UHUK-2020-064

DÜŞÜK REYNOLDS SAYILARINDA NACA 0012 KANAT PROFİLİNİN k-ω SST TÜRBÜLANS MODELİ KULLANILARAK HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE MODELLENMESİ

Ali İhsan GÖLCÜK¹ Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara Murat ERBAŞ² Gazi Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, NACA 0012 kanat profilinin aerodinamik özelliklerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemleri ile belirlenmesi ve kanat profili etrafindaki akışın simüle edilerek, laminer-türbülans geçiş bölgelerinin belirlenmesidir. Çözüm ağı üzerinde, Navier-Stokes çözümleri ticari FLUENT® programı kullanılarak yapılmıştır. Analizler düşük Reynolds sayılarında ($Re=1.0x10^4-5.0x10^4$) ve farklı hücum açılarında (0° -20°) gerçekleştirilmiş, akışkan sıkıştırılamaz ve çözümlerin zamandan bağımsız olduğu kabul edilmiştir. Analizlerde laminer bir akışı simüle edebilmek için türbülans yoğunluğu T=%0.01 alınmıştır. Farklı Reynolds sayıları ve hücum açılarında deney verileri bulunan kanat profili için türbülans modeli olarak geçişli k- ω SST türbülans modeli kullanılmıştır. Analizler sonucu elde edilen aerodinamik katsayılar XFOIL verileriyle kıyaslandığında, k- ω SST geçişli türbülans modeli kullanılarak kaldırma katsayısı (Cl), sürükleme katsayısı (Cd) ve kanat profili etrafında oluşan akış, farklı Reynolds sayılarında ve hücum açılarında incenmiş ve yorumlanmıştır. NACA 0012 kanat profili sayısal çözüm ağı deneysel verilerle doğrulanmış, $Re=1.0x10^4$, $2.0x10^4$, $5.0x10^4$ ve $5.1x10^4$ için kaldırma katsayısı bakımından deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, geçişli k- ω SST türbülans modeli kullanılarak elde edilen HAD sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

GİRİŞ

Havacılıkta bir hava aracının kanat tasarımına başlamadan önce o hava aracının görev tanımına uygun ve isterleri karşılayabilecek bir kanat profili seçmek son derece önemlidir. Kanat profili, hava aracının hangi rejimlerde uçacağına ve ihtiyaç duyulan kaldırma ve sürükleme katsayasına göre belirlenmektedir. Hava araçlarının kuyruklarında kullanılan kanat profilleri de hava araçlarının stabilizasyonu, kontürolü ve performansı açısından önemlidir. Simetrik bir kanat profili olan NACA 0012 kanat profili, hava araçlarının rudder ve elevatörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında küçük rüzgar türbinleri, küçük insansız hava araçları, mikro hava araçları, kuş ve böcek kanatlarının aerodinamiği üzerinde yapılan araştırmalar nedeni ile, düşük Reynolds sayılarında kanat profillerinin aerodinamik karakteristiği ile ilgili bilgi sahibi olmak önem arz etmiştir [Brendel ve Mueller, 1988; Hsiao, Liu ve Tang, 1989; Dovgal, Kozlov ve Michalke, 1994; Lin ve Pauley, 1996].

Kanat profilinin aerodinamik karakteristiği, yüksek Reynolds sayılarına göre düşük Reynols sayılarında farklılık göstermektedir. Düşük Reynolds sayılarında laminer akışın kanat profili

¹ Doktora Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: e195027@metu.edu.tr

² Doktora Öğrencisi, Makine Müh. Böl., E-posta: merbas@gazi.edu.tr

yüzeyinden ayırılması ve sürtünme kuvvetinin artması sebebi ile yüksek Cl/Cd değerini elde edilmesi ve dolayısı ile yüksek bir kaldırma kuvveti elde edilmesi zordur [Schmitz, 1967 ve Lissaman 1983]. Reynolds sayısının kanat profilinin aerodinamiğini değiştirmede bu kadar etkili olması ve yüksek Reynolds sayılarında çok fazla çalışma ve deneysel bilgi olmasına karşın düşük Reynolds sayılarında, özellikle de Re=5.0x10⁴' in altında, çok az çalışma ve deneysel bilgi bulunması sebebi ile düşük Reynolds sayılarında kanat profilinin aerodinamik özelliklerinin HAD yöntemleri ile belirlenmesi büyük önem arz etmektedir.

Lee ve Ark. [Lee, Nonomura, Oyama ve Fujii, 2015] düşük Reynolds sayılarında (1x10⁴, 3x10⁴ ve 5x10⁴) NACA 0012 kanat profilinin aerodinamik özelliklerini farklı sayısal methotlar kullanarak çalışmışlardır. Bu çalışmada iki boyutlu laminer simülasyon, Baldwin-Lomax türbülans modelini kullanan iki boyutlu Reynolds-averaged Navier-Stokes simülasyonu ve üç boyutlu implicit largeeddy simülasyonu kullanılmıştır. Üç farklı Reynolds sayısı ve üç farklı sayısal method kullanılarak elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmış [Ohtake, Nakae ve Motohashi, 2007] ve İki boyutlu laminer simülasyonun düşük Reynolds sayılarında kanat profilinin aerodinamik özelliklerini belirlemede uygun bir sayısal yöntem olduğu sonucuna varılmıştır. Di Ilio ve Ark. [Di Ilio, Chiappini, Ubertini, Bella ve Succi, 2018] Hibrit Lattice Boltzmann Method' unu (HLBM) kullanarak düşük Reynolds sayılarında NACA 0012 kanat profili etrafında durağan olmayan akışı simüle eden bir çalışma yapmışlardır. Analizler, Reynolds sayısı 1.0x10³' de ve farklı hücüm açıları için yapılmıştır. Daha sonra 0° hücum açısında Reynolds sayısı 1.0x104' e kadar olan akış incelenmiştir. Analiz sonuçları HLBM' nin duvar yakınında yüksek doğruluk elde edebilme kabiliyetinin olduğunu göstermektedir. Zhou ve Ark. [Zhou, Alam, Yang, Guo ve Wood, 2011] NACA 0012 kanat profiline etki eden kuvvetleri ölçmek için 5.3x10³ ve 5.1x10⁴ Reynolds sayısılarında ve 0°-90° arasında değişen hücüm açılarında kapalı döngü su tüneli deneyini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre hücüm açısı 0°' dan 15°' ye yükseldikçe kaldırma katsayısının arttığı, 15°' den sonra kaldırma katsayısının 90°' ye kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Sürükleme katsayısının ise 0°' den 15°' ye kadar lineer bir şekilde az miktarda arttığı, 15°' den 90°' ye kadar daha hızlı bir yükselme ile arttığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada düşük Reynolds sayılarında NACA 0012 kanat profilinin aerodinamik özelliklerinin HAD yöntemleri ile belirlenmesi ve kanat profili etrafındaki akışın simüle edilmesi amaçlanmıştır. Çözüm ağının analiz sonuçlarına etkisini incelemek ve çözüm ağından bağımsız sonuçlar elde edebilmek için çözüm ağı eniyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda, yedi farklı yoğunlukta çözüm ağı ile analizler yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda yeterli yoğunlukta olduğu belirlenen çözüm ağı seçilmiş ve çalışmaya bu çözüm ağı ile devam edilmiştir. Kanat profili etrafındaki durağan akışın modellenmesinde türbülans modeli olarak k-kl-ω, normal k-ω SST ve geçişli k-ω SST türbülans modelleriyle HAD analizleri yapılmış ve sonuçlar XFOIL verileriyle kıyaslanmıştır. Geçişli k-ω SST türbülans modelinin XFOIL değerleri ile daha yakın sonuç verdiği görülmüş ve çalışmaya bu türbülans modeli ile devam edilmiştir.

YÖNTEM

Sayısal Yöntem

Bu çalışmada NACA 0012 kanat profilinin düşük Reynolds sayılarında ve farklı hücum açılarında aerodinamik analizleri yapılmış ve kanat profili etrafında detaylı akış incelenmiştir. Analizler Ansys FLUENT®'te de koşturulmuştur. Akışkan sıkıştırılamaz ve çözümlerin zamandan bağımsız olduğu kabul edilmiştir. Analizler birinci derece ayrıklaştırma ile başlatılmış ve belirli bir özyinelemeden sonra ikinci dereceden ayrıklaştırmaya geçilerek sonuçlar yakınsatılmıştır. Türbülans yoğunluğu hız girişinde, T= %0.01 alınarak akışın laminer olduğu kabul edilmiştir. Türbülans modeli olarak deneysel değerlere göre daha iyi yakınsama elde etmek için geçişli k- ω SST türbülans modeli kullanılmış ve Reynolds-ortalamalı Navier Stokes denklemleri çözülmüştür. Akış ayrılması olan bölgelerde k- ω SST türbülans modelinin diğer türbülans modellerine göre daha iyi performansa sahip olduğu gözlemlenmiştir [Menter, 1993].

Çözüm Ağı

Bu çalışmada daha önceki çalışmada kullanılan çözüm ağı referans alınmıştır [Aşıcı, Erbaş ve Bıyıkoğlu, 2019]. Kullanılan çözüm ağı yapısı iç içe geçmiş 2 bölgeli O-grid tipi yapılandırılmış dörtgen çözüm ağıdır. Hazırlanan geometride veter uzunluğu 0.375m, iç bölge çapı 1m ve dış

bölge çapı 3m uzunluğundadır. Hazırlanan çözüm ağı Şekil 1' de gösterilmiştir ve yaklaşık 85.000 dörtgen elemandan oluşmaktadır. Şekil 2' de ise kanat profili etrafında yoğunlaştırılmış çözüm ağı yapısı gösterilmiştir. Ağ yapısı oluşturulurken diklik (ortogonality) değeri önemsenerek çözümün kalitesi ve yakınsama süresi iyileştirilmiştir.

Sayısal çözüm ağı sahip olduğu eleman kalitesi bakımından değerlendirildiğinde Eriksson çarpıklığı (skewness) değerinin 0.3' ün üstünde olması yeterlidir ve 1' e yaklaştıkça hücre kalitesi iyileşmektedir. Determinant değerlerinin 0.4' ün üstünde olması yeterlidir ve aynı şekilde 1' e yaklaştıkça hücre kalitesi iyileşmektedir. Kalite değerinin 0.3' ün üstünde olması yeterlidir ve 1' e yaklaştıkça hücre kalitesi iyileşmektedir. En-boy oranı (aspect ratio) sınır tabaka dışında 10' un altındadır. Sınır tabaka içinde en-boy oranının yüksek olması yakınsamaya etki etse de çözüm kalitesini bozmamaktadır ve sınır tabakayı düzgün yakalamak yüksek en-boy oranı için gereklidir. En dış bölge düzgün dairesel olduğu için kalite problemi görülmez. Aşağıda Tablo 1' de görüldüğü gibi, sayısal çözüm ağındaki elemanların kalitesini gösteren değerler, kalite için istenilen minimum değerlerin çok üstündedir.

En-Boy Oranı	Determinant 2x2x2	Determinant 3x3x3	Eriksson Çarpıklığı	Kalite
<10	0.8	0.8	0.6	0.8

Tablo 1: Sayıs	al çözüm	ı ağının	kalitesini göster	ren değerler
----------------	----------	----------	-------------------	--------------



Şekil 1: NACA 0012 sayısal çözüm ağı



Şekil 2: NACA 0012 kanat profili etrafında yoğunlaştırılmış çözüm ağı yapısı

Sınır Şartları

Kanat profil yüzeyi kaymayan, sabit ve ısı transferi olmayan duvar sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Şekil 3' de görüldüğü gibi ağ yapısının solundan hız girişi verilmiştir. Bu hız vektörünün bileşenleri hücum açısına göre, büyüklüğü ise Reynolds sayısına göre düzenlenmiştir. Sağ tarafta basınç çıkışı bulunmaktadır. Sınır koşulu olarak basınç, viskozite ve yoğunluk değerleri deniz seviyesi şartları için girilmiştir.



Şekil 3: Sınır şartları

Sınır tabaka ilk yükseklik değeri türbülans modellemelerine uygun olacak şekilde, y+ < 1 için hesaplanmıştır. Analizler sonucunda elde edilen y+ değerleri kontrol edilerek hesaplanan ilk yükseklik değerleri doğrulanmıştır. Şekil 4' de hücum açısı 0° ve 20° için yapılan HAD analizi sonucu kanat profili üzerinde elde edilen y+ dağılımı verilmiştir.



Şekil 4: Hücum açısı 0° ve 20° için kanat profili üzerindeki y+ dağılımı

UYGULAMALAR

Çözüm Ağı Bağımsızlık Çalışması

Yapılan çözüm ağı bağımsızlık çalışmasında 20, 30, 50, 85, 100, 150 ve 200 bin elemana sahip dörtgen çözüm ağları incelenmiştir. Eleman sayısı arttıkça kaldırma ve sürükleme katsayılarının belli bir bantta yakınsadığı Şekil 5' de görülmektedir. 85 bin eleman sayısından sonra sonuçların birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiş ve 85 bin eleman ile analizler gerçekleştirilmiştir.





Türbülans Modelinin Seçilmesi

Sayısal çözüm ağını doğrulamak ve türbülans modeline karar vermek için 0° hücum açısında ve farklı Reynolds sayılarında (Re= $5.0 \times 10^4 \cdot 1.0 \times 10^6$) analizler koşturulmuştur. Tablo 2' de 3 farklı türbülans modeli (k-kl- ω , normal k- ω SST ve geçişli k- ω SST) ile farklı Reynolds sayılarında koşturulan analizlerin sürükleme ve kaldırma katsayılarının XFOIL değerleri ile karşılaştırılması gösterilmiştir. Tablo 2 ve Şekil 6' dan da anlaşıldığı gibi, geçişli k- ω SST türbülans modelinin XFOIL değerlerine daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tablo 2: k-kl-ω, normal k-ω SST ve geçişli k-ω SST türbülans modelleri ile XFOIL değerlerinin karşılaştırılması

	k-kl-(1)		Normal k-w SST		Gecisli k-w SST		XEOII	
	K-KI-W							
Re	CI	Cd	Cl	Cd	Cl	Cd	CI	Cd
5.0x10 ⁴	-0,000094282	0,019955478	-0,000240213	0,018837008	-0,000032727	0,020286141	0	0,02078
1.0x10 ⁵	-0,000601962	0,016888638	-0,000141894	0,016256235	-0,001976194	0,016769646	0	0,01693
2.0x10 ⁵	0,067868214	0,010465068	-0,000069233	0,014382869	0,046513272	0,010824669	0	0,0102
5.0x10 ⁵	0,001138412	0,006816067	7,88267E-06	0,012238781	-2,03368E-05	0,006397694	0	0,00618
1.0x10 ⁶	4,30823E-05	0,004479246	6,24587E-05	0,010844539	0,00031013	0,004889131	0	0,0054



Şekil 6: k-kl-ω, normal k-ω SST ve geçişli k-ω SST türbülans modelleri kullanılarak analizlerde elde edilen sürükleme katsayılarının XFOIL değerleri ile farklı Reynolds sayılarında karşılaştırması

NACA 0012 Kanat Profili Etrafındaki Akışın İncelenmesi

NACA 0012 kanat profili etrafındaki akış alanını incelemek için zamandan bağımsız analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 7' de 0°, 5°, 10°, 15° ve 20° hücum açılarında ve farklı Reynolds sayılarında kanat profili üzerindeki basınç katsayısı (Cp) dağılımları verilmiştir. Şekil 8' den Şekil 17' ye kadar, hücum açısı 0°, 10°, 15° ve 20° ve farklı Reynolds sayıları için sırası ile basınç dağılımları ve hız dağılımları ile akış çizgileri verilmiştir.





b) Re =2.0x10⁴





d) Re =4.0x10⁴



Şekil 7: 0°-20° hücum açılarında ve farklı Reynolds sayılarında NACA 0012 kanat profili üzerindeki Cp dağılımları







Şekil 9: Reynolds Sayısı 1.0x10⁴ için farklı hücum açılarında hız dağılımları ve akış çizgileri







Şekil 11: Reynolds Sayısı 2.0x10⁴ için farklı hücum açılarında hız dağılımları ve akış çizgileri







Şekil 13: Reynolds Sayısı 3.0x10⁴ için farklı hücum açılarında hız dağılımları ve akış çizgileri







Şekil 15: Reynolds Sayısı 4.0x10⁴ için farklı hücum açılarında hız dağılımları ve akış çizgileri







Şekil 17: Reynolds Sayısı 5.0x10⁴ için farklı hücum açılarında hız dağılımları ve akış çizgileri

Şekil 18' de Reynolds sayısı ve hücum açısı arttıkça laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş bölgesinin kanat profilinin hücum kenarına yaklaşmakta olduğu görülmektedir. Hücum açısının düşük olduğu durumlarda kanat profilinin emme yüzeyinin hücum kenarı laminer başlamakta, daha sonra türbülansa geçiş olmaktadır. 10° hücum açısından sonra emme yüzeyinin büyük bir bölümü türbülansa girmektedir. Bu sebeple düşük Reynolds sayılarında bile akışın laminer kabul edilmesi doğru bir yaklaşım değildir. Hücum açısı 0°' de akış, kanat profili üzerinde türbülansa girmemekte, türbülans kanat profilinin firar kenarının arkasında oluşmaktadır. Fakat hücum açısı 0°' de Reynolds sayısı artışı, türbülanslı bölgeyi kanat profilinin firar bölgesine yaklaştırmaktadır. Hücum açısı 5°,10°, 15° ve 20°' de ise akış kanat profili üzerinde türbülansa girmektedir. Reynolds sayısı ve hücum açısı arttıkça, laminer akıştan türbülanslı akışa geçişin kanat profilinin hücum kenarına doğru ilerlediği görülmektedir.

Bu çalışmada Reynolds sayısı 5.0x10⁴' i geçmediği için, 0° hücum açısında akışın kanat profili üzerinde türbülansa girdiği bölge görülmemiştir.



Şekil 18: Farklı hücum açıları ve Reynolds sayılarında NACA 0012 kanat profilinin emme yüzeyindeki türbülansa geçiş noktaları

Şekil 19, Şekil 20 ve Şekil 21' de farklı hücum açıları ve Reynolds sayıları için kanat profili etrafındaki akışın türbülanslı vizkozite oranı dağılımları gösterilmiştir.

Şekil 19' da, Re= 2.0×10^4 için akışın kanat profilini terk ettikten sonra türbülansa girdiği görülmüştür. Bu durum 0° civarındaki hücum açılarında görülmektedir. Şekil 20' de, Reynolds sayısı 3.0×10^4 ve hücum açısı 5° için kanat profilinin emme yüzeyinin firar kenarında akışın türbülansa girdiği durum gösterilmiştir. Şekil 21' de ise Reynolds sayısı 5.0×10^4 için ve hücum açısı 10°' de kanat profilinin emme yüzeyinin neredeyse tamamının türbülansa girdiği görülmektedir. Bu durumda kanat profilinin emme yüzeyi türbülanslı, basma yüzeyi ise laminer olmaktadır. Bu da türbülans geçişi olan Reynolds sayılarında ($5.0 \times 10^4 - 2.0 \times 10^5$) kanat profilinin aerodinamik katsayılarının doğruluğunu düşürmektedir.



Şekil 19: Reynolds sayısı 2.0x10⁴ ve hücum açısı 0°' de türbülanslı vizkozite oranı



Şekil 20: Reynolds sayısı 3.0x10⁴ ve hücum açısı 5°' de türbülanslı vizkozite oranı



Şekil 21: Reynolds sayısı 5.0x10⁴ ve hücum açısı 10°' de türbülanslı vizkozite oranı

Sayısal Sonuçlar ve Analizlerin Doğrulanması

Yapılan analizler sonucunda farklı hücum açılarında ve Reynolds sayılarında elde edilen NACA 0012 kanat profilinin kaldırma (CI) ve sürükleme (Cd) katsayıları ile CI/Cd oranı aşağıdaki şekillerde gösterildiği gibidir.

Şekil 22' de farklı Reynolds sayılarında ve farklı hücüm açılarında kaldırma katsayısının değişimi gösterilmiştir. CI değeri, 1.0x10⁴ ve 2.0x10⁴ Reynolds sayılarında ve hücum açısı 0°-20° arasında sürekli artmasına karşın, 3.0x10⁴, 4.0x10⁴ ve 5.0x10⁴ Reynolds sayılarında hücum açısı 7.5°'ye kadar artmış ve hücum açısı 7.5°-12.5° arasında azalmıştır. Hücum açısı 12.5°' den sonra CI değerleri hücum açısı 20°' ye kadar düzgün bir şekilde artmaya devam etmiştir. Cd değerleri ise Şekil 23' de de gösterildiği gibi Reynolds sayısı ve hücum açısı arttıkça artış göstermiştir. Şekil 24' de ise farklı hücum açılarında ve Raynolds sayılarında CI/Cd oranı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 22: 0°-20° hücum açılarında ve farklı Reynolds sayılarında NACA 0012 kanat profilinin kaldırma katsayıları



Şekil 23: 0°-20° hücum açılarında ve farklı Reynolds sayılarında NACA 0012 kanat profilinin sürükleme katsayıları



Şekil 24: 0°-20° hücum açılarında ve farklı Reynolds sayılarında NACA 0012 kanat profilinin Cl/Cd oranı

Analizlerin doğrulanması, HAD için kritik bir öneme sahiptir. Bu amaçla HAD analizleri sonucunda elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Şekil 25, a), b) ve c)' de Reynolds sayısı 1.0x10⁴, 3.0x10⁴ ve 5.0x10⁴ için elde edilen Cl katsayılarının deneysel sonuçlar [Ohtake, Nakae ve Motohashi, 2007] ile karşılaştırılması gösterilmiştir. Reynolds sayısı 1.0x10⁴ ve 3.0x10⁴ için HAD sonuçları ile elde edilen değerler ve deneysel değerler hücum açısı 5°' ye kadar yakın çıkarken 5°' den sonra deneysel değerlerin daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Reynolds sayısı 5.0x10⁴ için ise Cl değeri hücum açısı 7.5°' ye kadar çok yakın çıkarken 7.5°' den sonra HAD sonucu elde edilen değerler altında kalmıştır.





b) CI- α , Re = 3.0x10⁴



c) Cl-α, Re =5.0x10⁴

Şekil 25: HAD analizleri sonucunda elde edilen Cl katsayısının üç farklı Raynolds sayısı için deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

Literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırma yapabilmek için Reynolds sayısı 5.1x10⁴ için de HAD analizleri yapılmış ve Şekil 26' da gösterildiği gibi iki farlı deney sonucu [Yılmaz ve Tarhan, 2014; Zhou, Alam, Yang, Guo ve Wood, 2011] ile karşılaştırılmıştır. Yapılan HAD analiz sonuçlarına göre hücum açısı 7.5°' ye kadar Cl değeri artmış, 7.5°-15° arasında azalma göstermiş ve 15°' den sonra 20°' ye kadar artmaya devam etmiştir. Deneysel sonuçlarda ise Cl değeri hücum açısı 10°' den sonra azalma göstermiş ve 15°' den sonra sonra artmaya başlamıştır. Analiz sonucu elde edilen Cl değerleri, hücum açısı 8°' ye kadar deneysel değerlerin üzerinde, 8°-15° arasında ise deneysel değerlerin altındadır. 15°-20° arasında HAD sonucu elde edilen Cl değerleri [Zhou, Alam, Yang, Guo ve Wood, 2011]' ın yaptığı deneysel değerler ile hemen hemen aynı iken [Yılmaz ve Tarhan, 2014]' ın yaptığı deney sonuçlarının altında kalmıştır.

Zhang ve Ark. [Zhang, Zhou, Wang ve Li, 2020] düşük Reynolds sayılarında değişken türbülans yoğunluğunun NACA 0012 kanat profilinin aerodinamik karakteristiğine etkisi üzerine bir çalışma yapmış ve sonuçları deneysel değerler ile karşılaştırmıştır. Reynolds sayısı 5.3x10⁴' de ve türbülans yoğunluğu T=%0.6 ve T=%6 için analizler yapılmıştır. Çıkan sonuçlara göre türbülans yoğunluğunun artması CI değerinde ve stall açısında artmaya neden olmuştur. Şekil 27' de türbülans yoğunluğu T=%0.01 olan ve Re =5.1x10⁴ için yapılan HAD analizi sonuçları ile Zhang ve Ark. Yapmış olduğu çalışma karşılaştırılmış ve sonuçların makul olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 26: HAD analizi sonucunda elde edilen CI katsayısının Re =5.0x10⁴ için deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması



Şekil 27: Re =5.3x10⁴ 'de ve türbülans yoğunlukları T=%0.6 ve T=%6 için elde edilen deneysel Cl değerlerinin, Re =5.1x10⁴ ve T= %0.01 için yapılan HAD analizi sonucu ile karşılaştırılması

SONUÇ

Bu çalışmada NACA 0012 kanat profilinin HAD analizleri Ansys Fluent programı kullanılarak yapılmıştır. Deniz seviyesi koşulları için, akışkanın sıkıştırılamaz ve çözümlerin zamandan bağımsız olduğu kabul edilerek, farklı hücum açılarında ve düşük Reynolds sayılarında NACA 0012 kanat profilinin kaldırma ve sürükleme katsayıları HAD analizleri sonucunda elde edilmiş ve sonuçlar deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Türbülans modeli olarak geçişli k-ω SST türbülans modeli seçilmiş ve laminer bir akışı simüle edebilmek için ise analizlerde türbülans yoğunluğu T=%0.01 alınmıştır. Analiz sonuçlarında elde edilen Cl değerleri deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve yaklaşık olarak uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Kanat profili etrafında oluşan türbülanslı akış, farklı Reynolds sayıları ve hücum açıları için yorumlanmış ve akışın türbülanslı vizkozite oranı dağılımları çeşitli durumlar için verilmiştir. Reynolds sayısının ve hücum açısının değişimine göre de kanat profili üzerinde türbülansa geçiş bölgeleri incelenmiştir. Hücum açısı arttıkça akışı laminer kabul etmenin makul olmadığı analiz sonuçlarında görülmektedir. HAD analizlerinde türbülansın başarıyla modellenmesi, sürtünme katsayısının ve kopma noktasının belirlenmesi açısından önemlidir. Yapılan analizlerde akışın kanat profili üzerinde kopma noktasının ve stall açısının türbülans yoğunluğundan da etkilendiği görülmüştür.

Teşekkürler

Bildiri özetinin hazırlanmasında vermiş olduğu desteklerden dolayı Sayın Züleyha GÖLCÜK' e ve Sayın Meryem Handan GÖLCÜK' e teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar

- Aşıcı, V., Erbaş, M. ve Bıyıkoğlu, A., 2019. *Aerodynamic Analysis of Flow over a Pitching Airfoil*, 3rd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, ISAS, April 19 21, Ankara, Turkey.
- Brendel, M. ve Mueller, T.J., 1988. *Boundary-layer measurements on an aerofoil at low Reynolds number*, J. Aircraft 25, 317–612.
- Di Ilio, G., Chiappini, D., Ubertini, S., Bella, G. ve Succi, S., 2018. *Fluid flow around NACA 0012 airfoil at low-Reynolds numbers with hybrid lattice Boltzmann method*, Computers and Fluids, 15 February.
- Dovgal, A.V., Kozlov, V.V. ve Michalke, A., 1994. Laminer boundary layer separation: instability and associated phenomena, Prog. Aerospace Sci. 30, 61–94.
- Hsiao, F.B., Liu, C.F., Tang, Z., 1989. Aerodynamic performance and flow structure studies of a low Reynolds number airfoil, AIAA J. 27, 129–137.
- Lee, D., Nonomura, T., Oyama, A. ve Fujii, K., 2015. *Comparison of NumericalMethods Evaluating Airfoil Aerodynamic Characteristics at Low Reynolds Number*, Journal of Aircraft, Vol.52, No.1, January-February.
- Lin, J.C.M. ve Pauley, L.L., 1996. Low-Reynolds-number separation on an airfoil, AIAA J.34, 1570–1577.
- Lissaman, P. B. S., 1983. Low-Reynolds-Number Airfoils, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 15, Jan., pp. 223–239.
- Menter, F.R., 1993. Zonal Two Equation k-ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows, AIAA Paper 93-2906.
- Ohtake, T., Nakae, Y. ve Motohashi, T., 2007. Nonlinearity of the Aerodynamic Characteristics of NACA0012 Aerofoil at Low Reynolds Numbers, Vol.55, No.644, pp. 439-445.
- Schmitz, F. W., 1967. Aerodynamics of the Model Airplane. Part 1: Airfoil Measurements, NASA TM-X-60976.
- Yılmaz, İ. ve Tarhan, C., 2014. Naca 0012 Kanat Profili Etrafindaki Hava Akışının Sayısal Ve Deneysel İncelenmesi, V. Ulusal Havacılık Ve Uzay Konferansı, 8-10 Eylül, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Zhang, Y., Zhou, Z., Wang, K. ve Li, X., 2020. Aerodynamic Characteristics of Different Airfoils under Varied Turbulence Intensities at Low Reynolds Numbers, applied science.
- Zhou, Y., Alam, M., Yang, H.X., Guo, H. ve Wood, D.H., 2011. *Fluid forces on a very low Reynolds number airfoil and their prediction*, International Journal of Heat and Fluid Flow, 32, 329–339.