RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT KESİTİ İÇİN YÜKSEK REYNOLDS SAYILARINDA ÇÖZÜM AĞI BAĞIMSIZLIK ÇALIŞMASI

Ezgi Orbay Akcengiz¹, Doç. Dr. Nilay Sezer Uzol²

^{1,2}Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Ankara ^{1,2} ODTÜ RÜZGEM, Ankara ¹eorbay@metu.edu.tr, ²nuzol@metu.edu.tr

ÖZET

Bu bildiride rüzgar türbini kanatlarında kullanılan kalın kanat profillerinden DU 00-W-212 profilinin 3 farklı yüksek Reynolds sayısı (3, 6 ve 9 milyon) için aerodinamik performansı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. 2-boyutlu O-tipi yapısal çözüm ağı kullanarak RANS denklemleri k- ω SST türbülans modeli ile çözülmüştür. Çözüm ağıkarakteristiğinden kaynaklanan numerik hataları en aza indirmek için çözüm ağı bağımsızlık çalışması yapılmış, 9 farklı çözüm ağı üretilmiştir. Sonuçlar ayrıca literatürdeki mevcut yüksek Reynolds sayılı deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

1. GİRİŞ

Rüzgâr türbini rotorlarının aerodinamik tasarımı genellikle hızlı pala elemanı momentum teorisi (BEM) analizlerine dayanmaktadır. Bu analizlerde geniş bir Reynolds sayısı (Re) aralığı için tüm hücum açısı aralığında (–180°, +180°), doğru taşıma ve sürükleme kuvveti verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Tipik modern ve doğrusal olmayan bükülme ve daralma oranına sahip rüzgâr türbini kanatları için, çoğunlukla yarıçap uzunluğundaki pala boyunca bir kanat profili (airfoil) ailesinin dağılımı kullanılmaktadır. Kanat kesiti (airfoil) aerodinamik özellikleri, genellikle hem kanat profili tasarımı hem de kanat şekli tasarım süreçleri sırasında sayısal simülasyonlar ve rüzgâr tüneli testlerinin bir kombinasyonu ile elde edilir. Sınırlı Reynolds sayısı (Re) aralıklarında rüzgâr tüneli verilerinin sınırlı mevcudiyeti nedeniyle, doğru sayısal sonuçların elde edilmesi hayati önem taşımaktadır.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği simülasyonlarında, 3 önemli unsur vardır: sayısal çözüm yaklaşımları, türbülans modelleri ve çözüm ağı özellikleri. 2 ve 3 boyutlu analizler Reynolds-Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) veya Büyük Girdap Simülasyonları (LES) denklemlerinin daimî durum ya da zamana bağlı çözülmeleri ile elde edilmektedir. Bu analizlerde, çeşitli türbülans modelleri tercih edilebilir. RANS analizleri için genellikle Spalart-Allmaras (SA), k- ω SST ve Realizable k- ε türbülans modelleri kullanılırken, bazı durumlarda hibrit RANS-LES, Ayrık Girdap Simülasyonları (DES), türbülans modelleri de tercih edilebilir. Diğer bir önemli unsur olan çözüm ağında, yapılı ve yapısız çözüm ağları, hibrit çözüm ağları, blok-yapısal veya çoklu-blok çözüm ağları kullanılabilir. 2 boyutlu analizler için O-tipi, C-tipi veya CH-tipi çözüm alanları oluşturulurken, 3 boyutlu çözüm alanları, 2 boyutlu çözüm alanlarının kanat açıklığı yönünde uzatılması ile elde edilir.

Literatürde, rüzgâr türbinlerinde kullanılan kalın kanat profilleri için bir çok sayısal ve deneysel çalışma bulunmaktadır. Çizelge 1'de literatürdeki çalışmaların kısa bir özeti verilmiştir. Baldacchino [1] iki farklı kanat kesitinin aerodinamik performansını, farklı HAD çözücülerinde sıkıştırılamayan RANS denklemleri çözerek incelemiştir. SST türbülans modelini hem geçiş modeli ile hem de tam türbülanslı olarak kullanmıştır. Bangga [2,3], zamana bağlı RANS ve Gecikmeli-Ayrık Girdap Simülasyonu (DDES) yöntemlerini kullanarak kalın kanat profillerinin

yüksek Reynolds sayılarındaki akış özelliklerinin üzerinde çalışmıştır. 2009 yılında Barone [4] DU 97-W-300 etrafindaki akışı çözerken daimî durum RANS denklemlerini kullanmış, aynı kanat kesiti daha sonra farklı kalın profiller ile birlikte Xu [12] tarafından 2012 yılında zamana bağlı RANS denklemleri çözülerek incelenmiştir. FFA kanat kesiti ailesi de birçok farklı araştırmacı tarafından çalışılmıştır [5,8,10]. Campobasso [5] ve Sorenson [10] daimî durum RANS yöntemini tercih ederken, Propathopoulos [8] hem daimi durum hem de zamana bağlı RANS denklemlerini çözmüştür. DU 00-W-212 kanat kesiti etrafındaki akış, HAD analizleri kullanılarak 2016 yılında Sorenson [11] ve 2017 yılında Colonia [6] tarafından incelenmiştir. 2016 yılındaki çalışmada farklı HAD çözücülerinin performansı Sorenson vd. [11] tarafından karşılaştırılmıştır. Rogowksi [9] ve Zahle [13] daimî durum RANS denklemlerini kullanarak, ve Lehmkuhl [7] zamana bağlı LES denklemlerini kullanarak DU 93-W-210, DU 91-W2-250 ve FX-77-W-500 kanat kesitlerinin aerodinamik performansını incelemiştir.

| Yazar | Kanat Profili | Reynolds Sayısı (x10 ⁶)2 | | |
|---------------------------|--|---|--|--|
| Baldacchino, 2016 [1] | DU 97-W-300 | | | |
| Bangga, 2018 [2] | DU 00-W2-401 | 3 | | |
| Bangga, 2018 [3] | DU 91-W2-250, DU 97-W-300, DU 00-W2-350, DU 00-W2-401 | 3, 17.6 | | |
| Barone, 2009 [4] | DU 97-W-300 | 3 | | |
| Campobasso, 2008 [5] | FFA-W3-241 | 1.6 | | |
| Colonia, 2017 [6] | DU 00-w-212 | 3, 9, 15 | | |
| Lehmkuhl, 2014 [7] | DU 93-W-210, DU 91-W2-250, FX-77-W-500 | 3 | | |
| Prospathopoulos, 2014 [8] | FFA-W3-241, FFA-W3-301, FFA-360, NACA 63-018 | 3, 6, 8, 10, 12, 15, 20 | | |
| Rogowski, 2018 [9] | DU 91-W2-250 | 3 | | |
| Sorenson, 2014 [10] | FFA-W3-301, FFA-W3-360 | 3 | | |
| Sorenson, 2016 [11] | DU 00-W-212 | 3, 15 | | |
| Xu, 2014 [12] | DU 91-W2-250, DU 97-W-300, DU 96-W-350 | 3 | | |
| Zahle, 2014 [13] | LRP2-30, LRP2-36 | 3, 6, 9 | | |

Çizelge 1. Literatürdeki rüzgâr türbini kalın kanat profilleri üzerinde yapılan hesaplamalı çalışmalar

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizlerinde, çözüm ağı üretiminin oldukça önemli bir yeri vardır. Sayısal analizlerde, ayrıklaştırıma hataları (discretization errors) temel olarak iki faktörden kaynaklanır: Çözüm alanının ayrıklaştırılması ve çözülen denklemlerin ayrıklaştırılması. Sonlu hacim yöntemleri için uzayda ayrıklaştırına, etki alanının küçük kontrol hacimlerine bölünmesi prosedürü anlamına gelir [14]. Yetersiz ağ çözünürlüğü, ağ eğriliği ve ağ dikeyliğinin simülasyonlar üzerinde önemli bir etkisi vardır. Çözüm ağı özelliklerinden kaynaklanan hataları azaltmak için, HAD analiz sonuçları hesaplama ağından bağımsız olmalıdır. Bu nedenle, doğru simülasyonlar için sistematik bir çözüm ağı duyarlılık analizi yapılmalıdır. Literatürde birçok araştırmacı 2 boyutlu (2B) ve 3 boyutlu (3B) kanat profilleri, 3 boyutlu rüzgâr türbini kanatları, uçak kanatları, helikopter kanatları gibi farklı geometriler ve diğer araştırma alanlarındaki çalışmaları için çözüm ağı bağımsızlık analizlerini anlatmışlardır. Geng [15] NACA 0012 kanat profili için 2B zamana bağlı RANS analizleri yaparak, farklı

çözüm ağı parametrelerinin etkilerini araştırmıştır. Bartl [16] NREL S826 profili için orta değerdeki Reynolds sayılarında hem 2B hem de 3B çözüm ağı bağımsızlık çalışması yürütmüştür. Ağ hücre boyutunun yanı sıra, bazı araştırmacılar [10] uzak alan (farfield) sınırı ile kanat profili arasındaki mesafenin simülasyon sonuçları üzerindeki etkisini de incelemişlerdir. Sorenson vd. [10] Re = $3x10^6$ 'da FFA-W3-301 profili için 2B O-tipi çözüm ağı üretmiş olup, uzak alanı kanat profili yüzeyinden 16 ila 32 veter uzaklığa yerleştirmişlerdir.

Bu bildiride, yüksek Reynolds sayılarında kalın rüzgâr türbini kanat profilinin etrafındaki akış HAD analizleri kullanılarak incelenmiştir. Kanat profili olarak, EU AVATAR projesinde çok büyük boyutlu 10 MW+ rüzgâr türbinleri için kullanılan profillerden biri olan DU 00-W-212 profili tercih edilmiştir. Çizelge 1'de de verildiği üzere, büyük boyutlardaki rüzgâr türbinlerinde kullanılan kalın kanat profilleri için, kanatlardaki bölgesel Reynolds sayısı 20x10⁶'a kadar çıkmaktadır. Yüksek Reynolds sayılarında gerekli deney koşullarını sağlamak zor ve pahalı olduğundan, bu kanat profillerinin aerodinamik performanslarını HAD simülasyonları ile doğru bir şekilde elde etmek oldukça önemlidir. Şekil 1'de DU00-W-212 profilinin geometrisi verilmiştir. Deneysel veriler basınçlandırılmış DNW-HDG rüzgâr tüneli testlerinden alınmıştır. Literatürde, farklı Reynolds sayısı (Re) ve Mach sayısı (M) için 7 tane deney koşulu bulunmaktadır (Çizelge 2). Bu çalışmada, farklı Reynolds sayılarına sahip 3 tane deney koşulu göz önüne alınmıştır; Test 1, Test 2 ve Test 4.



Şekil 1. DU 00-W-212 kanat profilinin birim veter için geometrisi

| Test No | Re | Μ |
|---------|---------------------|-------|
| 1 | 3×10^{6} | 0.075 |
| 2 | $6 \text{ x} 10^6$ | 0.054 |
| 3 | $6 \text{ x} 10^6$ | 0.029 |
| 4 | $9 \text{ x} 10^6$ | 0.082 |
| 5 | $9 \text{ x} 10^6$ | 0.044 |
| 6 | $12 \text{ x} 10^6$ | 0.058 |
| 7 | 15×10^6 | 0.080 |

Cizelge 2. EU AVATAR projesi DU 00-W-212 deney koşulları [17]

2. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ SİMÜLASYONLARI

Bu çalışmada, ticari bir HAD yazılımı olan CFD++ [18] kullanılarak 2B RANS simülasyonları ile sistematik bir çözüm ağı bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Ön koşullandırılma tekniği ile birlikte sıkıştırılabilir Reynolds-Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) simülasyonları yapılmış, k- ω SST türbülans modeli herhangi bir geçiş modeli kullanılmadan uygulanmıştır. 2-boyutlu O tipi yapısal çözüm ağı hesaplama alanı Pointwise [19] yazılımı kullanılarak üretilmiştir. Kanat kesiti yüzeyinde duvar sınır koşulu (kaymazlık koşulu) uygulanmış olup, hesaplama alanın dış kenarları, karakteristik uzak alan sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Aerodinamik analizler, literatürde mevcut olan 3 farklı yüksek Reynolds sayısı (3, 6 ve 9 milyon) için ve 0° ila 20° aralığındaki hücum açıları (Angle of Attack, AoA) için yürütülmüştür. Ayrıca, analizler artık (residual) değerleri 5 mertebe düşünceye kadar yürütülmüştür.

Çözüm ağı bağımsızlık çalışması yapılırken, çözüm ağı hücre boyutu her yönde $\sqrt{2}$ ile arttırılıp azaltılmıştır. Böylece, bir hücrenin alanı ikiye katlanmıştır. Hücre kenar boyutu değiştirilirken, büyüme oranı (growth ratio) 1,1 değeri ile sabit tutulmuştur. 9 farklı çözüm ağı oluşturulmuş olup, bu ağların özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir. Üretilen çözüm ağları Şekil 2'de görülebilmektedir. Çözüm ağlarının simülasyon sonuçları, taşıma kuvveti (C_l) ve sürükleme kuvveti (C_d) dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Çözüm ağı bağımsızlık çalışması sonucunda en yakınsamış çözüm ağının HAD analiz sonuçları, deney verileri ile C_l , C_d ve yüzeydeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı açısından karşılaştırılmıştır. Kanat üzerinde oluşan C_l , C_d ve C_p , sırasıyla Denklem 1, 2 ve 3'de verildiği gibi hesaplanır.

$$C_l = L / (1/2 \rho V^2 c b)$$
(1)

$$C_d = D / (1/2 \rho V^2 c b)$$
(2)

$$C_p = (p - p_{\infty}) / (1/2 \rho V^2)$$
(3)

Bu denklemlerde, *L* taşıma kuvveti, *D* sürükleme kuvveti, *p* basınç, p_{∞} atmosferik serbest akış basıncı, ρ akışkanın yoğunluğu, *V* akışkanın hızı, *c* veter uzunluğu, *b* kanat açıklığıdır (2 boyutlu hesaplamalar için *b* = 1).

Çizelge 3. Çözüm ağı bağımsızlık çalışması için üretilen çözüm ağları

| Çözüm ağı (O-tipi) | Çözüm alanı büyüklüğü (veter) | Kanat profili üzerindeki grid hücresi sayısı | Kanat profili duvarına normal yöndeki grid hücrelerinin sayısı | Kanat profili duvarına normal yöndeki ilk hücrenin boyutu | Büyüme oranı | Toplam hücre sayısı | Y+ | 1 iterasyon için geçen süre (s) |
|--------------------------|--|---|---|--|-----------------|---------------------------|-------|--|
| Grid 1 | 40 | 1536 | 211 | 3.75E-07 | 1.08 | 322560 | 0.023 | 5.0 |
| Grid 2 | 40 | 1086 | 205 | 5.30E-07 | 1.08 | 222630 | 0.029 | 3.3 |
| Grid 3 | 40 | 768 | 202 | 7.50E-07 | 1.08 | 154368 | 0.037 | 2.1 |
| Grid 4 | 40 | 543 | 197 | 1.06E-06 | 1.08 | 106232 | 0.051 | 1.6 |
| Grid 5 | 40 | 384 | 192 | 1.50E-06 | 1.08 | 73153 | 0.084 | 1.2 |
| Grid 6 | 40 | 271 | 188 | 2.12E-06 | 1.08 | 50677 | 0.119 | 0.9 |
| Grid 7 | 40 | 192 | 184 | 3.00E-06 | 1.08 | 35136 | 0.169 | 0.7 |
| Grid 8 | 40 | 136 | 180 | 4.24E-06 | 1.08 | 23986 | 0.241 | 0.5 |
| Grid 9 | 40 | 96 | 175 | 6.00E-06 | 1.08 | 16356 | 0.342 | 0.3 |



Şekil 2. Çözüm ağları

3. HAD ANALİZ SONUÇLARI

Şekil 3 ve 4'te çözüm ağı bağımsızlık çalışmasına ait yapılan daimî RANS analizlerinin artık değer (residual) grafiği ile taşıma ve sürükleme kuvvetleri katsayılarının yakınsama grafikleri sırasıyla verilmiştir. Çözüm ağındaki ağ aralığı küçüldükçe, artık değerdeki düşüş daha yüksek iterasyon sayılarında gerçekleşmektedir. Ayrıca, en geniş ağ aralığına sahip çözüm ağlarından biri olan Grid 8'de 5 mertebelik düşüş görülememiştir.

Şekil 5'te çözüm ağı çalışmasının Re = $3x10^6$ için elde edilmiş taşıma kuvveti katsayısı (C_l) grafiği gösterilmektedir. Lineer bölgede, değerler birbirine oldukça yakınken, hücum açısı arttıkça çözüm ağları arasındaki fark da özellikle tutunamama (stall) bölgesinde artmıştır. Şekil 6'da çözüm ağı çalışmasının Re = $3x10^6$ için elde edilmiş sürükleme kuvveti katsayısı (C_d) grafikleri verilmiştir. Ayrıca, çözüm ağlarının Grid 3'e göre C_d farkı hesaplanmış, Şekil 6'daki grafikte gösterilmiştir. Grafiklerde Grid 9, 8, 7, 6 ve 5 eğrileri rahatça görülebilmektedir. Benzer şekilde, Şekil 7 ve 8'de çözüm ağı çalışmasının Re = $6x10^6$ için sonuçları, C_l ve C_d grafikleri olarak verilmektedir. Şekil 9 ve 10'da ise Re = $9x10^6$ sonuçları verilmektedir. Reynolds sayısı arttıkça çözüm ağları arasındaki fark artmaktadır. Yüksek Reynolds sayılarındaki C_l ve C_d grafikleri incelendiğinde, Grid 3 bu Reynolds sayılarının hepsi için en yakınsamış çözüm ağı olarak görülmektedir. Şekil 11'de Reynolds sayısının kanat profilinin aerodinamik özellikleri üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Burada, Grid 3 için elde edilmiş sayısal analiz sonuçları, literatürdeki mevcut deneysel veriler ile karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Literatürdeki sayısal analiz çalışmalarından bilindiği gibi, bu çalışmadaki simülasyon sonuçlarında da deney verilerine göre daha fazla tahmini (over-prediction) gözlemlenebilmektedir. Daimî durum RANS simülasyonlarında bu durum yaşanabilmektedir. Yine de, Reynolds sayısı bağımlılığı eğilimlerinin oldukça iyi tahmin edildiğini görebiliriz. Reynolds sayısı bir akışkanın, atalet kuvvetlerinin viskozite kuvvetlerine etkinliği azalır ve akım ayrılması ertelenir. Reynolds sayısı ile birlikte kanat profilinin ürettiği taşıma kuvveti de artmaktadır. Bu nedenle, Şekil 11'deki grafikler incelendiğinde, azami C_l değerinin ve tutunamama (stall) açısının Reynolds sayısı arttıkça arttığı görülmektedir.

$$Re = \rho V c / \mu \tag{4}$$

Şekil 12 ve 13'te akış alanındaki girdap şiddeti dağılımı ve kayma gerilmesi dağılımı Re = $3x10^6$, Re = $6x10^6$ ve Re = $9x10^6$ için verilmektedir. Denklem 5'te, kayma gerilmesinin formülü verilmektedir. Bu formüle göre, hız vektörünün *x*-bileşeninin duvara dik yönde değişimi kayma gerilmesi ile doğru orantılıdır.

$$\tau_{xy} = \mu \, du/dy \tag{5}$$

Yüzeydeki kayma gerilmesi, yani hız vektörünün x-bileşeninin y-eksenindeki değişimi sıfır olduğunda akım ayrılması (separation) gerçekleşir. Akım yüzeyden ayrılmaya başlar ve akımın kanat profili üzerinden ayrılması ile ayrılma veya çevrinti (eddy) bölgesi oluşur. Yüksek hücum açılarındaki ayrılma noktası ve akımın yüzeyle yeniden birleşme (reattachment) noktası ilgili şekillerde belirtilmiştir. Tutunamama (stall) açısından sonraki yüksek hücum açılarında, ayrılma noktası hücum kenarına daha da yaklaşmaktadır. Reynolds sayısı 3, 6 ve 9 milyon arasında değiştikçe, yapılan analizlerde ayrılma noktasının konumları arasında çok az fark olduğu görülmektedir. Şekil 14'de basınç katsayısı (C_p) dağılımı ile akım çizgileri 3 farklı Reynolds sayısı ve 2 farklı yüksek hücum açısı için verilmektedir. Akım ayrılmasından sonra oluşan ayrılma bölgesi Şekil 14'de gözlemlenebilir.

Şekil 15, 16 ve 17'de, 4°, 16° ve 20° lik hücum açılarında kanat profilinin yüzeyindeki C_p dağılımı sırasıyla 3, 6 ve 9 milyon Reynolds sayıları için gösterilmektedir. HAD analizi sonuçları, deneysel ölçümler ile karşılatırılmıştır. Kanat profili üzerindeki basıncın değişime uğramadığı noktada akım ayrılması başlar. Grafiklerde, Re sayısı 3 milyondan 9 milyona geçerken, 20° hücum açısı için ayrılma noktasının konumu 0,35 veterden 0,45 veter lokasyonuna doğru değiştiği görülebilir. Ayrıca, simülasyon sonuçlarının deney verileri ile uyumlu olduğu söylenebilir.



Şekil 3. Çözüm ağlarının artık (residual) değer grafikleri



Şekil 4. Çözüm ağı bağımsızlık çalışması için üretilmiş tipik C_l ve C_d yakınsama grafikleri



Şekil 5. Çözüm ağı çalışmasının Re = 3×10^6 için elde edilmiş taşıma kuvveti katsayısı (C_l) grafiği



Şekil 6. Çözüm ağı çalışmasının Re = 3×10^6 için elde edilmiş sürükleme kuvveti katsayısı (C_d) grafiği (sol) ve Grid 3'e göre hesaplanmış C_d farkı (sağ)



Şekil 7. Çözüm ağı çalışmasının Re = 6×10^6 için elde edilmiş taşıma kuvveti katsayısı (C_l) grafiği



Şekil 8. Çözüm ağı çalışmasının Re = $6x10^6$ için elde edilmiş sürükleme kuvveti katsayısı (C_d) grafiği (sol) ve Grid 3'e göre hesaplanmış C_d farkı (sağ)



Şekil 9. Çözüm ağı çalışmasının Re = 9×10^6 için elde edilmiş taşıma kuvveti katsayısı (C_l) grafiği



Şekil 10. Çözüm ağı çalışmasının Re = 9×10^6 için elde edilmiş sürükleme kuvveti katsayısı (C_d) grafiği (sol) ve Grid 3'e göre hesaplanmış C_d farkı (sağ)



Şekil 11. Grid 3 için Reynolds sayısının C_l (sol) ve C_d (sağ) eğilimi üzerine etkisi











Şekil 12. Grid 3 için 2 farklı hücum açısında (AoA = 16° ve 20°) girdap şiddeti dağılımı: a) Re = $3x10^6$ b) Re = $6x10^6$ c) Re = $9x10^6$













Şekil 13. Grid 3 için 2 farklı hücum açısında (AoA = 16° ve 20°) kayma gerilmesi dağılımı: a) Re = $3x10^{6}$ b) Re = $6x10^{6}$ c) Re = $9x10^{6}$







Şekil 14. Grid 3 için farklı Reynolds sayılarında ve yüksek hücum açılarında elde edilmiş basınç katsayısı (C_p) dağılımının akım çizgileri



Şekil 15. Kanat profili yüzeyindeki C_p dağılımı – Re = 3×10^6



Şekil 16. Kanat profili yüzeyindeki C_p dağılımı – Re = 6×10^6



Şekil 17. Kanat profili yüzeyindeki C_p dağılımı – Re = 9×10^6

5. SONUÇ

Bu çalışmada, rüzgar türbini kanat kesitlerinden DU 00-W-212 için 3 farklı yüksek Reynolds sayısında çözüm ağı bağımsızlık çalışması yapılmış, sonuçlar ayrıca rüzgar tüneli testleri ile karşılaştırılmıştır. Kanat profillerinin etrafında, yüksek hücum açılarında ve tutunamama (stall) koşulunda türbülanslı akış oluşmakta ve akım ayrılması gözlemlenmektedir. Bu tarz akışlar daimî durum RANS denklemleri kullanılarak yapılan HAD analizleri için zorlayıcı problemlerdir. Doğru ve kesin çözümlü sayısal analizler için, simülasyonların üretilen çözüm ağının karakteristiğinden bağımsız olması gerekmektedir. Bu nedenle, kullanılan her bir kanat kesiti geometrisi için farklı Reynolds sayılarında ayrı çözüm ağı çalışması yapılmalıdır. HAD analizlerinin doğruluğunu arttırmak için, 2B analizler yapılırken türbülans modelleri ile birlikte geçiş modelleri de kullanılabilir. Ayrıca, 3B DES veya LES simülasyonları ile zamana bağlı çözülerek daha doğru sonuçlar elde edilebilir. Bu durumda, çözüm ağı çalışması 3B çözüm alanları için ayrıca yapılmalıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmadaki Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülasyonları ODTÜ RÜZGEM Yüksek Başarımlı Hesaplama (YBH) Laboratuvarı paralel öbek bilgisayarlarında yapılmış olup, bu çalışma ODTÜ RÜZGEM tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Baldacchino, D., Manolesos, M., Ferreira, C., Salcedo, A. G., Aparicio, M., Chaviaropoulos, T., ... & van Zuijlen, A. 2016. Experimental benchmark and code validation for airfoils equipped with passive vortex generators. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 753, No. 2, p. 022002). IOP Publishing.
- [2] Bangga, G., Lutz, T., & Krämer, E. 2018. Active separation control on a very thick wind turbine airfoil-A URANS and DDES perspective. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1037, No. 2, p. 022025). IOP Publishing.
- [3] Bangga, G., Kusumadewi, T., Hutomo, G., Sabila, A., Syawitri, T., Setiadi, H., ... & Kristiadi, S. 2018. Improving a two-equation eddy-viscosity turbulence model to predict the aerodynamic performance of thick wind turbine airfoils. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 974, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.
- [4] **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 (p. 271).
- [5] Campobasso, M. S., Zanon, A., Foerster, M., Fraysse, F., & Bonfiglioli, A. 2008. CFD modelling of wind turbine airfoil aerodynamics. In: 63th ATI National Congress, Energia per lo sviluppo sostenibile, Palermo, Italy, 23-26 September 2008,
- [6] Colonia, S., Leble, V., Steijl, R., & Barakos, G. 2016. Calibration of the 7—Equation Transition Model for High Reynolds Flows at Low Mach. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 753, No. 8, p. 082027). IOP Publishing.
- [7] Lehmkuhl, O., Calafell, J., Rodríguez, I., & Oliva, A. 2014. Large-Eddy Simulations of wind turbine dedicated airfoils at high Reynolds numbers. In Wind Energy-Impact of Turbulence (pp. 147-152). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [8] Prospathopoulos, J. M., Papadakis, G., Sieros, G., Voutsinas, S. G., Chaviaropoulos, T. K., & Diakakis, K. 2014. Assessment of the aerodynamic characteristics of thick airfoils in high Reynolds and moderate Ma numbers using CFD modeling. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 524, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.
- [9] Rogowski, K., Hansen, M. O. L., Hansen, R., Piechna, J., & Lichota, P. 2018. Detached Eddy Simulation Model for the DU-91-W2-250 Airfoil. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1037, No. 2, p. 022019). IOP Publishing.

- [10] Sørensen, N. N., Zahle, F., Bak, C., & Vronsky, T. 2014. Prediction of the effect of vortex generators on airfoil performance. In Journal of physics: conference series (Vol. 524, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.
- [11] Sørensen, N. N., Mendez, B., Muñoz, A., Sieros, G., Jost, E., Lutz, T., ... & Ferreira, C. 2016. *CFD code comparison for 2D airfoil flows*. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 753, No. 8, p. 082019). IOP Publishing.
- [12] Xu, H., Shen, W., Zhu, W., Yang, H., & Liu, C. 2014. Aerodynamic analysis of trailing edge enlarged wind turbine airfoils. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 524, No. 1, p. 012010). IOP Publishing.
- [13] Zahle, F., Bak, C., Sørensen, N. N., Vronsky, T., & Gaudern, N. 2014. Design of the LRP airfoil series using 2D CFD. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 524, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.
- [14] Jasak, H. 1996. Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows. PhD Thesis, Imperial College London (University of London).
- [15] Geng, F., Kalkman, I., Suiker, A. S. J., & Blocken, B. 2018. Sensitivity analysis of airfoil aerodynamics during pitching motion at a Reynolds number of 1.35× 105. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 183, 315-332.
- [16] Bartl, J., Sagmo, K. F., Bracchi, T., & Sætran, L. 2019. 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.
- [17] Ceyhan, O., & Pires, O. 2015. Avatar blind test campaign. EWEA 2015.
- [18] CFD++ Software, <u>http://www.metacomptech.com/index.php/features/icfd</u>
- [19] Pointwise Software, https://www.pointwise.com/