindeki maksimum taşıma kuvveti katsayısına sahiptir. Tutunma kaybı açısına kadar, hesaplama sonuçları deney verileri ile uyum içinde görünmektedir. Fakat tutunma kaybı açısında, HAD analizi sonuçlarına göre maksimum taşıma kuvveti katsayısı daha yüksek çıkmaktadır. Ayrıca, Şekil 6 incelendiğinde, yaklaşık olarak tutunma kaybı açısından sonra sürüklenme kuvveti katsayısında hızlı bir artış gözlenmektedir.

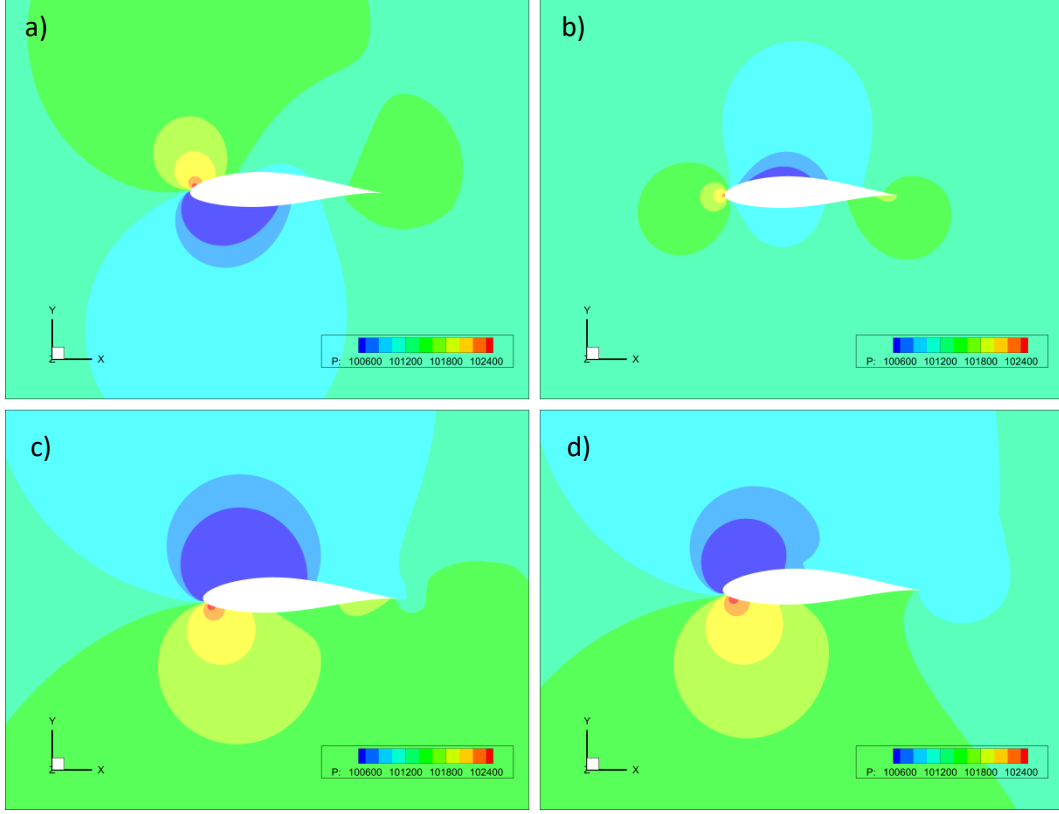
Şekil 7, 8, 9 ve 10'da, kanat profili etrafındaki akış alanı farklı hücum açıları için verilmiştir. Şekillerde sırasıyla basınç dağılımı, akış hızı büyüklükleri ile birlikte akış çizgileri ve girdap şiddeti dağılımı gösterilmektedir. Sonuçlar  $-10^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $14^\circ$  (tutunma kaybı açısı) ve  $20^\circ$  hücum açıları için elde edilmiştir.  $-10^\circ$  ve  $0^\circ$ 'de akış kanat profili etrafında yumuşak bir geçiş yaparken, daha büyük hücum açılarında akışta ayrılmalar oluşur ve bu akış kopmaları ve girdaplı bölgeler hücum açısı ile birlikte büyümektedir.



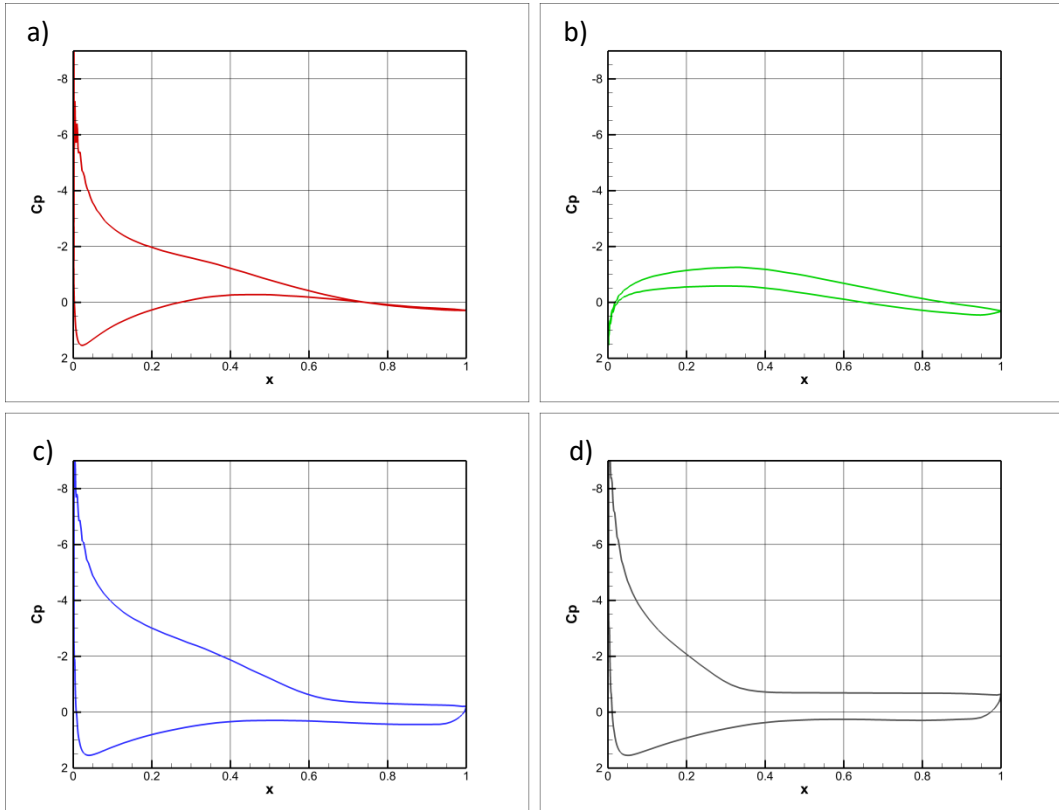
Şekil 5. NACA 63-418 kanat profili için taşıma kuvveti katsayısının hücum açısına göre değişimi (kare sembol: deneysel veri [1]).



Şekil 6. NACA 63-418 kanat profili için sürüklenme kuvveti katsayısının hücum açısına göre değişimi (kare sembol: deneysel veri [1]).

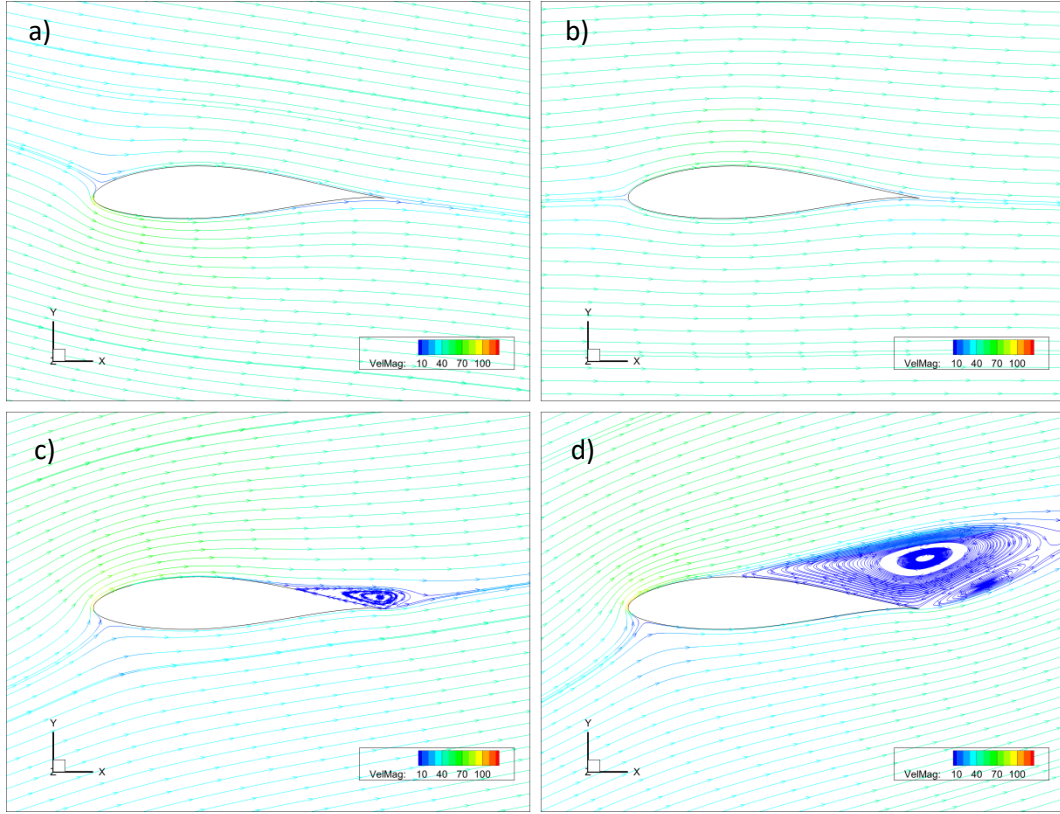


Şekil 7. NACA 63-418 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan basınç dağılımları  
a)  $AoA = -10^\circ$ , b)  $AoA = 0^\circ$ , c)  $AoA = 14^\circ$ , d)  $AoA = 20^\circ$

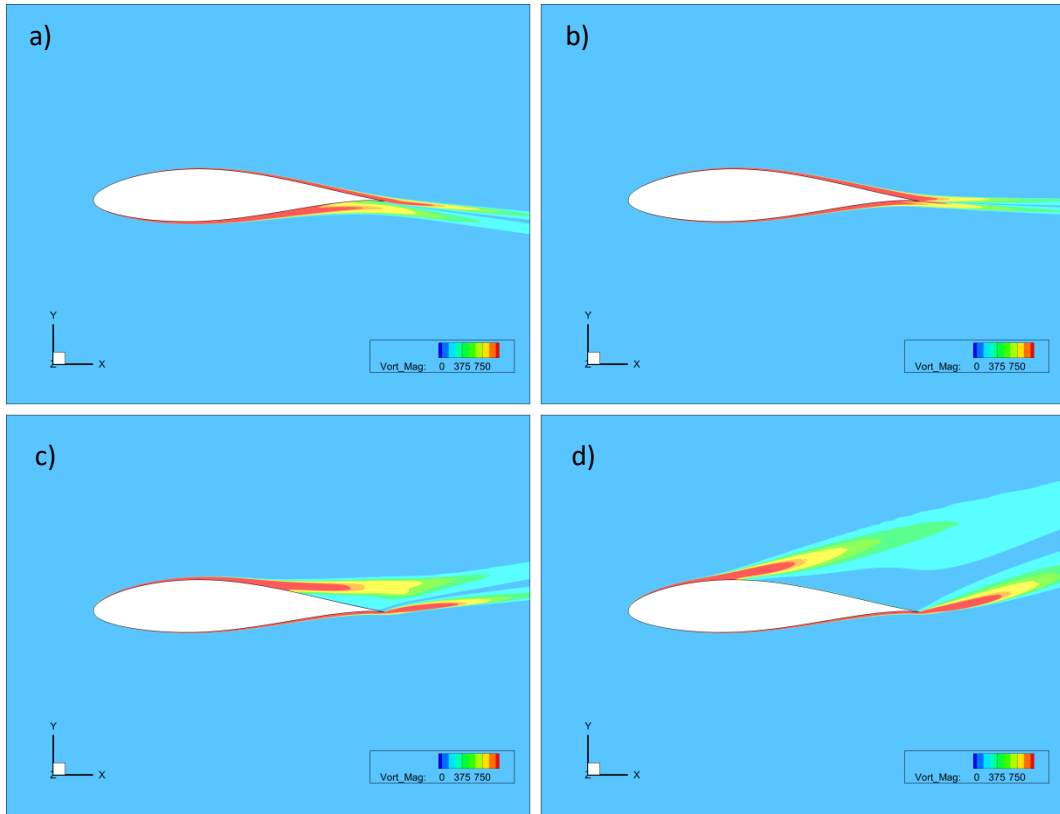


Şekil 8. NACA 63-418 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan basınç katsayısı dağılımları  
a)  $AoA = -10^\circ$ , b)  $AoA = 0^\circ$ , c)  $AoA = 14^\circ$ , d)  $AoA = 20^\circ$





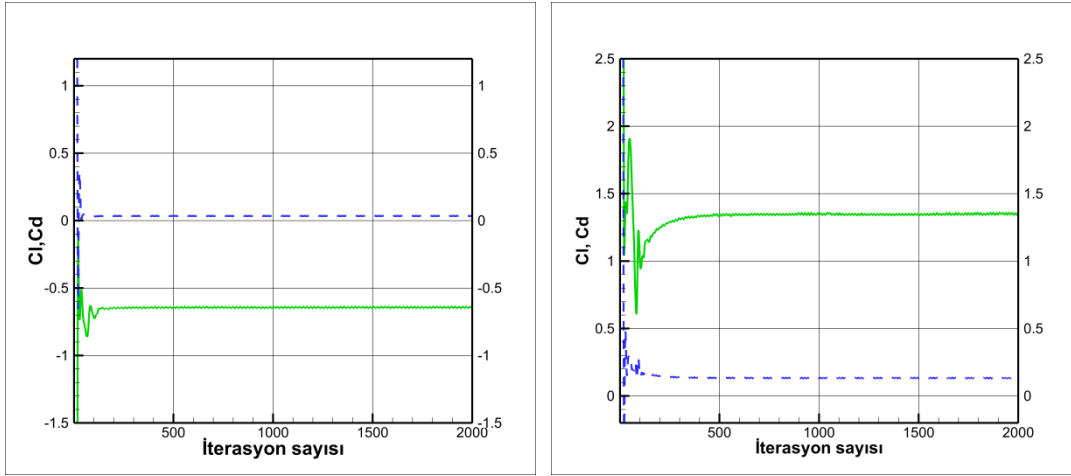
**Şekil 9.** NACA 63-418 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan akış çizgileri ve akış hızı büyüklükleri a) AoA=  $-10^\circ$ , b) AoA=  $0^\circ$ , c) AoA=  $14^\circ$ , d) AoA=  $20^\circ$



**Şekil 10.** NACA 63-418 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan girdap şiddeti dağılımı a) AoA=  $-10^\circ$ , b) AoA=  $0^\circ$ , c) AoA=  $14^\circ$ , d) AoA=  $20^\circ$

### **DU91-W2-250 Kanat Profili**

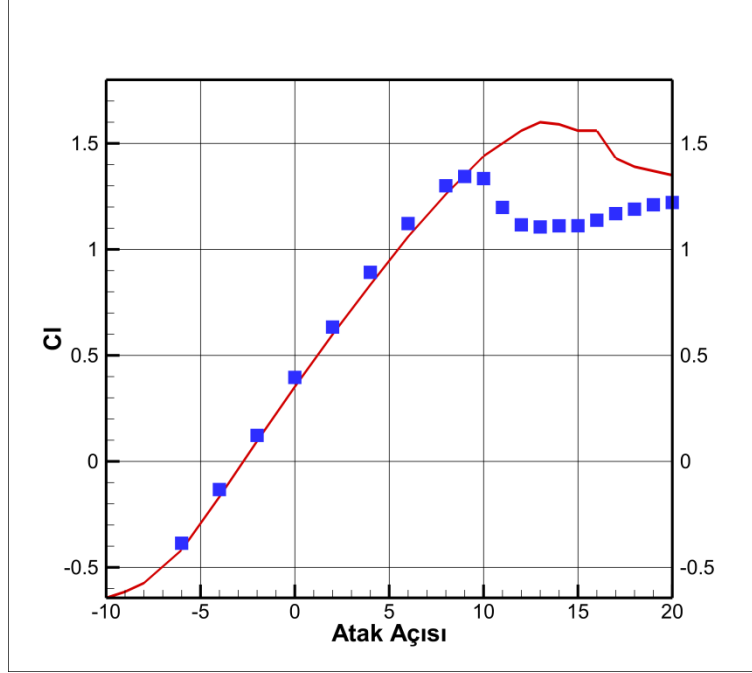
DU91-W2-250 kanat profili için elde edilen yakınsama grafikleri Şekil 11’de verilmektedir. Aynı NACA 63-418 profilinde olduğu gibi, yakınsama hücum açısı arttıkça daha fazla adımdan sonra gerçekleşmektedir. Bu durum, akıştaki ayrılmanın profilin hücum kenarına doğru gelmekte olduğunu göstermektedir. Erken ayrılan akış kanat profili etrafındaki akışı dengesiz yapmaktadır. Bu yüzden, yakınsama elde edildikten sonra dahi kuvvet katsayılarında küçük salınımlar gözlemlenebilir. NACA 63-418 kanat profili ile karşılaştırıldığında, DU91-W2-250 daha kalın bir kanat profilidir.



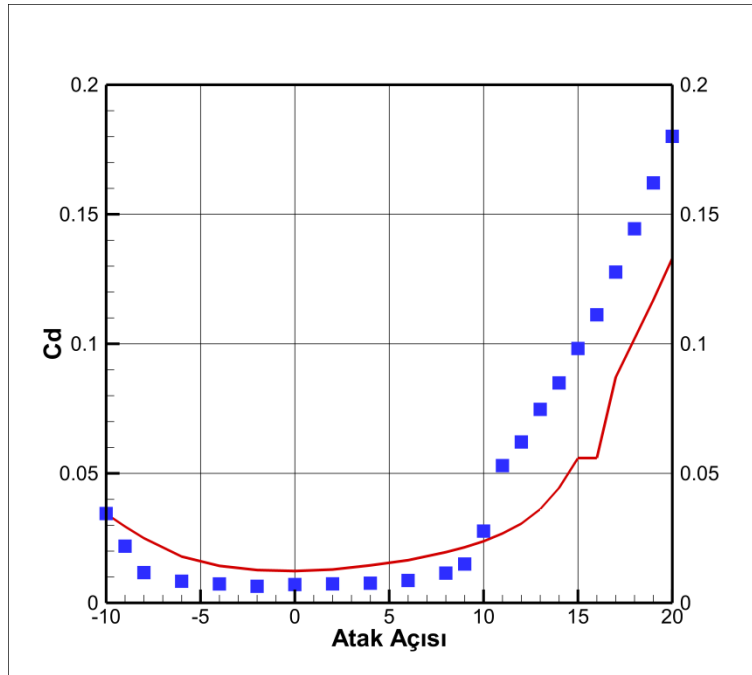
**Şekil 11.** DU91-W2-250 kanat profilinin -10 (sol) ve 20 (sağ) derecelik hücum açıları için yapılan analizlerin yakınsama grafiği (düz yeşil çizgi taşıma kuvveti katsayısını gösterirken, kesik mavi çizgi sürüklenme kuvveti katsayısını göstermektedir.)

Taşıma kuvveti ve sürüklenme kuvveti katsayılarının hücum açısına göre değişimi Şekil 12 ve 13’de sırasıyla gösterilmektedir. NACA 63-418 profilinin analizlerinde olduğu gibi, deneysel veriler [11] ile karşılaştırıldığında HAD analizlerinde maksimum taşıma kuvveti katsayısı fazla çıkmıştır. Ayrıca, tutunma kaybı açısından da bir erteleme söz konusudur. Deneylere göre tutunma kaybı açısı  $9^{\circ}$  –  $10^{\circ}$  arasında çıkmışken, HAD analizlerinde  $13^{\circ}$  olarak bulunmuştur. Tutunma kaybı yaşandıktan sonra, taşıma kuvveti katsayısında, NACA 63-418 profiline oranla ani bir düşüş yaşanmaktadır. Bu durum sürüklenme kuvveti katsayısındaki hızlı artışı da etkilemektedir. Küçük ve orta değerlerdeki hücum açıları akış daha düzenli olduğu için taşıma kuvveti katsayısı lineere yakın değişim gösterirken, sürüklenme kuvveti katsayısı hemen hemen sabit kalmaktadır. Fakat daha yüksek hücum açıları ise akış daha düzensiz olduğu için taşıma kuvveti katsayısındaki artış yavaşlar ve hücum açısı arttıkça azalırken, sürüklenme kuvveti katsayısındaki artışlar ise çok hızlanmaktadır.

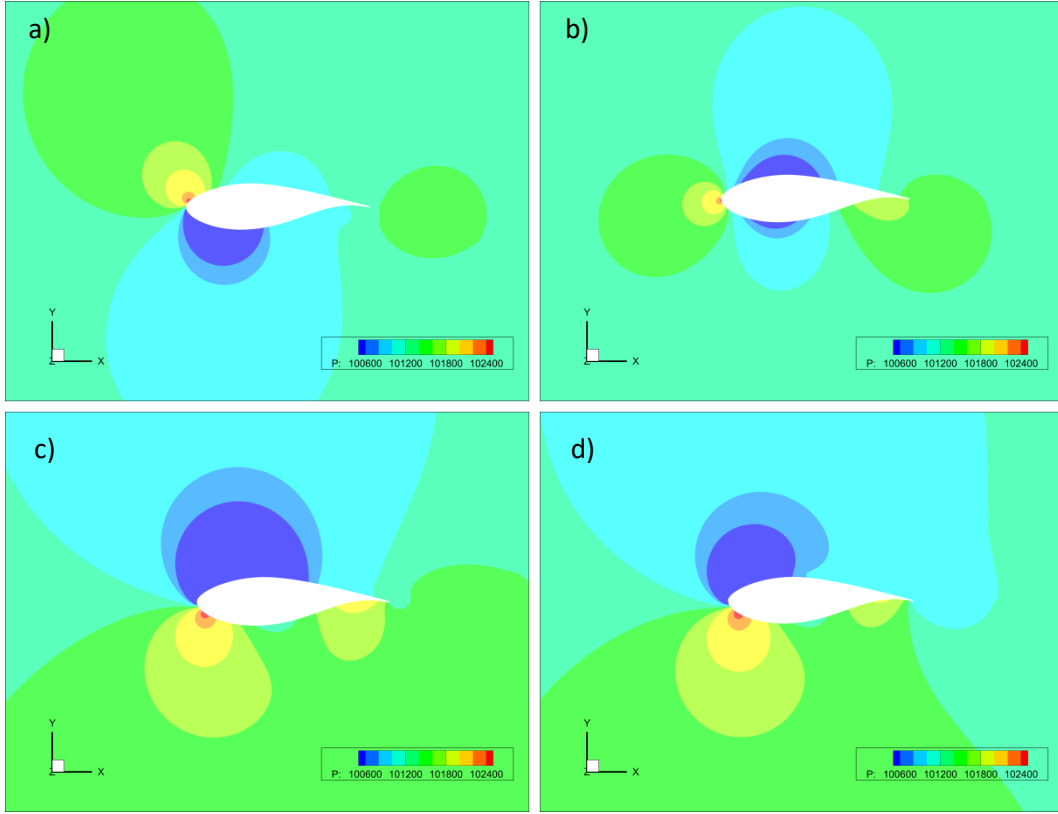
DU91-W2-250 kanat profili etrafında oluşan akış alanı üzerindeki basınç dağılımı,  $-10^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$ ,  $13^{\circ}$  (tutunma kaybı açısı) ve  $20^{\circ}$ ’lerdeki hücum açıları için Şekil 14’de verilmektedir. Şekil 15’de ise DU91-W2-250 kanat profili üzerindeki basınç katsayılarının dağılımı verilmektedir. Akış NACA 63-418’in etrafında daha yumuşak bir geçiş yaşarken, DU91-W2-250’nin alt yüzeyinde akışın geniş bir döngü bölgesi vardır ve bu girdaplı bölge Şekil 16’da görülebilmektedir. Şekil 17’de akış alanı içerisindeki girdap şiddeti dağılımı ve akış kopmaları gözlemlenmektedir. NACA 63-418 profilinin aksine,  $-10^{\circ}$ ’lik hücum açısında dahi DU91-W2-250 kanat profilinin alt yüzeyinde yüksek değerli girdap bölgesi oluşmaktadır. Bir başka deyişle, DU91-W2-250’nin etrafındaki akış, negatif ve düşük değerlerdeki hücum açıları için daha fazla ayrılmaya elverişlidir.



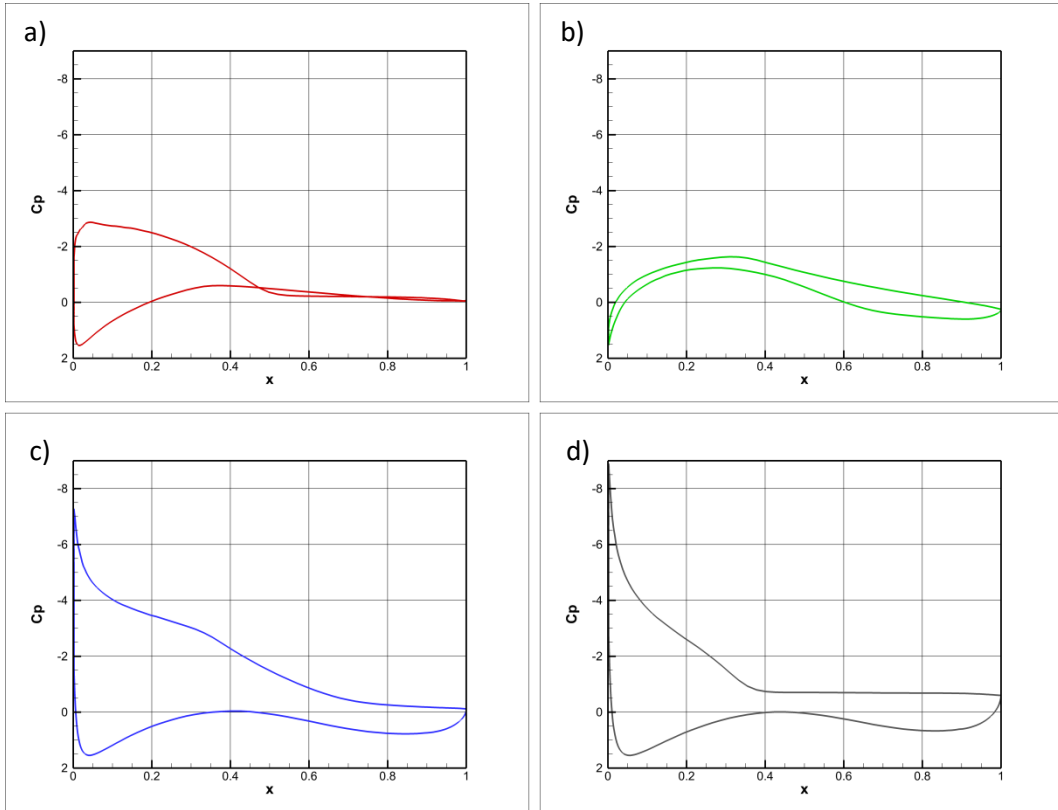
Şekil 12. DU91-W2-250 kanat profili için taşıma kuvveti katsayısının hücum açısına göre değişimi (kare sembol: deneysel veri [11]).



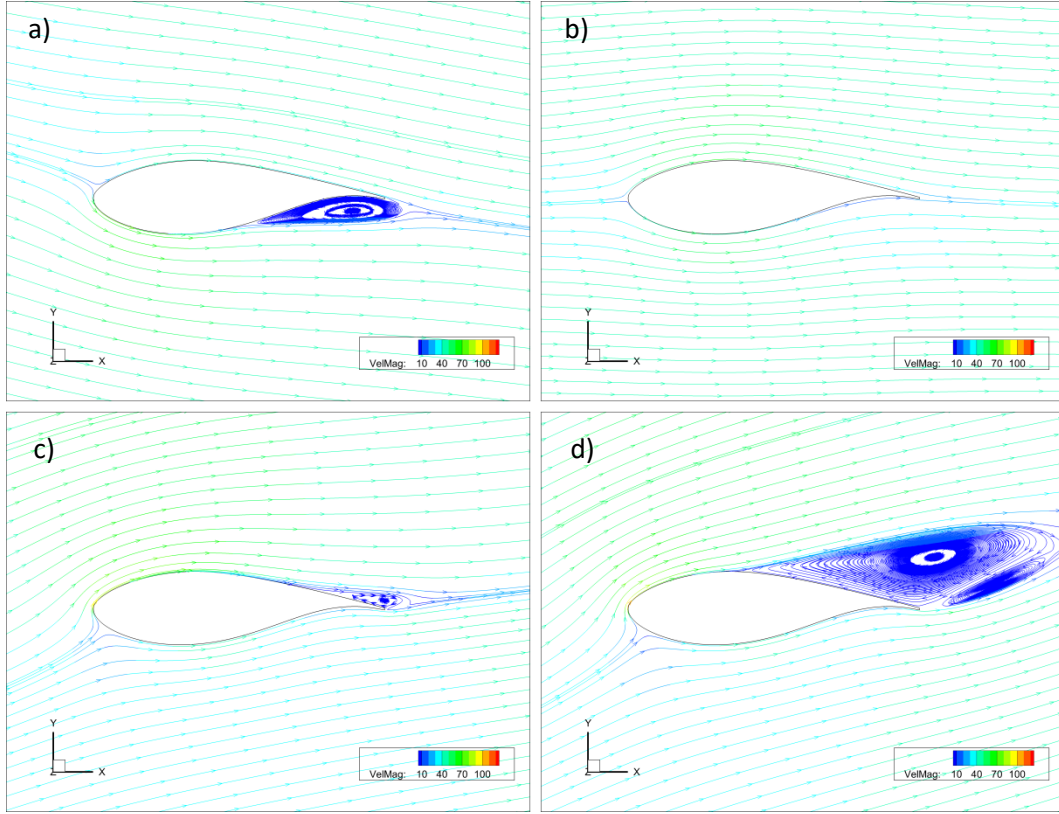
Şekil 13. DU91-W2-250 kanat profili için sürüklenme kuvveti katsayısının hücum açısına göre değişimi (kare sembol: deneysel veri [11]).



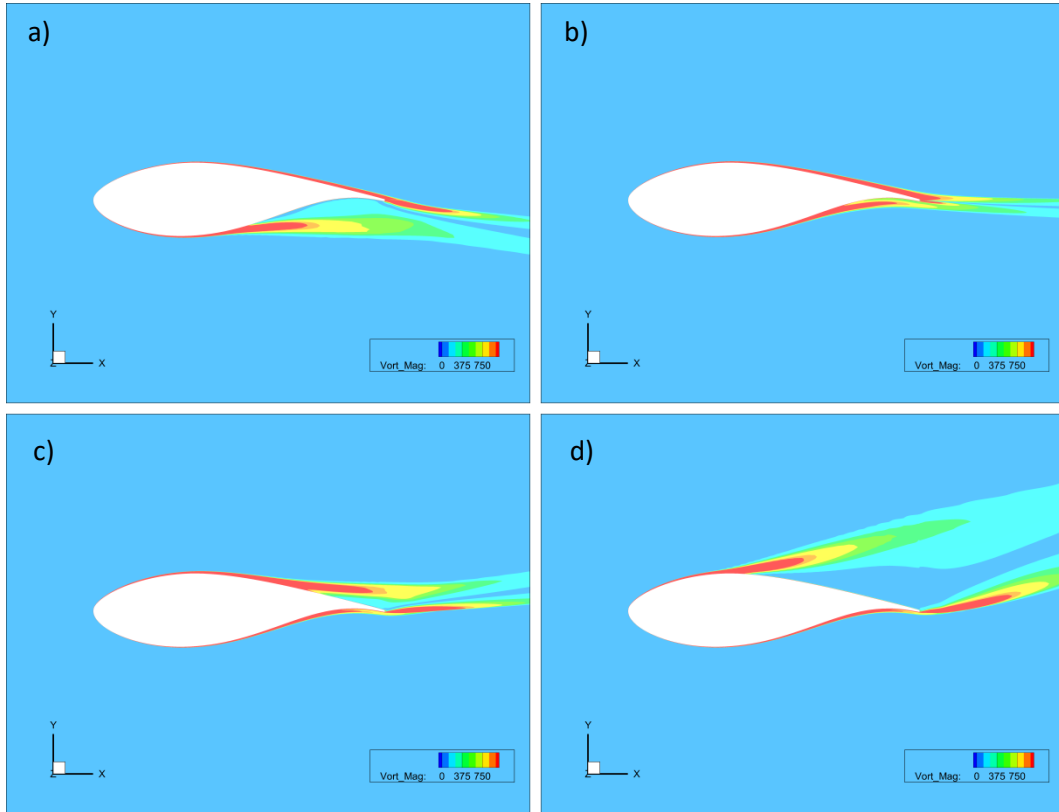
Şekil 14. DU91-W2-250 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan basınç dağılımları  
a)  $AoA = -10^\circ$ , b)  $AoA = 0^\circ$ , c)  $AoA = 13^\circ$ , d)  $AoA = 20^\circ$



Şekil 15. DU91-W2-250 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan basınç katsayısı dağılımları  
a)  $AoA = -10^\circ$ , b)  $AoA = 0^\circ$ , c)  $AoA = 13^\circ$ , d)  $AoA = 20^\circ$



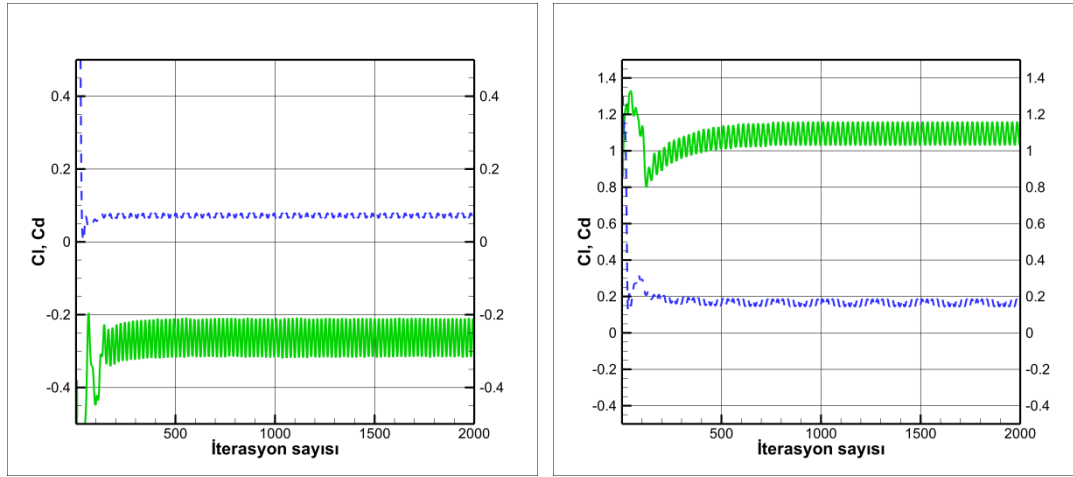
**Şekil 16.** DU91-W2-250 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan akış çizgileri ve akış hızı büyüklükleri a)  $AoA = -10^\circ$ , b)  $AoA = 0^\circ$ , c)  $AoA = 13^\circ$ , d)  $AoA = 20^\circ$



**Şekil 17.** DU91-W2-250 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan girdap şiddeti dağılımı a)  $AoA = -10^\circ$ , b)  $AoA = 0^\circ$ , c)  $AoA = 13^\circ$ , d)  $AoA = 20^\circ$

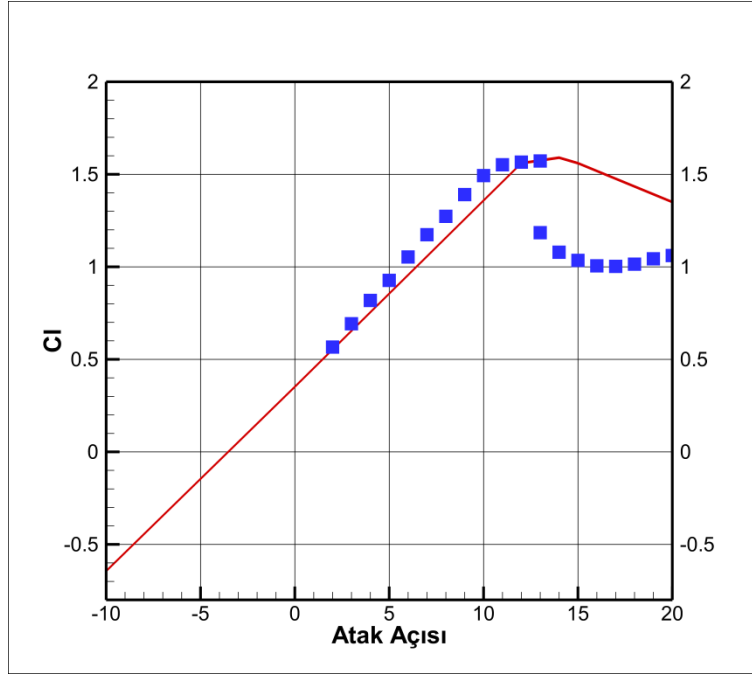
### **DU97-W-300 Kanat Profili**

DU97-W-300 kanat profili etrafındaki akışı incelemek için yapılan daimi durum analizleri sonucunda elde edilen yakınsama grafikleri Şekil 18’de hücum açıları  $-10^\circ$  ve  $20^\circ$  için verilmektedir. Şekil 18’de görüldüğü üzere, kuvvet katsayıları etrafındaki salınımlar,  $-10^\circ$ ’lik hücum açısında bile görülebilmektedir. Bu durum akışın küt cisimler etrafında zamana bağlı kopmalı olması ile açıklanabilir. Zamanla değişen akış ayrılması diğer kanat profillerinde yüksek hücum açılarında görülürken, DU97-W-300 kanat profilinde küçük hücum açılarında bile zamana göre değişen ayrılmış akış alanları bulunmaktadır. Bu yüzden, bu kanat profilinin etrafındaki akış alanını anlayabilmek için zamana bağlı (daimi olmayan) sıkıştırılabilir akış analizleri yürütülmelidir.

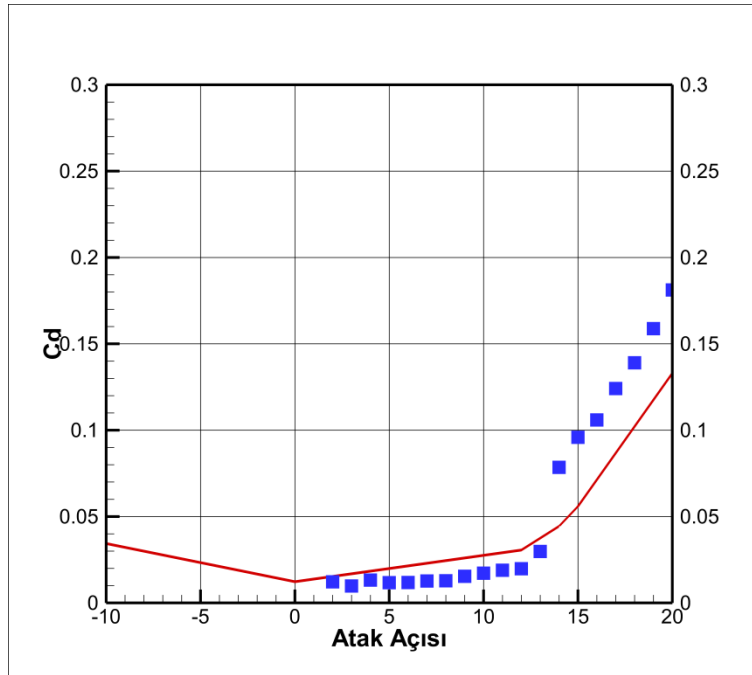


**Şekil 18.** DU97-W-300 kanat profilinin  $-10$  (sol) ve  $20$  (sağ) derecelik hücum açıları için yapılan analizlerin yakınsama grafiği (düz yeşil çizgi taşıma kuvveti katsayısını gösterirken, kesik mavi çizgi sürüklenme kuvveti katsayısını göstermektedir.)

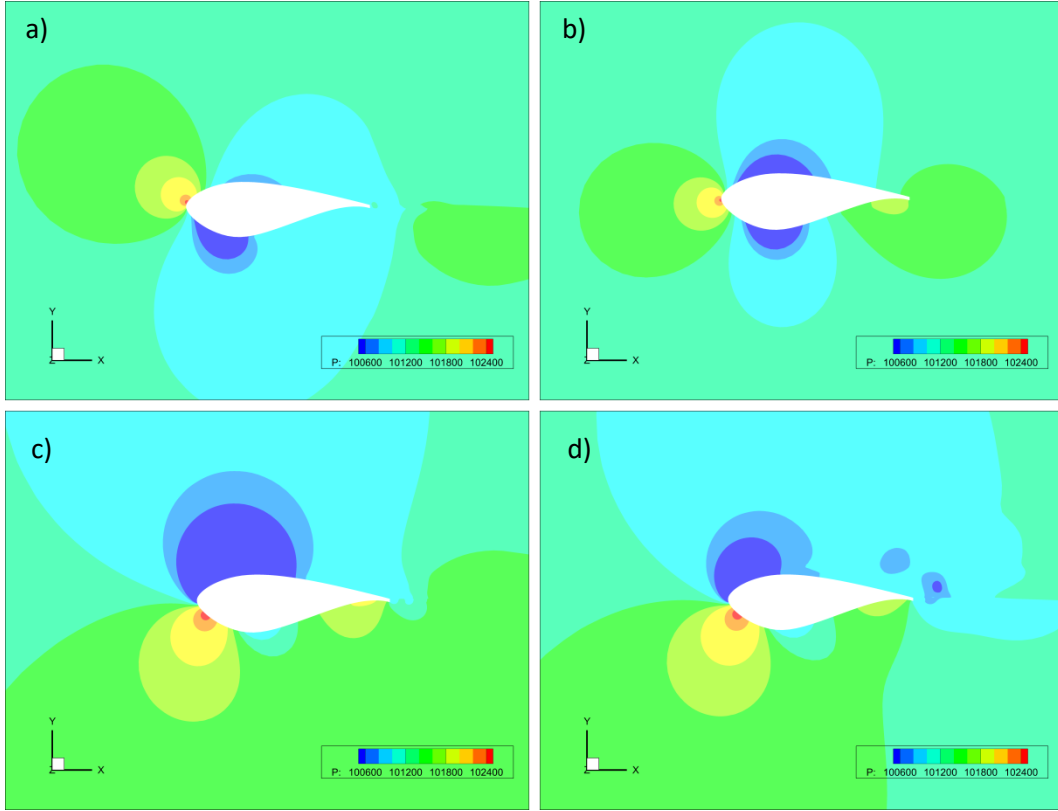
DU97-W-300 kanat profili etrafında oluşan akış alanı üzerindeki basınç dağılımı ve basınç katsayısı dağılımları,  $-10^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $14^\circ$  (tutunma kaybı açısı) ve  $20^\circ$ ’lerdeki hücum açıları için Şekil 21 ve 22’de sırasıyla verilmektedir. Şekil 23’de akış çizgileri gözlemlenmektedir. Oldukça kalın bir kanat profili olan DU 97-W-300’ün alt yüzeyinde negatif hücum açısında geniş bir döngü bölgesi oluşmaktadır. Diğer profillere göre daha küt profile sahip olduğu için, akış ayrılması daha geniş bir alanda görülebilmektedir. Girdap şiddeti dağılımı ayrıca Şekil 24’de verilmiştir. Profilin kalınlığı arttıkça akışın ayrıldığı bölge, hücum kenarına doğru yaklaşmakta ve hücum açısı arttıkça akış kopmakta ve zamanla değişen girdaplı, türbülanslı bir hal almaktadır. Daha önce bahsedildiği üzere, bu tarz akış problemleri daimi olmayan yani zaman bağlı HAD simülasyonları gerektirmektedir.



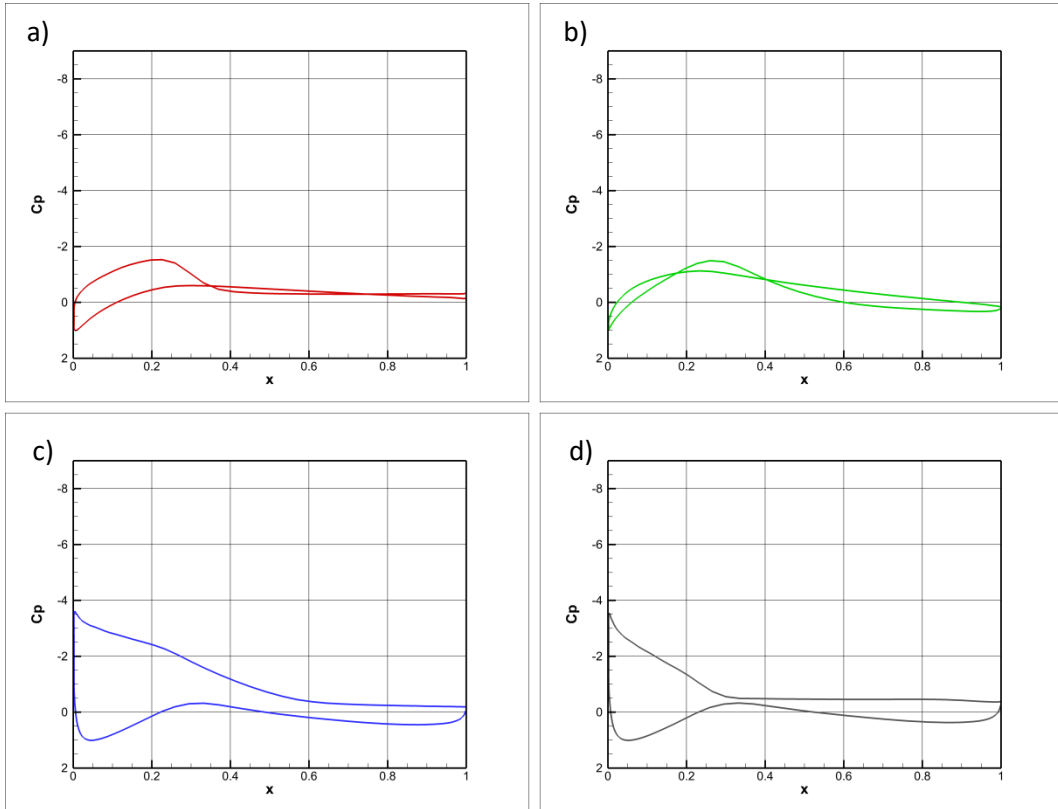
Şekil 19. DU97-W-300 kanat profili için taşıma kuvveti katsayısının hücum açısına göre değişimi (kare sembol: deneysel veri [13]).



Şekil 20. DU97-W-300 kanat profili için sürüklenme kuvveti katsayısının hücum açısına göre değişimi (kare sembol: deneysel veri [13]).

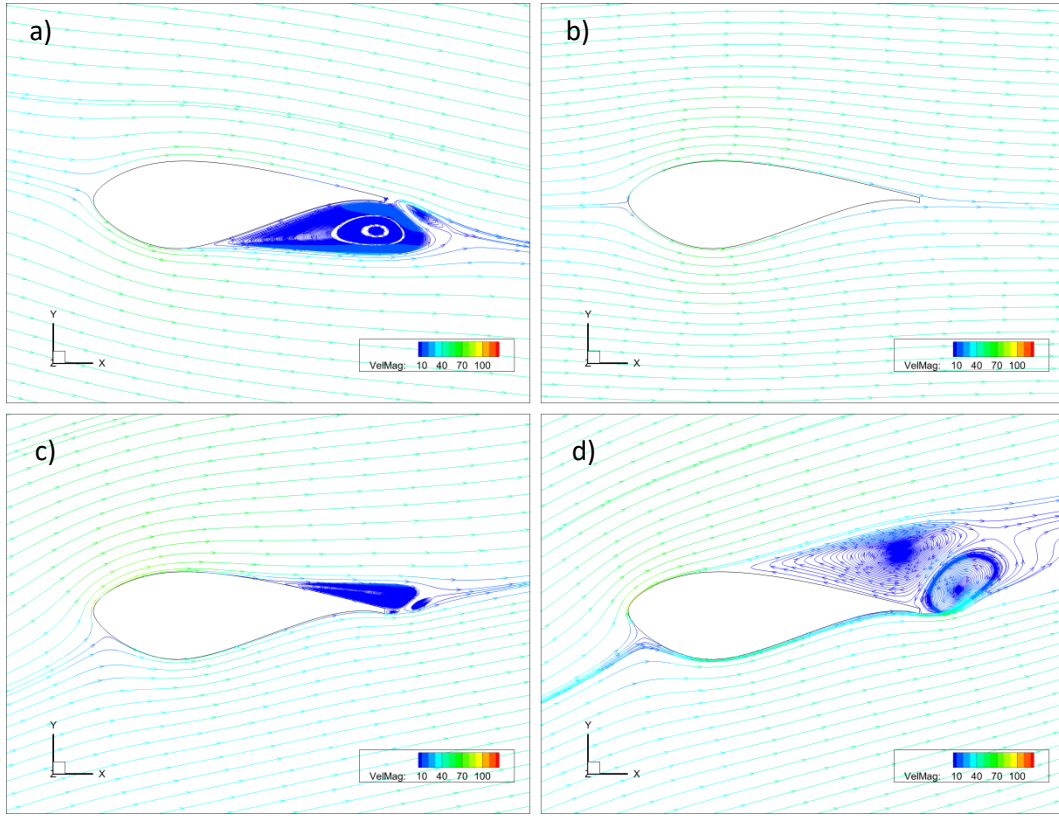


Şekil 21. DU97-W-300 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan basınç dağılımları  
a)  $AoA = -10^\circ$ , b)  $AoA = 0^\circ$ , c)  $AoA = 14^\circ$ , d)  $AoA = 20^\circ$

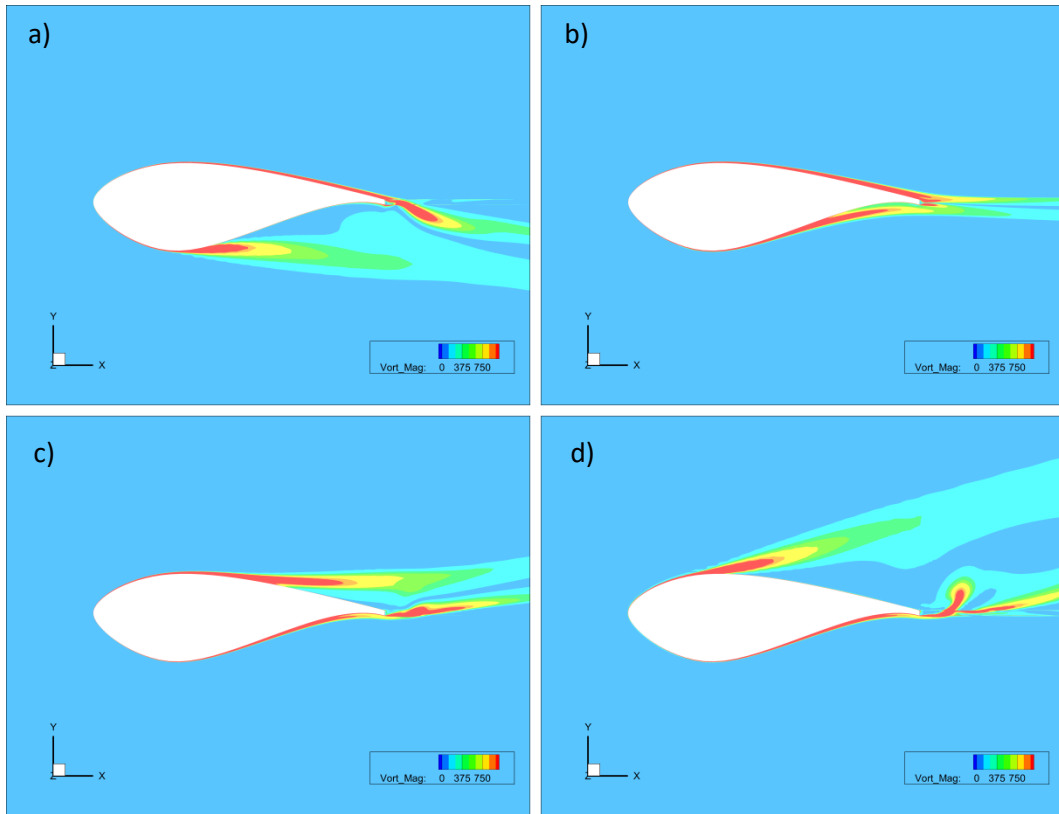


Şekil 22. DU97-W-300 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan basınç katsayısı dağılımları  
a)  $AoA = -10^\circ$ , b)  $AoA = 0^\circ$ , c)  $AoA = 14^\circ$ , d)  $AoA = 20^\circ$





Şekil 23. DU97-W-300 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan akış çizgileri ve akış hızı büyüklükleri a) AoA=  $-10^\circ$ , b) AoA=  $0^\circ$ , c) AoA=  $14^\circ$ , d) AoA=  $20^\circ$



Şekil 24. DU97-W-300 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan girdap şiddeti dağılımı a) AoA=  $-10^\circ$ , b) AoA=  $0^\circ$ , c) AoA=  $14^\circ$ , d) AoA=  $20^\circ$

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, rüzgar türbini rotorlarında tercih edilen kalın kanat profillerinden NACA 63-418, DU91-W2-250 ve DU97-W-300 profilleri etrafındaki akış alanları için farklı hücum açıları için HAD simülasyonları yapılmıştır. Kanat profilleri etrafındaki akış alanları, daimi durum simülasyonları ile incelenmiş olup, analizlerden elde edilmiş veriler literatürde mevcut olan deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, akışın kanat profilleri etrafındaki davranışının, profillerin aerodinamik performansı üzerine olan etkisi de birbirleri ile karşılaştırılmalı olarak tartışılmıştır. NACA 63-418 ve DU 91-W2-250 profilleri daimi durum simülasyonlarında iyi sonuçlar verirken, göreceli olarak daha kalın ve firar kenarı küt bir kanat profili olan DU 97-W-300 için daimi durum simülasyonlarında istenen daimi sonuçlar elde edilememiştir. Bu profilin etrafındaki akışı inceleyebilmek için zamana bağlı HAD simülasyonlarını yapılması ve anlık ve ortalama değerlerin incelenmesi gerekmektedir.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışmadaki HAD simülasyonları ODTÜ RÜZGEM Yüksek Başarımlı Hesaplama Laboratuvarı paralel öbek bilgisayarlarında yapılmıştır.

#### KAYNAKLAR

- [1] Bertagnolio, F., Sørensen, N. N., Johansen, J., & Fuglsang, P., 2001. *Wind turbine airfoil catalogue*. Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R, No. 1280(EN)
- [2] Timmer, W. A., & Rooij, R. P. J. O. M., 2003. Summary of the Delft University wind turbine dedicated airfoils. In *41st aerospace sciences meeting and exhibit* (s. 352).
- [3] Van Rooij, R. P. J. O. M., & Timmer, W. A., 2003, January. Roughness sensitivity considerations for thick rotor blade airfoils. In *ASME 2003 Wind Energy Symposium*, American Society of Mechanical Engineers. (s. 22-31)
- [4] Velte, C. M., Hansen, M. O. L., Meyer, K. E., & Fuglsang, P., 2008. Evaluation of the Performance of Vortex Generators on the DU 91-W2-250 Profile using Stereoscopic PIV. In *International Symposium on Energy, Informatics and Cybernetics: Focus Symposium in the 12th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI 2008)*.
- [5] Barone, M., & Berg, D., 2009. Aerodynamic and aeroacoustic properties of a flatback airfoil: an update. In *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, s. 271.
- [6] Bechmann, A., Sørensen, N. N., & Zahle, F., 2011. CFD simulations of the MEXICO rotor. *Wind Energy*, 14(5), s. 677-689.
- [7] Lago, L. I., Ponta, F. L., & Otero, A. D., 2013. Analysis of alternative adaptive geometrical configurations for the NREL-5 MW wind turbine blade. *Renewable Energy*, 59, s. 13-22.
- [8] Fischer, G. R., Kipouros, T., & Savill, A. M., 2014. Multi-objective optimisation of horizontal axis wind turbine structure and energy production using aerofoil and blade properties as design variables. *Renewable Energy*, 62, s. 506-515.
- [9] Yang, Y., Li, C., Zhang, W., Yang, J., Ye, Z., Miao, W., & Ye, K., 2016. A multi-objective optimization for HAWT blades design by considering structural strength. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(8), s. 3693-3703.
- [10] Cakmakcioglu, S. C., Sert, I. O., Tugluk, O., & Sezer-Uzol, N., 2014. 2-D and 3-D CFD investigation of NREL S826 airfoil at low Reynolds numbers. In *Journal of Physics: Conference Series*(Vol. 524, No. 1, p. 012028). IOP Publishing.
- [11] Gao, L., Zhang, H., Liu, Y., & Han, S., 2015. Effects of vortex generators on a blunt trailing-edge airfoil for wind turbines. *Renewable Energy*, 76, s. 303-311.

- [12] **Özçakmak, Ö. S., Madsen, H. A., Sørensen, N. N., Sørensen, J. N., Fischer, A., & Bak, C.**, 2018, June. Inflow Turbulence and Leading Edge Roughness Effects on Laminar-Turbulent Transition on NACA 63-418 Airfoil. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1037, No. 2, s. 022005). IOP Publishing.
- [13] **Rogowski, K., Hansen, M. O. L., Hansen, R., Piechna, J., & Lichota, P.**, 2018, June. Detached Eddy Simulation Model for the DU-91-W2-250 Airfoil. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1037, No. 2, s. 022019). IOP Publishing.
- [14] **Li, S., Zhang, L., Yang, K., Xu, J., & Li, X.**, 2018. Aerodynamic Performance of Wind Turbine Airfoil DU 91-W2-250 under Dynamic Stall. *Applied Sciences*, 8(7), s. 1111.
- [15] CFD++ Software, <http://www.metacomptech.com/index.php/features/icfd>
- [16] Pointwise Software, <https://www.pointwise.com/>
- [17] Airfoil Tools, <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca633418-il>