



Türbülans Yoğunluğunun Geçiş Yer Tahminine Etkisinin Bölgesel Korelasyon Geçiş Modeli ile İncelenmesi

Effect of Turbulence Intensity on Transition Location Estimation Using Local Correlation Transition Model

Hediye Atik^{1*}

¹ Atılım Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, hediye.atik@atilim.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5858-9132

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 21 Temmuz 2022
Revizyon 17 Ağustos 2022
Kabul 18 Ağustos 2022
Online 30 Eylül 2022

Anahtar Kelimeler:

Türbülans yoğunluğu, türbülans geçiş modeli, 6:1 küresel geometri, türbülans geçiş yer tahmini

ÖZ

Aerodinamik katsayılar hava/deniz araçlarının uçuş performans analizlerinde kullanılan en önemli katsayılardır. Serbest akış türbülans yoğunluğu, sayısal akışkanlar dinamiği analizleri ve rüzgar tüneli testleri ile elde edilen aerodinamik katsayılar üzerinde kayda değer etkiye sahiptir. Bu çalışmada, serbest akış türbülans yoğunluğunun küresel geometri üzerindeki türbülans geçiş yerine etkisi en yaygın kullanılan bölgesel korelasyon geçiş modeli ile analiz edilerek incelenmiştir. Analizler 6.5×10^6 Reynolds sayısında, 0 ve 5 derece olmak üzere iki farklı hücum açısında gerçekleştirilmiştir. 5 derece hücum açısında yapılan analiz sonuçları halihazırda mevcut deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Serbest akış yoğunluğunun etkisi, eksenel ve normal kuvvet katsayıları ile yüzey sürtünme katsayısı dağılımı üzerinden değerlendirilmiştir. Eksenel ve normal kuvvet katsayıları incelendiğinde serbest akış türbülans yoğunluğunun artmasıyla katsayıların arttığı gözlemlenmiştir. Çalışmada ele alınan türbülans yoğunluğu aralığı içerisinde, katsayılar arasında oluşan farkların uçuş performans analizlerinde kayda değer fark yaratabileceği değerlendirilmiştir. Yüzey sürtünme katsayıları değerlendirildiğinde, geçiş modeli serbest akış türbülans yoğunluğunun artmasıyla geçiş yerini beklenildiği gibi daha önde tahmin etmiştir. Fakat model üzerindeki geçiş bölgesi geometrisini deneysel sonuçlara göre oldukça farklı bulduğu görülmüştür.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 July 2022
Received in revised form 17 August 2022
Accepted 18 August 2022
[Available online 30 September 2022](#)

Keywords:

Turbulence intensity, transition model, 6:1 spheroid geometry, transition location estimation

ABSTRACT

Aerodynamic parameters are among the most important parameters in flight performance analyses of air/sea vehicles. Free stream turbulence intensity has significant importance on aerodynamic parameters obtained with computational fluid dynamic analyses and wind tunnel tests measurements. In this study, the effect of free stream turbulence intensity on the transition locations of spheroid geometry analyzed with the widely accepted local correlation transition model is investigated. The computations are performed at 6.5×10^6 Reynolds number with 0 and 5 degree angle of attacks. The computations at 5 degree angle of attack are compared with an available experimental study. The effect of free stream turbulence intensity is investigated with axial force coefficient, normal force coefficient, and surface friction coefficient distributions. It is seen that axial and normal force coefficients increase with increasing free stream turbulence intensity. The differences in force coefficients obtained with the free stream intensity range used in the study shall create noteworthy effects in flight performance analyses. When surface friction coefficients are investigated, the transition model estimates the transition locations earlier while free stream turbulence intensity increases as expected. However, the transition front geometry is obtained significantly different with respect to the experimental results.

Doi: 10.24012/dumf.1146580

* Sorumlu Yazar

Giriş

Test odası serbest akış türbülans parametreleri, aerodinamik davranışların belirlenmesine yönelik yapılan rüzgar tüneli testlerinde elde edilen ölçüm sonuçlarını etkilemesi sebebiyle önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu etki, düz plaka ile farklı türbülans yoğunlukları için türbülans geçiş Reynolds sayısının belirlendiği testlerle kanıtlanmıştır [1, 2]. Birçok farklı çalışmada, serbest akış türbülans artışının sınır tabaka kalınlığının artmasıyla birlikte duvar kayma gerilmesinde (İng. wall shear stress) artışa sebep olduğu gösterilmiştir [3-5]. Bu sonuçlar, farklı rüzgar tünellerinde yapılan testlerde, test odası türbülans parametrelerine bağlı olarak farklı sürüklenme kuvvet katsayısı ölçümü elde edilebileceğini göstermektedir.

Sayısal analizlerde türbülans parametreleri analiz yapılan hacmin yüzeyleri üzerinde tanımlanarak hacim içerisinde çözümlenmektedir. Bu sebeple, akış içerisinde bulunan aerodinamik geometri yakınındaki türbülans parametrelerinin gerçeğe yakın elde edilmesinde analiz hacminin büyüklüğüne uygun sınır koşullarının tanımlanması önemli olmaktadır. Türbülans modellerinin kullanılmadığı doğrudan sayısal simülasyon (İng. Direct Numerical Simulation (DNS)) metodu, karışık akış olaylarının tahmininde akla gelen ilk yöntemlerdendir. Fakat bu yöntem akış içerisindeki tüm türbülans yapılarını ve hareketini hesaplayarak elde ettiğinden Reynolds sayısına bağlı olarak oldukça küçük çözüm ağı elemanına ve zaman adımına ihtiyaç duymaktadır. Diğer bir metod ise büyük girdap simülasyon (İng. Large Eddy Simulation (LES)) yöntemidir. Bu yöntemde büyük girdaplar çözümlenirken, küçük olanlar modellenmektedir. Duvar yakınında yine DNS metodu kullanıldığından çözümleme bütçesi açısından pahalı yöntemlerden biridir. Bu sebeple, günümüz mühendislik uygulamalarında DNS ve LES metodları halen hesaplama bütçesi açısından yaygın kullanılabilen metodlar değildir. Karışık geometriler etrafındaki akış problemleri türbülans modeliyle tamamlanmış Reynolds-ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleri ile çözümlenmektedir. RANS analizlerinde akış tamamıyla türbülanslı kabul edildiğinden bu yöntemde laminar-türbülans geçişini doğru bir şekilde tahmin etmek mümkün değildir. Bu simülasyonlara örnek olarak Eca ve Hoestra'nın [6] düz plaka üzerinde farklı türbülans modelleri kullanarak yaptıkları akış çözümlerini verilebilir.

Laminar-türbülans geçiş olayını tahmin etmek üzere matematiksel modeller üzerinde sayısız çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların etütlerinin yapıldığı derleme makalelerinde [8-10] geçiş modellerinin yaklaşımları hakkında bilgiler verilmiştir. Bu modeller arasında Menter vd. [10] ve Langtry ve Menter [11] tarafından geliştirilen, bölgesel korelasyon geçiş modeli olarak adlandırılan modelin en yaygın kullanılan model olduğu görülmektedir [12, 13]. γ - Re_{θ} geçiş modeli olarak adlandırılan model, geçiş başlangıç kriteri olarak kullanılan bölgesel geçiş Reynolds momentum kalınlık ve aralıklılık (İng. intermittency) parametreleri için taşınım denklemlerini çözmektedir [11]. Bu geçiş modeli yaygın olarak kullanılan iki denklemlilik shear stress transport (SST) k - ω türbülans modeli [14] ile birleştirilerek akış ayrılması, basınç gradyanı ve serbest akış türbülans yoğunluğundan kaynaklı laminar-türbülans geçişinin olduğu akış tahminlerinde kullanılmaktadır [11]. γ - Re_{θ} geçiş modeli

günümüzde birçok araştırma ve ticari hesaplamalı sayısal analiz yazılımlarında kullanılmış ve entegrasyon, geliştirme ve performans başarımları farklı sınaama durumları kullanılarak gösterilmiştir. Lopes vd. [15] ReFRESKO yazılımını [16] kullanarak γ - Re_{θ} geçiş modelinin taşınım denklemlerinde kullanılan farklı ayırıklaştırma şemalarının etkisini NACA 0012 airfoil, Eppler 387 airfoil ve 6:1 küresel geometri kullanarak göstermiştir. Çalışma, geçiş modeli kullanıldığında türbülans kinetik enerji (k) ve özgül yayılım oranı (ω) parametrelerinin çözümünde birinci-derece akış yönünde (İng. upwind) ayırıklaştırma şeması kullanımının çözümleme doğruluğu üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Alman Havacılık Merkezi (DLR) tarafından geliştirilen sıkıştırılabilir RANS çözücüsü olan TAU yazılımında türbülans geçiş tahmini için farklı geçiş modelleri bulunmaktadır. TAU yazılımında da orijinal γ - Re_{θ} geçiş modeli yine SST k - ω türbülans modeli ile birlikte kullanılmaktadır. Bu model ile farklı geometrik konfigürasyonlar etrafındaki akış analizleri yapılarak sonuçları e^N metodu ile karşılaştırılmıştır [17-19]. Rumsey vd. [20] SST k - ω türbülans modeli ile entegre edilen γ - Re_{θ} geçiş modelinin başarımını NASA'nın FUN3D ve CFL3D yazılımları kullanılarak NASA yamuk kanat sınaama modeli ile gerçekleştirmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmasını yapmıştır. Çalışma, sayısal analizlerde yakınsama güçlükleriyle karşılaşılsa da sonuçların geçiş modeli kullanılmadığı duruma göre deneysel sonuçlara daha yakın çıktığını ortaya koymuştur [20]. Atik [21] çalışmasında γ - Re_{θ} geçiş modelini, ticari bir yazılım olan ANSYS Fluent yazılımı kullanarak 6:1 küresel sınaama geometrisi üzerindeki türbülans geçiş tahmini değerlendirmesinde kullanmıştır. Üç farklı çözüm ağı kullanılarak sürüklenme katsayısı ve türbülans geçiş yeri tahmininde, ayırıklaştırmadan kaynaklı belirsizlik bandı tespiti yapılmıştır. Çalışma, geçiş modeli kullanıldığı durumda hem sürüklenme kuvveti katsayısında, hem de geçiş yeri etrafında daha büyük belirsizlik bandı hesaplamıştır. Ayrıca geçiş modeli ile tahmin edilen sürüklenme katsayısının model kullanılmadığı durumda elde edilen analiz sonucuna göre yarıya düştüğü tespit edilmiştir. Türbülans geçiş yerini gösteren yüzey sürtünme katsayı dağılımı halihazırda mevcut deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında, geçiş yeri geometrisinin geometri yüzeyi üzerinde deneysel sonuçlara göre oldukça farklı olduğu görülmüştür. Deneysel çalışmada test odası içerisinde gözlemlenen türbülans yoğunluğu %0.1 ila %0.3 aralığında verilmiş, sayısal çalışmada türbülans parametreleri için sınır koşulları, geometri burnunun önünde %0.15 türbülans yoğunluk değeri oluşturacak şekilde tanımlanmıştır. Çalışmanın sonuçları arasında, türbülans geçiş olayında serbest akış türbülans yoğunluğunun önemli olması ve bu sebeple parametrenin geçiş yer geometrisi üzerindeki etkisinin incelenmesi tavsiye edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, γ - Re_{θ} geçiş modelinin serbest akış türbülans yoğunluğuna hassasiyetinin belirlenmesidir. 6:1 küresel geometri etrafındaki akış 6.5×10^6 Reynolds sayısında %0.1 ila %0.3 farklı türbülans yoğunlukları için analiz edilmiştir. Sürüklenme kuvvet katsayısı, yüzey sürtünme katsayısı, 0 ve 5 derece hücum açıları için değerlendirilmiştir. 5 derece hücum açısı durumu için elde edilen sonuçlar hali hazırda mevcut deneysel yüzey sürtünme katsayısı karşılaştırmalarında kullanılmıştır.

Yöntem

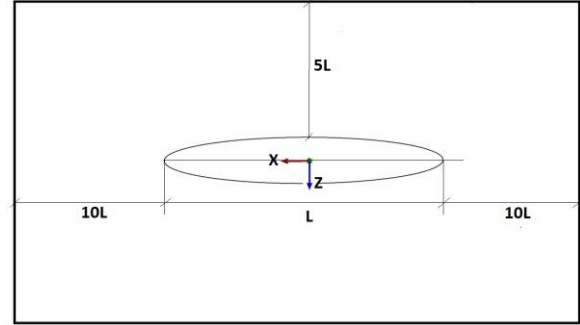
Bu çalışmada yapılan tüm hesaplamalar sonlu hacim metodu kullanan ANSYS Fluent yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Yazılım karışık geometriler etrafındaki sıkıştırılabilir ve sıkıştırılmaz akış problemlerini çözmektedir. Fluent yazılımı akışmazsız, laminar ve türbülanslı akışları çözebilme kabiliyetine sahiptir. Ayrıca yazılımda laminar-türbülans geçiş tahminleri için γ , $\gamma-Re_\theta$ ve $k-kl-\omega$ modelleri bulunmaktadır. Yazılım basınç veya yoğunluk tabanlı çözücü seçimine izin vermektedir. Bu çalışmada basınç tabanlı birleşik algoritma kullanılmıştır. Basınç için ikinci dereceden ayrıklaştırma metodu seçilirken, momentum, türbülans kinetik enerji, özgül dağılım oranı, aralıklılık ve Reynolds momentum kalınlık parametreleri için ikinci derece akış yönünde (İng. upwind) ayrıklaştırma şeması kullanılmıştır. Parametrelerin değişim ve türevlerinin hesaplanmasında hücreye dayalı en küçük kare (İng. least square cell based) metodu kullanılmıştır. Tüm analizler zamandan bağımsız gerçekleştirilmiştir.

Küresel geometrinin aksel simetrik olması ve kullanılan akış koşulları için akışın dikey düzlemde simetrisi olması sebebiyle geometrinin yarısı analizlerde kullanılmıştır. Geometri üzerinde üçgen elemanlar, yüzey çözüm ağı üzerine sınır tabakayı içerisine alan prizmatik çözüm ağı ve sınır yüzeylerle prizmatik elemanlar arasında ise düzensiz çözüm ağı kullanılmıştır. Langtry ve Menter [11] $\gamma-Re_\theta$ geçiş modeli kullanıcılarına, duvar üzerine yaklaşık 1.1 oranında genişleme oranı kullanmasını ve en büyük y^+ değerinin ise en fazla 1 civarında olmasını önermiştir. Bu çalışmada 1.1 genişleme oranı ve yüzey y^+ değerlerinin 0.3'ten küçük olduğu, Ref. [21]'de kullanılan düzey-2 çözüm ağına karşılık gelen çözüm ağı kullanılmıştır. Atik [21] çalışmasında bu çözüm ağından kaynaklı ayrıklaştırma hatalarını göstermiştir.

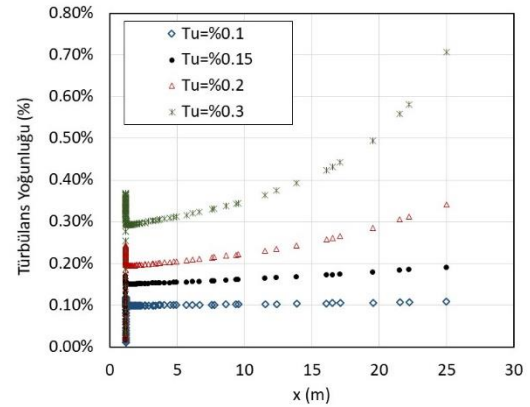
Laminar-türbülans geçiş yeri serbest akış türbülans parametrelerine kuvvetli bir şekilde bağlıdır. Birçok çalışmada [3-5] sınır tabaka kalınlığı ve bölgesel duvar kayma gerilmelerinin serbest akış türbülans seviyesinin artmasıyla arttığı gösterilmiştir. Meier vd. [22] 6:1 küresel geometri ile üç farklı rüzgar tüneline benzer Reynolds sayısında yaptıkları testlerde laminar-türbülans geçişinin farklı yerlerde olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmada, en yaygın kullanılan $\gamma-Re_\theta$ geçiş modelinin farklı serbest akış türbülans yoğunlukları için geçiş yeri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Serbest akış türbülans yoğunluğunun etkisini gözlemlemek amacıyla geometri burnunda farklı türbülans yoğunluklarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Kullanılan çözüm hacminin büyüklüğü ve eksen takımı şematik olarak Şekil 1'de verilmiştir. Sınır yüzeylerin geometriye uzaklıklarına uygun olarak sınır koşulu olarak kullanılan türbülans yoğunluk ve türbülans akışmazlık oranları Tablo 1'de verildiği gibi belirlenerek burnun önünde %0.1, %0.15, %0.2 ve %0.3 türbülans yoğunlukları elde edilmiştir (bkz. Şekil 2). Geometri etrafında elde edilen türbülans yoğunlukları kullanılan türbülans modeline göre değişim gösterse de burun bölgesinde elde edilen türbülans yoğunluk aralığı karşılaştırma yapılacak deneysel sonuçların elde edildiği testler sırasında, test odası içerisinde gözlemlenen türbülans yoğunluğu aralığına karşılık gelmektedir.

Tablo 1. Türbülans parametreleri giriş sınır koşulları ve burun önü türbülans yoğunluğu.

| Türbülans yoğunluğu | Türbülans akışmazlık oranı | Burun türbülans yoğunluğu |
|---------------------|----------------------------|---------------------------|
| %0.11 | 50 | %0.1 |
| %0.2 | 50 | %0.15 |
| %0.4 | 50 | %0.2 |
| %1.0 | 100 | %0.3 |



Şekil 1. Simetri düzleminde analiz hacim boyutlarının şematik gösterimi.

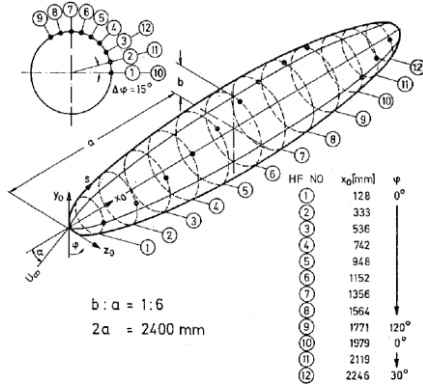


Şekil 2. Türbülans yoğunluğunun giriş sınırından (sol) geometri burnuna (sağ) doğru değişimi.

Analizlerde süreklilik denklemi için yakınsama kriteri 10^{-6} tanımlanmış ve analizlerde bu kriter elde edilirken aerodinamik kuvvet ve moment katsayılarında yakınsama olduğu gözlemlenmiştir. Türbülans kinetik enerji (k) hariç diğer tüm parametreler için artık değerler 10^{-6} değerinin çok altında gerçekleşmiştir.

Analizler 6.5×10^6 Reynolds sayısında 0 ve 5 derece hücum açılarında gerçekleştirilmiştir. 5 derece hücum açısında yapılan analiz sonuçları Kreplin vd. [23] tarafından 3 m x 3 m kesitinde test odasına sahip düşük hızlı rüzgar tüneline test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada test odası içerisinde Reynolds sayısı ile türbülans yoğunluğunu %0.1 ile %0.3 arasında değiştiği belirtilmiştir. Testlerde duvar kayma gerilmeleri 12 farklı aksel pozisyona yerleştirilen sıcak-film ölçeri ile elde edilmiştir (bkz. Şekil 3). Model eksen etrafında döndürülerek -5 ila 185 derece çevresel açı aralığında ölçümler alınmıştır. Deneysel çalışmada farklı

eksenel pozisyonlar için hem ölçüm aralıkları hem de ölçüm sayısı farklı olduğundan düzenli veri seti bulunmamaktadır. Sayısal çözümlerinin benzer noktalarda karşılaştırmasının yapılması için hem deneysel veri, hem de analiz sonuçları üçüncü dereceden iç kestirimle 1'er derece çevresel açı aralığı kullanılarak düzenli hale getirilmiştir.



Şekil 3. Sıcak film ölçerlerinin test modeli üzerindeki yerleşimi [23].

Analiz Sonuçlarının Değerlendirmesi

6.5×10^6 Reynolds sayısı koşulları [23] 0 ve 5 derece hücum açıları için analiz edilmiştir. 0 derece hücum açısı için elde edilen eksenel kuvvet katsayısı Tablo 2'de verilmiştir. Geometri eksenel simetriye sahip olması sebebiyle beklenildiği gibi normal kuvvet katsayısı çok küçük çıkmış bu sebeple Tablo 2'ye dahil edilmemiştir. Tablo 3'te eksenel ve normal kuvvet katsayısı 5 derece hücum açısı için sunulmuştur.

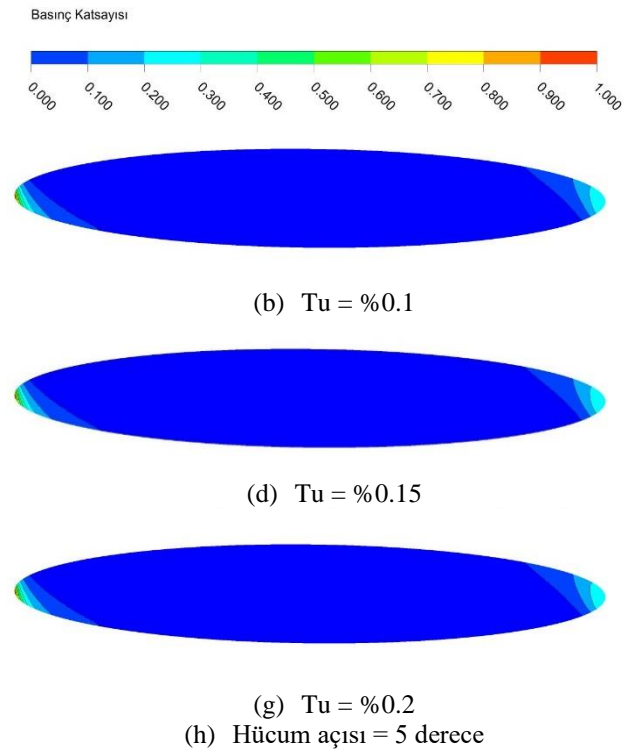
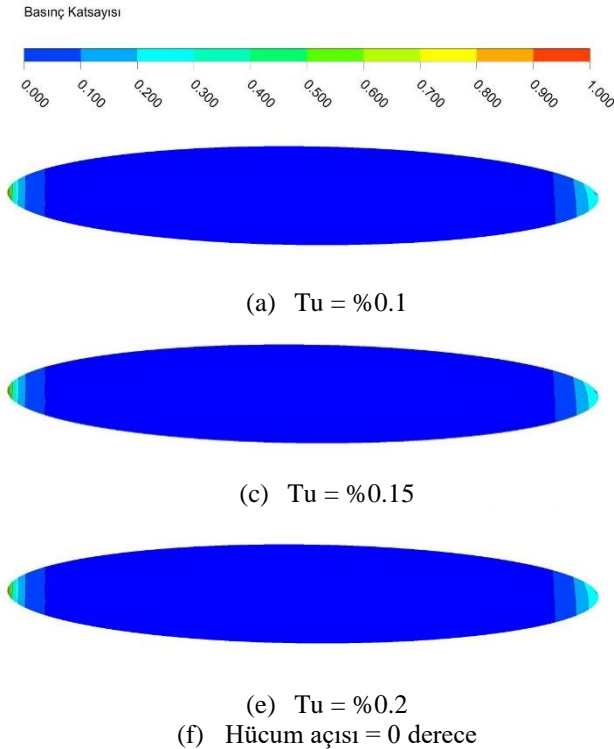
Tablodaki değerler incelendiğinde türbülans yoğunluğunun artması ile katsayılar artış gözlemlenmektedir. En küçük türbülans yoğunluğu için elde edilen eksenel kuvvet katsayısı düşünüldüğünde 0 derece hücum açısı için %0.3 türbülans yoğunluğunda %25, 5 derece hücum açısında ise %17 oranında bir artış gözlemlenmektedir. 5 derece hücum açısında normal kuvvet katsayısında ise %15 oranında artış olmuştur. Aerodinamik parametrelerin hava/su araçlarının performans analizlerinde kullanıldığı gözönüne alındığında bu farkların sonuçlarda önemli değişiklik yaratabileceği görülmektedir.

Tablo 2. Eksenel kuvvet katsayısı, 0 derece hücum açısı.

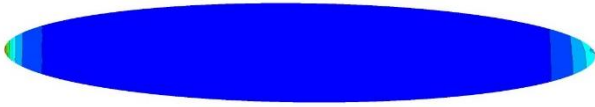
| Burun türbülans yoğunluğu | Eksenel Kuvvet Katsayısı |
|---------------------------|--------------------------|
| %0.1 | -3.584×10^{-4} |
| %0.15 | -3.872×10^{-4} |
| %0.2 | -4.104×10^{-4} |
| %0.3 | -4.473×10^{-4} |

Tablo 3. Eksenel ve normal kuvvet katsayısı, 5 derece hücum açısı.

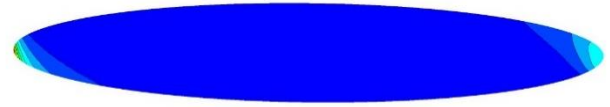
| Burun türbülans yoğunluğu | Eksenel Kuvvet Katsayısı | Normal Kuvvet Katsayısı |
|---------------------------|--------------------------|-------------------------|
| %0.1 | -3.159×10^{-4} | -2.114×10^{-4} |
| %0.15 | -3.321×10^{-4} | -2.176×10^{-4} |
| %0.2 | -3.444×10^{-4} | -2.258×10^{-4} |
| %0.3 | -3.691×10^{-4} | -2.420×10^{-4} |



Şekil 4. Farklı türbülans yoğunlukları için yüzey basınç katsayısı dağılımı.

(g) $Tu = \%0.3$

Hücum açısı = 0 derece

(i) $Tu = \%0.3$

Hücum açısı = 5 derece

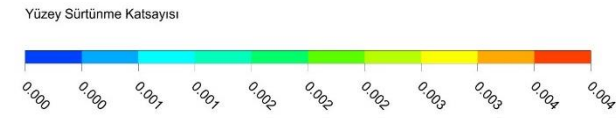
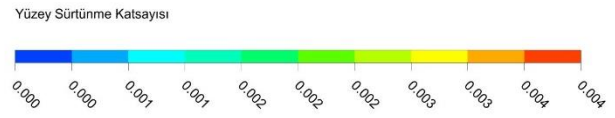
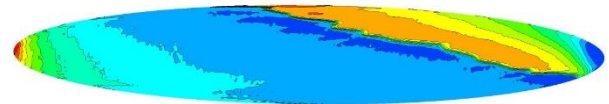
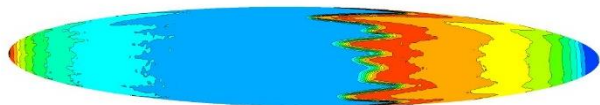
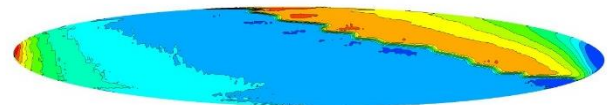
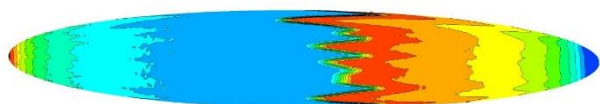
Şekil 4 (devamı). Farklı türbülans yoğunlukları için yüzey basınç katsayı dağılımı.

Küresel geometri üzerinde oluşan basınç ve sürtünme katsayı dağılımları her iki hücum açısı için sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir. Geometri burnu önünde türbülans yoğunluğunun değişimi yüzey basınç katsayılarında önemli bir fark yaratmamaktadır. Şekil 4'de verilen dağılımlarda belirgin görülmesine de grafiksel incelendiğinde geometrinin kış tarafında küçük farklar dışında benzer değerlerin olduğu görülmüştür.

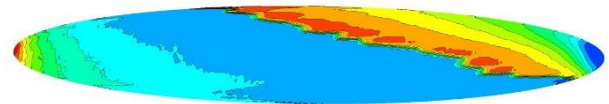
Şekil 5'te verilen yüzey sürtünme katsayıları incelendiğinde farkların daha belirgin olduğu görülmektedir. Her iki hücum açısında da türbülans yoğunluğu arttıkça geçiş yerinin işaretçisi olan büyük değişimlerin öne doğru kaydığı

görülmektedir. Bu durum Meier vd. [22] deneysel sonuçlar kullanılarak yaptıkları tespitlerle paralellik gösterse de 0 derece hücum açısında türbülans geçişinin farklı çevresel açılar için eksen boyunca değiştiği gözlemlenmektedir.

5 derece hücum açısı için elde edilen yüzey sürtünme katsayıları hali hazırda mevcut deneysel sonuçlarla [23] Şekil 6'da karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar akışın geldiği basınç tarafında türbülans geçişinin burundan yaklaşık %50 boy mesafesinde olduğunu ve çevresel açının geometrinin üst tarafına doğru artmasıyla geçişin yaklaşık boyun %40'ına buruna doğru hareket ettiği görülmektedir.

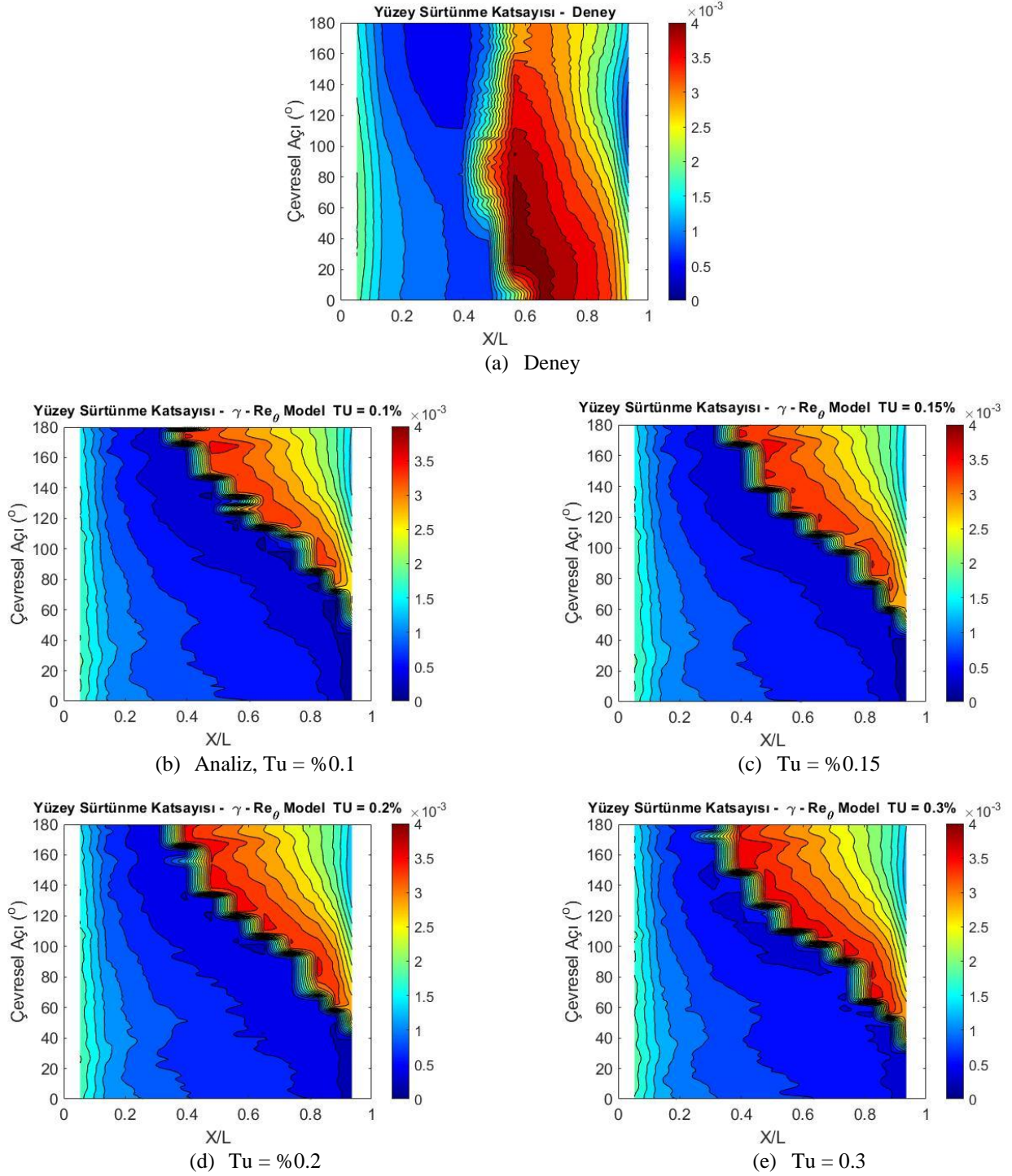
(a) $Tu = \%0.1$ (b) $Tu = \%0.1$ (c) $Tu = \%0.15$ (d) $Tu = \%0.15$ (e) $Tu = \%0.2$ (f) $Tu = \%0.2$ (g) $Tu = \%0.3$

Hücum açısı = 0 derece

(h) $Tu = \%0.3$

Hücum açısı = 5 derece

Şekil 5. Farklı türbülans yoğunlukları için yüzey sürtünme katsayı dağılımı.



Şekil 6. 5 derece hücum açısı için yüzey sürtünme katsayısı dağılımının deney sonuçları ile karşılaştırılması.

Analiz sonuçlarında gövdenin üst tarafında deneysel sonuçlara benzer şekilde türbülans geçişinin oluştuğu görülürken çevresel açının azaldığı gövdenin altına doğru hareket ettikçe geçişin arkaya kaydığı görülmektedir. Hatta 40 derece çevresel açı sonrasında (geometrinin alt kısmında) türbülans geçişi görülmemektedir. Serbest akıştaki türbülans yoğunluğunun değişimi gövde üzerindeki türbülans geçiş yerini az miktarda değiştirirse de geçiş yerlerinin geometrisi deneysel sonuçlarla benzerlik göstermemektedir.

Sonuç

Bu çalışmada yaygın olarak kullanılan γ - Re_{θ} geçiş modelinin farklı serbest akış türbülans yoğunlukları için 6:1 küresel geometri üzerindeki türbülans geçiş yerleri ile aerodinamik katsayılar da yarattığı etki incelenmiştir. Yüzey parametrelerinden basınç katsayıları farklı türbülans yoğunlukları için benzer sonuçlar verirken yüzey sürtünme katsayılarında farklar daha belirgin görülmektedir. Türbülans yoğunluğu arttıkça beklenildiği üzere geçiş yerinin geometrinin ön tarafına doğru kaydığı gözlemlenmiştir. Fakat geçiş modeli, geometri üzerindeki

geçiş yeri geometrisi düşünüldüğünde deneysel veriye göre oldukça farklı tahmin etmiştir. 0 derece hücum açısında farklı çevresel açılarda benzer geçiş yerleri beklenirken oldukça farklı bir geometri elde edilmiştir. 5 derece hücum açısındaki deneysel sonuçlardan, modelin geçiş yeri geometrisini iyi tahmin edemediği görülmektedir.

Atik [21] yaptığı çalışmada geçiş modelinin RANS analizlerine dahil edilmesiyle eksenel kuvvet katsayısında yaklaşık %50 bir düşüşe sebep olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada da ele alınan türbülans yoğunluğu aralığı içerisinde, serbest akış türbülans yoğunluğu değişiminin bu katsayıda %25 civarı değişiklik yarattığı görülmüştür. Eksenel kuvvet katsayısının hava/su araçları menzil hesabına önemli bir katkısı olduğu düşünüldüğünde serbest akış türbülans yoğunluğu parametresinin analizlerde önemli olacağı değerlendirilmektedir. Çalışma, türbülans yoğunluğunun ortalama bir değer alındığında eksenel katsayıda da ortalama bir değer elde edildiğini göstermiştir. Serbest akış türbülans yoğunluğu parametresinin gerçeğe yakın ele alınması ve bilinmediği durumlarda olabileceği tahmin edilen aralıklarda incelenerek aerodinamik katsayılarda beklenen aralıklar tespit edilmelidir. Benzer durum normal kuvvet katsayısında da görülmektedir.

Geçiş bölgesi yer tahmini aerodinamik katsayı tahminini etkilemesi sebebiyle türbülans geçiş yerinin oldukça önemli olduğu görülmektedir. γ - Re_0 geçiş modelinin geçiş yer geometrisinde deneysel sonuçlara yaklaştıracak önemli bir değişiklik yaratmaması, modelin serbest akış türbülans yoğunluğundan bağımsız modelleme hatası içerdiğini göstermektedir. Modelin türbülans geçiş fiziğini daha doğru tahmin edecek şekilde iyileştirilmesi ve iyi kurgulanmış deneysel sonuçlarla doğrulanması gerekmektedir. Türbülans geçiş model kullanıcılarının, modelleri kullanmadan önce ilgilendikleri akış durumları için farklı geçiş model sonuçlarını karşılaştırılmaları, mümkün olduğunca benzer geometri ve akış durumlarında elde edilmiş deneysel sonuçlarla başarımlarını karşılaştırmaları tavsiye edilmektedir. Örneğin Menter vd. [24] tarafından γ - Re_0 geçiş modelinin sadeleştirilmesiyle elde edilen γ geçiş modelinin benzer koşullarda kullanılarak modelin fiziğinde yapılan iyileştirmelerin kontrol edilmesi faydalı olacaktır.

Kaynaklar

- [1] G.B. Schubauer, H. K. Skramstad, "Laminar boundary layer oscillations and stability of laminar flow," National Bureau of standards, paper 1772, JAS 14, pp. 69-78, 1947.
- [2] P. E. Roach, D. H. Brierly, "The Influence of a Turbulent Free-Stream on Zero Pressure Gradient Transitional Boundary Layer Development: Part 1. Test cases T3A and T3B." ERCOFTAC Workshop, Cambridge University Press, Lausanne, Switzerland, March 1990.
- [3] G. Charnay, G. Comte-Bellot, J. Mathiew, "Development of a turbulent boundary layer on a flat plate in an external turbulent flow," AGARD CCP93, Paper No. 27, 1971.
- [4] H. U. Meier, and H. P. Kreplin, "Influence on Free-Stream Turbulence on the Boundary Layer Development," AIAA Journal, Vol. 18, No. 1, pp. 11-15, 1980. DOI: 10.2514/3.50724.
- [5] M. F. Blair, "Influence of free-stream turbulence on turbulent boundary layer heat transfer and mean profile development; Part 1 – Experimental data," Journal of Heat Transfer, Vol. 105, pp. 33-47, 1983.
- [6] L. Eca, M. Hoekstra, "The numerical friction line," Journal of Marine Science and Technology, Vol. 13, No.4, pp. 328-345, 2008. DOI: 10.1007/s00773-008-0018-1.
- [7] D. D. Pasquale, A. Rona, and S. J. Garrett, "A selective review of cfd transition models," 39th AIAA Fluid Dynamics Conference, San Antonio, Texas, AIAA Paper 2009-3812, 2009. DOI: 10.2514/6.2009-3812.
- [8] A. V. Boiko, S. V. Kirilovskiy, A. A. Maslov, and T. V. Poplavskaya, "Engineering modelling of the laminar-turbulent transition: achievements and problems (review)," Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Vol. 56, No. 5, pp. 761-776, 2015. DOI: 10.1134/S002189441505003X.
- [9] A. Krumbein, N. Krimmelbein, C. Grabe, and N. Shengyang, "Development and application of transition prediction techniques in an unstructured CFD code," AIAA 2015-2476, AIAA Aviation 45th AIAA Fluid Dynamics Conference, Dallas, TX, 22-26 June 2015. DOI: 10.2514/6.2015-2476.
- [10] F. R. Menter, R. B. Langtry, Y. B. Likki, Y. B. Suzen, P. G. Huang, and S. Volker, "A correlation-based transition model using local variables: part I — model formulation," Journal of Turbomachinery, 128(3), pp. 412-422, 2006. DOI: 10.1115/1.2184352.
- [11] R. B. Langtry, and F. R. Menter, "Correlation-based transition modeling for unstructured parallelized computational fluid dynamics codes," AIAA Journal, Vol. 47, No. 12, pp. 2894-2906, 2009. DOI: 10.2514/1.42362.
- [12] C. Grabe, A. Krumbein, "Evaluation of a correlation-based transition model and comparison with the e^N method," Journal of Aircraft, Vol. 49, No. 6, pp. 1765-1773, 2012. DOI: 10.2514/1.C031448.
- [13] J.G. Coder, M. D. Maughmer, "Comparisons of theoretical methods for predicting airfoil aerodynamic characteristics," Journal of Aircraft, Vol. 51, No. 1, pp. 183-191, 2014. DOI: 10.2514/1.C032232.
- [14] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605, 1994. DOI: 10.2514/3.12149.
- [15] R. Lopes, L. Eca, G. Vaz, and M. Kerkvliet, "Assessing numerical aspects of transitional flow simulations using the RANS equations," International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol. 135, No. 3, pp. 157-178, 2021. DOI: 10.1080/10618562.2020.1870962.

- [16] G. Vaz, F. Jaouen, and M. Hoekstra, "Free-surface viscous flow computations: validation of urans code FreSCo," 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Vol. 43451, pp. 425–437, 2009. DOI: 10.1115/OMAE2009-79398.
- [17] C. Seyfert, and A. Krumbein, "Comparison of a local correlation-based transition model with a e^N -method for transition prediction," New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics VIII, Vol. 121, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 541-548, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-35680-3_64.
- [18] C. Seyfert, "Application of a transition transport model to industrially relevant aerodynamic configurations," ODAS 2011 – 11th ONERA-DLR Aerospace Symposium, Toulouse, France, Conference Proceedings, pp. 1-8, 8-10 February 2011.
- [19] C. Seyfert, A. Krumbein, "Evaluation of a correlation-based transition model and comparison with the e^N -method", Journal of Aircraft, Vol. 49, No. 6, pp. 1765-1773, 2012. DOI: 10.2514/1.C031448.
- [20] C. L. Rumsey, and E. M. Lee-Rausch, "NASA trapezoidal wing computations including transition and advanced turbulence modelling," Journal of Aircraft, Vol. 52, No. 2, pp. 496-509, 2015. DOI: 10.2514/1.C032754.
- [21] H. Atik, "Estimation of Discretization uncertainty using the γ - $Re\theta$ transition model for transitional flows on 6:1 spheroid", ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 144, pp. 111501-1-12, 2022. DOI: 10.1115/1.4054740.
- [22] H. U. Meier, U. Michel, and H. P. Kreplin, "The Influence of wind tunnel turbulence on the boundary layer transition," DFVLR-AVA, Report No. IB 222-86 A 39, 1986.
- [23] H. P. Kreplin, H. Vollmers, H. U. Meier, "Wall shear stress measurements on an inclined prolate spheroid in the DFVLR 3m x 3m low speed wind tunnel, Gottingen," DFVLR-AVA, Report No. IB 222-84 A 33, 1985.
- [24] Menter, F. R., Smirnov, P. E., Liu, T., Avancha, R., "A One-Equation Local Correlation-Based Transition Model," Flow, Turbulence and Combustion, 95(4), 583-619, 2015. DOI: 10.1007/s10494-015-9622-4.