UHUK-2020-056

# GELİŞMİŞ DDES YÖNTEMLERİ İLE TÜRBÜLANSA GEÇİŞLİ AKIŞ PROBLEMİ BENZETİMİ

Özgür Yalçın<sup>1</sup> ODTÜ, Ankara

Kenan Cengiz<sup>2</sup> Leibniz University, Hannover Yusuf Özyörük<sup>3</sup> ODTÜ, Ankara

### ÖZET

Bu çalışmanın amacı, farklı qeciktirilmiş ayrık-çevrinti benzetimi (DDES) yöntemlerinin akış ayrılması ve türbülansa qeçiş olayını kestirmedeki başarımlarını kıyaslamaktır. Bu sebeple dairesel silindir etrafında cereyan eden çeşitli Reynolds sayılarına sahip  $(10^4 - 10^6)$  sıkıştırılamaz akış çözümleri gerçekleştirilmiştir. Standart DDES yönteminin yanı sıra DDES'in kayma-tabakasıuyumlu (SLA) grid-altı uzunluk ölçeği ve Baş-Çakmakcıoğlu (BCM) korelasyon temelli geçiş modeli yöntemlerini içeren gelişmiş türleri kullanılmıştır. Elde edilen çözümler, literatürdeki deneysel verilere en yakın sürüklenme katsayısı değerlerinin geçiş modelli DDES yöntemi ile elde edildiğini göstermiştir. Ancak geçiş modeli kullanımına rağmen Reynolds sayısı yükseldikçe ayrılma açısı tahmini zorlaşmaktadır. SLA uzunluk ölçeği kullanıldığında ise standart DDES'in aksine iki farklı karakterde ayrılma gözlemlenmiştir. İkinci oluşan ve sonrasında iz bölgesini oluşturan türbülanslı akış ayrılması, deney sonuçlarına oldukça yakındır. Burada, SLA sayesinde DDES'in modelleme modundan çözümleme moduna hızlı qeçiş yapılmasının ve böylece çevrinti viskozitesinin görece düşük olmasının payı vardır. Yine de bu sonuç, sürüklenme katsayısı değerlerine yeteri kadar yansımamıştır. Bunların dışında, tüm akış koşullarında herbir DDES yöntemi, zamana bağlı Reynolds-ortalamalı Navier-Stokes (URANS)'tan bariz şekilde daha iyi sonuçlar vermiştir.

### GIRIŞ

DDES yönteminin, son yıllarda hem endüstride hem de akademik çalışmalarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Bunun sebebi duvar-sınırlı akış problemlerinde büyük-çevrinti benzetimi (LES) yöntemine göre DDES daha az grid noktasına ihtiyaç duyarken URANS'a kıyasla LES sonuçlarına daha fazla yakınsamasıdır. DDES kabaca URANS denklemlerini çözen melez bir modeldir; duvara yakın bölgelerde tamamen URANS benzetimi gibi çalışırken sınır tabakanın dışında -akış denklemlerine ek olarak çözdüğü- türbülans model denklemindeki uzunluk ölçeği yerine grid-altı uzunluk ölçeğini kullanarak LES gibi davranmaktadır. Bir başka deyişle duvara yakın bölgelerde

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Araştırma görevlisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: ozgur.yalcin@ae.metu.edu.tr

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Araștırmacı Dr., Institute of Turbomachinery and Fluid Dynamics, E-posta: cengiz@tfd.uni-hannover.de

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: yusuf.ozyoruk@ae.metu.edu.tr

türbülanslı yapıların tümünü modellerken diğer bölgelerde büyük kısmını doğrudan çözümlemeye çalışmaktadır. Ancak adından de anlaşıldığı üzere ayrılmış akışlar için geliştirilmiş olan bu model, akış ayrılmasının az olduğu bölgelerde RANS modundan (modelleme modu) LES moduna (çözümleme modu) geçişin yavaş olması sebebiyle akış fiziğini doğru şekilde yakalayamamaktadır. Yakın zamanda önerilen kayma-tabakası-uyumlu (ing: shear-layer-adapted, SLA) grid-altı uzunluk ölçeği [Shur vd., 2015], kayma tabakası içerisindeki Kelvin-Helmholtz (K-H) kararsızlık dalgalarını tespit ederek DDES'in LES modunu daha erken etkinleştirmektedir. Çalışmalar SLA ile DDES'in kesme (kayma) akışı, jet akışı, basamaktan ayrılan akış gibi problemlerde oldukça başarılı olduğunu göstermiştir. Bunların dışında SLA uzunluk ölçeğinin kullanımının, sınır tabaka içerisindeki laminar ayrılmayı kestirmede standart DDES ve türbülans geçiş modelli RANS uygulamalarına göre daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir [Yalçın vd., 2018]. Ancak DDES ile ayrılma başlangıç noktasının kesin konumu, geçiş modeli kullanılmamasından dolayı tahmin edilememiştir; bu da kalın bir kanat profili etrafında özellikle perdövites bölgesine yakın hücum açılarında kaldırma ve sürüklenme katsayılarında farklılığa sebep olmaktadır. Son zamanlarda DDES'in geçiş akışı alanında kabiliyetini artırabilmek için geçiş modelli DDES çalışmalarına yönelim artmaktadır [Coder ve Ortiz-Melendez, 2019; Xiao vd., 2019; Cui vd., 2020].

Bu çalışmada -akış dinamiğinde temel bir problem olan- dairesel silindir etrafında farklı DDES metotlarının akış ayrılmasını tahmin etme kabiliyetleri incelenmiştir. Türbülans benzetim yöntemleri olarak URANS, standart DDES ve SLA uzunluk ölçekli DDES (DDES-SLA) kullanılmıştır. Geçiş modeli olarak ise BCM korelasyon temelli türbülans geçiş modeli [Cakmakçıoğlu vd., 2018] kullanılmıştır. Benzetimler,  $10^4 - 10^6$  Reynolds (Re) sayıları aralığındaki sıkıştırılamaz akış problemlerine yönelik yapılmıştır. Sonuçlar, literatürde yer alan deneysel veriler [Weiselberger, 1922; Delany ve Sorensen, 1953] ve  $\gamma$  -  $Re_{\theta}$  geçiş modeline sahip bir başka DDES çalışması [Sørensen vd., 2011] ile karşılaştırılmıştır. Bu bildirinin devamında öncelikle akış çözücüsü tanıtılıp, SLA ve BCM yöntemleri tarif edilmiştir. Grid bağımlılığı çalışmasının ardından girdap, çevrinti, ayrılma konumu ve sürüklenme katsayısı gibi akış benzetimi sonuçları grafik ve figürlerle gösterilip yorumlanmıştır.

### YÖNTEM

#### Sayısal Çözücü - METUDES

Çalışmada sunulan akış problemi sonuçları, ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği bünyesinde geliştirilmiş METUDES adlı kod ile elde edilmiştir [Cengiz, 2018; Cengiz ve Özyörük, 2020]. Uzamsal ayrıştırma için 4. mertebeden düşük kayıplı sonlu hacimler yöntemi kullanan bu çözücü, zaman tümlevini ise önkoşullama ve artık düzeltme yaklaşımları ile desteklenen çift-zaman adımları ile 2. doğruluk mertebesinde yapmaktadır. Sayısal çözümler yapısal ağ alanlarında gerçekleşmektedir. Aynı zamanda çoklu-blok ve içiçe ağ (ing: overset) yetkinliklerine sahip olan kod, grid oluşturmada esneklik sağlamaktadır. METUDES, akış denklemlerini URANS ve DES'in çeşitli sürümleriyle çözebilmektedir.

#### Türbülans Model Denklemi - Spalart-Allmaras'ın modifiye hali

Türbülans modeli olarak RANS denklemleriyle eş zamanlı çözülen Spalart-Allmaras (S-A) tek türbülans denklemi (bkz. Denklem 1) kullanılmaktadır. Denklemde  $\tilde{\nu}$ , çevrinti viskozitesiyle bağlantılı terimi; V, akış hız vektörünü ifade eder.

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \tilde{\nu} = \Psi + \Pi - \Phi \tag{1}$$

Eşitliğin sağ tarafındaki semboller sırasıyla türbülansın yayılım, üretim ve yıkım olaylarını yansıtmaktadır:

$$\Psi = \nabla \cdot \left(\frac{\nu + \tilde{\nu}}{\sigma} \nabla \tilde{\nu}\right), \quad \Pi = c_{b1} \tilde{S} \tilde{\nu} + \frac{c_{b2}}{\sigma} |\nabla \tilde{\nu}|^2, \quad \Phi = c_{w1} f_w \left[\frac{\tilde{\nu}}{d_w}\right]^2 \tag{2}$$

Burada  $\nu$  moleküler kinematik viskozitedir. Denklemlerdeki diğer değişkenler toplu bir şekilde aşağıda verilmiştir:

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}^3}, \quad \chi = \frac{\tilde{\nu}}{\nu}, \qquad \tilde{S} = S + \frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2 d^2} f_{v2}, \quad f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}$$

$$f_w = g \left[ \frac{1 + c_{w3}^6}{g^6 + c_{w3}^6} \right]^{1/6}, \quad g = r + c_{w2} (r^6 - r), \quad r = \min\left(\frac{\tilde{\nu}}{\tilde{S} \kappa^2 d^2}, r_{max}\right)$$
(3)

Buradaki girdap büyüklüğü terimi,  $S = |\omega| = |\nabla \times \mathbf{V}|$  şeklinde hesaplanır.  $d_w$ , türbülans modelinin uzunluk ölçeğidir ve en yakın duvar uzaklığı olarak hesaplanır. Geri kalan parametreler şöyledir:

$$\sigma = 2/3, \ c_{b1} = 0.1355, \ c_{b2} = 0.622, \ \kappa = 0.41, \ c_{w1} = \frac{c_{b1}}{\kappa^2} + \frac{1 + c_{b2}}{\sigma},$$

$$c_{w2} = 0.3, \ c_{w3} = 2, \ c_{v1} = 7.1, \ r_{max} = 10$$
(4)

METUDES, S-A denkleminin bu standart hali yerine değiştirilmiş bir halini [Crivellini vd., 2013] kullanmaktadır. Burada amaç, negatif çevrinti viskozite değerini ve yarattığı sayısal zorlukları gidermektir. Aynı zamanda bu versiyon, laminar akış ayrılması durumlarında geçiş akışı davranışına izin vermektedir (tabi ki duvara yapışık akışlarda doğrudan bir geçiş modeli kullanmak gerekir). Değiştirilmiş halinde S-A'nın kaynak terimleri şu şekilde verilmiştir:

$$\Pi - \Phi = \begin{cases} 0, & \tilde{\nu} < 0\\ \left[\frac{c_{b1}}{\kappa^2 r} - c_{w1} f_w\right] \left(\frac{\tilde{\nu}}{d_w}\right)^2 + \frac{c_{b2}}{\sigma} |\nabla \tilde{\nu}|^2, & \tilde{\nu} \ge 0 \end{cases}$$
(5)

$$\Psi = \nabla \cdot \left(\frac{\nu + \max[\tilde{\nu}, 0]}{\sigma} \nabla \tilde{\nu}\right) \tag{6}$$

$$r^* = \left(\frac{S\kappa^2 d_w^2}{\tilde{\nu}} + f_{v2}\right)^{-1} \tag{7a}$$

$$r = \begin{cases} r_{max}, & r^* < 0\\ \min(r^*, r_{max}), & r^* \ge 0 \end{cases}$$
(7b)

Geri kalan değişkenler ve parametreler özgün durumdakiyle aynıdır. Türbülans denklemi çözüldükten sonra eş-zamanlı olarak RANS denklemlerine eklenen türbülans viskozite değeri hesabı ise aşağıdaki gibi yapılmaktadır:

$$\mu_t = \rho f_{v1} \max(\tilde{\nu}, 0) \tag{8}$$

#### Türbülans Benzetim Yöntemi - DDES-SLA

DDES sınır tabakanın içinde yıkım teriminde yer alan uzunluk ölçeğini duvara en yakın uzaklık  $(d_w = l_{RANS})$  olarak alırken sınır tabakasının uzak bölgelerinde grid-altı uzunluk ölçeği  $(C_{DES}\Delta = l_{LES})$  olarak hesaplamaktadır. LES modunun sınır tabaka içerisinde grid yapısından

$$l_{DDES} = l_{RANS} - f_d \max(0, l_{RANS} - l_{LES}) \tag{9}$$

Klasik DDES uygulamalarında grid-altı uzunluk ölçeği,  $\Delta$ , çözüm ağı hücresinin en büyük kenarına eşitlenir. RANS modundan LES moduna geçişi hızlandıran kayma-tabakası-uyumlu uzunluk ölçeği,  $\Delta_{SLA}$  [Shur vd., 2015], hesabı ise daha karmaşıktır. Bu yeni yaklaşım hem grid yapısına hem de akışın üç boyutlu (3B) özelliğine bağlıdır. Öncelikle girdaba bağlı uzunluk ölçeği hesaplanmalıdır:

$$\tilde{\Delta}_{\omega} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{n,m=1,8} |\mathbf{I_n} - \mathbf{I_m}|$$
(10)

Burada  $I_n = n_\omega \times r_n$  şeklinde hesaplanırken  $n_\omega$  girdap birim vektörünü,  $r_n$  ise hücre köşe noktalarının pozisyon vektörünü göstermektedir. Bu tanım, kayma tabakasındaki girdap yönündeki uzunluk ölçeğine bağlılığı (*xy* alanında genellikle  $\Delta_{max} = \Delta z$ ) kaldırmaktadır; böylece, 2B benzeri bölgelerde çevrinti viskozitesinin azalması teşvik edilir ve LES moduna geçiş hızlanabilir. Ancak bu tek başına yeterli olmamaktadır. 2B benzeri bölgelerde K-H kararsızlık dalgalarını tespit etmek gerekir. Bunu sağlamak için Girdap Dönme Ölçüsü (VTM) diye ifade edilen bir sensör önerilmiştir. Hesabı şöyledir:

$$VTM = \frac{\sqrt{6} |(\hat{\mathbf{S}} \cdot \omega) \times \omega|}{\omega^2 \sqrt{3tr(\hat{\mathbf{S}}^2) - \left[tr(\hat{\mathbf{S}})\right]^2}}$$
(11)

$$F_{KH}(\langle VTM \rangle) = \max\left[F_{KH}^{min}, \min\left\{F_{KH}^{max}, F_{KH}^{min} + \frac{F_{KH}^{max} - F_{KH}^{min}}{a_2 - a_1}(\langle VTM \rangle - a_1)\right\}\right]$$
(12)

Denklemdeki  $\langle \cdot \rangle$  işareti, komşu hücrelerdeki değerlerin ortalaması demektir.  $F_{KH}$  fonksiyonu kabaca VTM sensörüne bağlı olarak akışta kararsızlık tespit edildiğinde uzunluk ölçeğini, dolayısıyla çevrinti viskozitesini düşürmektedir.  $F_{KH}^{max} = 1$  ile özgün uzunluk ölçeği korunmaktadır. Diğer değerler sayısal deneylerle belirlenmiş olup  $F_{KH}^{min} = 0.1$ ,  $a_1 = 0.15$  ve  $a_2 = 0.3$  şeklindedir.

SLA uzunluk ölçeğinin son hali şöyledir:

$$\Delta_{SLA} = \tilde{\Delta}_{\omega} F_{KH}(\langle VTM \rangle) \tag{13}$$

Burada K-H kararsızlık dalgaları görüldüğü yerlerde girdap-uyumlu ölçek bir mertebe düşürülmektedir; böylece akış ortamında hızlı bir şekilde 3B yapıların oluşmasına zemin hazırlanmaktadır. Duvara bitişik akışlarda DDES grid-altı uzunluk ölçeğini ( $\Delta_{max}$ ) bozmamak için aşağıdaki limitleyici önerilmektedir:

$$F_{KH}^{lim} = \begin{cases} 1.0, & f_d < 0.99\\ F_{KH}, & f_d \ge 0.99 \end{cases}$$
(14)

#### Geçiş Modeli - Baş-Çakmakçıoğlu'nun modifiye hali

Sınır tabaka içerisindeki geçiş olayının başlangıç noktasını tahmin edebilmek için Baş-Çakmakçıoğlu modeli kullanılmıştır <sup>1</sup>. Bu model fazladan denklem çözmeden S-A türbülans denkleminin üretim terimini, sıfırdan bire değişen aralıklılık fonksiyonuyla ( $\gamma_{BCM}$ ) çarpar; böylece akış içerisinde türbülanslı yapı yokken üretim terimi sıfırlanırken empirik denklemlerle tespit edilen geçiş olayı

 $<sup>^{1}</sup>$ Yakın zamanda bu modelin yeniden ele alınmış hali (BCM) yayınlanmıştır [Mura ve Çakmakçıoğlu, 2020] ve bu çalışma doğrudan onu kullanmaktadır.

kriterleri sağlandığında aynı terim hızlıca aktif hale gelmektedir. Hesaplama maliyeti düşük olan  $\gamma_{BCM}$  değeri şu şekilde elde edilir:

$$\gamma_{BCM} = 1 - \exp(-\sqrt{Terim_1} - \sqrt{Terim_2}) \tag{15}$$

$$Terim_1 = \frac{\max(Re_\theta - Re_{\theta c}, 0.0)}{\chi_1 Re_{\theta c}}, \quad Re_\theta = \frac{Re_v}{2.193}, \quad Re_v = \frac{d_w^2 \Omega}{\nu}$$
(16)

$$Terim_2 = \frac{\max(\nu_t, 0.0)}{\chi_2 \nu} \tag{17}$$

Burada  $\chi_1 = 0.002$  ve  $\chi_2 = 0.02$  kalibrasyon katsayılarıdır.  $\nu$  ve  $\nu_t$  sırasıyla moleküler ve çevrinti kinematik viskozitedir.  $\Omega$  ise girdap vektörü büyüklüğüdür.  $Re_{\theta c}$  literatürde sıkça karşılaşılan ve empirik denklemlerle hesaplanan kritik momentum kalınlığına bağlı Reynolds sayısıdır. Denklem 15'teki  $Terim_1$  yaygın olarak kullanılan Menter'in geçiş akışı tahmin etmede kullandığı terimden türetilmiştir. Burada farklılığı yaratan ise geçiş başlangıç noktasını tahmin ettikten sonra sınır tabaka içerisinde akış yönünde aralıklılık fonksiyonunu 1.0 değerinde tutan  $Terim_2$ 'dir. Modelin tanıtıldığı çalışma birçok durağan akış problemlerinde başarıyla test edildiğini göstermektedir.

Bu çalışmada BCM modeli ile geçişken DDES yaratarak, durağan olmayan ve farklı akış ayrılmalarına sahip problemleri çözmek amaçlanmıştır. DDES'in çalışma prensibinde, S-A denklemindeki üretim ve yıkım terimlerinin dengesi önem arz ettiği için bunu sağlamak adına  $\gamma_{BCM}$  fonksiyonu özgün makalede gösterilenden farklı olarak hem üretim hem yıkım terimiyle çarpılmıştır.

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \tilde{\nu} = \Psi + \gamma_{BCM} (\Pi - \Phi)$$
(18)

### GRİD BAĞIMLILIĞI ÇALIŞMASI

Dairesel silindir etrafında sıkıştırılamaz akış benzetimleri, 4 farklı Re sayısı için gerçekleştirilmiştir:  $Re = 10^4, 10^5, 5.0 \times 10^5$  ve  $10^6$ . Oluşturulan grid ortamının türbülanslı akışı çözümlemede (kullanılan model kabiliyet sınırları içerisinde) yeterli olduğundan emin olabilmek için çözüm ağı (grid) bağımlılığı çalışması çözülen problemlerin Reynolds sayısı en büyük olan durum için  $(\text{Re} = 10^6)$  yapılmıştır. DES ağ bağımlılığı yaklaşımı, RANS problemleri için uygulanandan farklıdır. Sınır tabakanın içinde (çoğunlukla türbülans modellendiğinden) klasik RANS çözüm ağı oluşturulurken türbülansın doğrudan çözüldüğü bölgelerde (bu problem için iz ve kanat açıklığı boyunca) ağ yoğunluğu ve düğüm sayısı değiştirilerek sonuçların gridden bağımsız olduğu gösterilebilir. Bu çalışmada kullanılan ağ ortamı, daire etrafında oluşturulan O-tipi gridin 3. yönde tekdüze olarak uzatılmasıyla oluşturulmuştur. Sınır tabaka içinde duvara dik yöndeki grid özellikleri şöyledir:  $y^+ \approx 1$ ; viskoz, ara ve log katmanlarındaki büyüme oranı 1.2; dış katman başlangıcından sınır tabakanın 2 kat büyüklüğüne kadar olan bölgede büyüme oranı 1.05 olarak alınmıştır. Burada son büyüme oranının RANS ağ yapılarından farklı olmasının sebebi, SLA uzunluk ölçeği kullanıldığı durumda LES bölgesinin sınır tabakanın içine girme olasılığıdır. LES bölgesi, Spalart'ın tavsiyeleri [Spalart ve Streett, 2001] ve yazarların deneyimleri ısığında oluşturulmuştur. Iz bölgesi üç farklı bölge olarak ele alınmıştır (D: Daire çapı): Viskoz Bölge (0.5D - 1.5D), Odak Bölgesi (1.5D - 15.0D) ve Euler Bölgesi (15.0D - 50.0D). Viskoz ve Odak Bölgeler türbülansın LES modu ile çözüldüğü bölgelerdir. LES bölgesinin küp şeklinde hücrelere sahip olması bekleneceğinden buradaki yoğunluğu (daha doğrusu 2 boyutta en büyük grid uzunluğunu,  $\Delta_{maks}$ ) 3. yöndeki eleman uzunluğu,  $\Delta_z$ , belirlemektedir. Bu doğrultuda grid bağımlılığı çalışmasının kıstaslarından biri olarak, Odak Bölgesi'nde iki farklı  $\Delta_{maks}$  ( $\Delta_z$  ve  $2\Delta_z$ ) kullanılmıştır (bkz. Tablo 1). Referans verilen çalışmalar ve METUDES'in yüksek mertebe ayrıştırma yöntemi dikkate alınarak  $\Delta_z$ , 0.03125D alınmıştır. 3. yönde tekrarlayan sınır şartı uygulandığı için o yöndeki kanat açıklığı uzunluğu, grid bağımlılığı çalışmasında bir diğer kıstas olarak ele alınmış ve 3 farklı açıklık

(0.5D, 1.0D, 1.5D) denenmiştir. İz bölgesinde farklı yoğunluğa sahip iki gridin yakın ve uzak görünümleri Şekil 1'de görülebilir. Grid 1 tek bloktan oluşurken Grid 2'de çoklu-blok yöntemi ile iz bölgesinde daha yoğun çözüm ağı elde edilmiştir.



Şekil 1: Dairesel silindir kesiti etrafındaki iki farklı yoğunluktaki çözüm ağının uzak ve yakın görünüşleri

Standart DDES ile çözülen 4 farklı gride sahip  $10^6$  Re sayılı akış problemlerinin grid özellikleri, düğüm sayıları, sürüklenme katsayıları ( $C_d$ ) ve ayrılma açıları ( $\theta_{ayrulma}$ ) Tablo 1 içerisinde gösterilmiştir. Karşılaştırma amaçlı referans verilen standart DDES çalışmasının sonuçları da eklenmiştir. Tablo'dan anlaşıldığı gibi Grid 1 ve Grid 2'li çözümler yakın aerodinamik sonuçlara varmaktadır. Bir başka deyişle Odak Bölge'deki yoğunluğu artırmak sonuçları daha fazla iyileştirmemektedir. Öte yandan (aynı Odak Bölge yoğunluğu için) kanat açıklığının değiştirildiği Grid 1, Grid 3 ve Grid 4 sonuçları, açıklığın en az 1.0D olarak seçilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu sebeple çalışmanın geri kalanı Grid 3 ile yapılmıştır. Sonuçların karşılaştırıldığı DDES çalışması ile Grid 3 sonuçları her ne kadar örtüşmese de her ikisi de geçiş modelsiz olup deney sonuçlarını yakalayamamaktadır. Geçiş modelli ve SLA ölçekli DDES'i de içeren tüm sonuçlar bir sonraki bölümde detaylı olarak gösterilecektir. Burada referans çalışmasının tabloya konma sebebi, her iki çalışma arasında kullanılan hücre sayısı ve kanat açıklığı bilgilerinin kıyaslanmasıdır.

	Grid 1	Grid 2	Grid 3	Grid 4	$DDES^1$
$\Delta_z$	0.03125D	0.03125D	0.03125D	0.03125D	0.0156D
$\Delta_{maks}$ (Odak Bölge)	$0.06250 {\rm D}$	0.03125D	$0.06250\mathrm{D}$	0.06250 D	-
kanat açıklığı	0.5D	0.5D	1.0D	1.5D	2.0D
toplam hücre sayısı	0.69 milyon	0.82 milyon	1.37 milyon	2.1 milyon	8.4 milyon
$C_d$	0.59	0.60	0.49	0.47	0.57
$ heta_{ayrılma}$	110.7	112.5	106.9	106.3	103.3

Tablo 1: Grid bağımlılığı çalışması. 1:[Sørensen vd., 2011]

### **BENZETİM UYGULAMALARI**

Dairesel silindir problemi yüksek Re sayılarında laminar, tam türbülanslı ve geçiş akış profillerini birlikte içerdiğinden model testleri için oldukça uygundur. Büyük akış ayrılmaları gözlemlenen problemler için yaratılan DDES türbülans modelleme-çözümleme benzetim yöntemi için bu problem oldukça zordur. Bu çalışmada, yakın zamanda geliştirilen farklı modellerle DDES'in kabiliyeti sınanmış ve sonuçları bu bölümde sunulmuştur. Rahat takip edilebilmesi için bazı benzetim yöntemi kısaltmaları kullanılmıştır: Standart DDES, DDES ile; SLA uzunluk ölçekli DDES, DDES-SLA ile; BCM geçiş modelli standart DDES ise DDES-BCM ile ifade edilmektedir. Karşılaştırmak için hem geçiş modelsiz (tam türbülans) hem de  $\gamma$  -  $Re_{\theta}$  geçiş modeline sahip bir başka DDES çalışmasının [Sørensen vd., 2011] sonuçları ile literatürde yer alan farklı Re sayılarına ait deneysel veriler [Weiselberger, 1922; Delany ve Sorensen, 1953] de bu bölümde yer almaktadır. Referans DDES çalışması türbülans modeli olarak  $k - \omega$  SST denklemleri kullanırken bu çalışmadaki tüm benzetim yöntemleri değiştirilmiş S-A denklemini temel almaktadır. Sözü geçen değişiklik sayesinde tüm benzetimler,  $\tilde{\nu}/\nu_{\infty} = 10^{-8}$  değeri ile başlatılabilmiştir. Böylece gelen akış laminar olarak belirlenmiş olmaktadır. DDES'in üstünlüğünü göstermek için her Re sayısı için URANS sonuçlarına da yer verilmiştir.

Çözüm ağı olarak bir önceki bölümde tarif edilen Grid 3 kullanılmıştır.  $10^4 - 10^6$  Re aralığındaki benzetimler 0.1 Mach sayısı için gerçekleşmiştir. Geçiş modelli benzetim ve deneylerde türbülans yoğunluğu %0.13'tür. Silindir yüzeyde kaymaz sınır şartı, uzak alanda ise Riemann sınır koşulu uygulanmaktadır. Kanat açıklığındaki yanal yüzeyler tekrarlayan sınır şartıyla çözülmektedir. Ortalama akış değerleri, periyodik davranışın gözlenmeye başlandığı yaklaşık 100 - 400 birimsiz zaman aralığında alınmıştır.

Öncelikle, benzetim yöntemlerinin arasındaki türbülans modelleme ve çözümleme yaklaşımı farklılığını görebilmek için URANS, DDES ve DDES-SLA ile elde edilen ortalama çevrinti viskozitesi konturları (Şekil 2), anlık Q-kriteri eşyüzeyleri (Şekil 3) ve anlık girdap konturları (Şekil 4) gösterilmiştir. Akış içerisindeki türbülanslı yapıları göstermeye yardımcı olan Q-kriteri, hız büyüklükleriyle renklendirilmiştir. Şekil 2 ve Şekil 3 incelendiğinde, URANS tüm çevrinti yapılarını modellediği için akış ayrılması sonrası (iz bölgesinde dahi) büyük çevrinti viskozite değerlerini ortaya çıkarmıştır; bu da üç boyutlu yapıların ortaya çıkamamasına yol açmaktadır. Oysa, DDES yöntemi ile ayrılma sonrası daha düşük viskozite ve dolayısıyla üç boyutlu yapılar ortaya çıkmaktadır. Burada duvara uzak bölgede LES modunun aktif olduğu ve modelleme yerine çözümleme işleminin gerçekleştiği anlaşılmaktadır. SLA uzunluk ölçeği kullanıldığında ise modelleme modundan çözümleme (LES) moduna geçişin hızlandığı, bu nedenle DDES'in aksine akış ayrılması sonrası türbülanslı yapıların hemen ortaya çıktığı görülmüştür. Akış ayrılmasının başladığı yerde çevrinti viskozitesi değerlerinin küçülmesi bu sonucu doğurabilmiştir. Şekil 4'te yer alan anlık girdap görüntülerinde de bu farklılık görülebilir. SLA ile iz bölgesinde yüzeye yakın girdapsı yapıların, DDES'e göre arttığı görülmektedir. URANS beklenildiği gibi 2-B davranış göstermiştir.

Zamanda ortalaması alınmış akış ortamından elde edilen sürüklenme katsayısı değerleri referans çalışmalarıyla birlikte Şekil 5'te gösterilmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında, Re sayısı yaklaşık



Şekil 2: Farklı yöntemlerle elde edilen zamanda ortalaması alınmış çevrinti viskozite  $(\tilde{\nu}/\nu_{\infty})$  konturları (Re = 10<sup>5</sup>)



Şekil 3: Farklı yöntemlerle elde edilen hız büyüklüğü ile renklendirilmiş anlık Q-kriteri eşyüzeyleri ( $Q = 10^3$ ,  $\text{Re} = 10^5$ )



Sekil 4: Farklı yöntemlerle elde edilen silindir arkası anlık girdap görüntüleri ( $\text{Re} = 10^6$ )

 $10^4 - 2.0 imes 10^5$  aralığındayken  $C_d$  değerlerinde fazla değişiklik görülmezken Re sayısı artırılmaya devam edildiğinde  $C_d$  oldukça düşmektedir. Bu durum silindir üzerindeki akışın laminardan türbülansa geçtiği kritik Re sayısının da işaretidir ( $Re_{kritik,silindir} = 2.5 \times 10^5 - 3.5 \times 10^5$ ). Artan Re ile laminar ayrılmadan sonra türbülansa daha erken geçen akış yüzeye de daha erken tutunmakta ve böylece, yüzey sürtünmesinin yükselmesine rağmen, ayrılmadan kaynaklı basınç sürüklenmesindeki görece fazla düşüş toplam  $C_d$ 'yi etkilemektedir. Bu nedenle türbülansa geçiş olayı  $C_d$ 'yi hesaplamada oldukça önemlidir. Şekilde görüldüğü üzere deneylerin ortaya koyduğu  $C_d$ eğilimini yalnızca geçiş modelli DDES çalışmaları göstermektedir. Özellikle kritik Re sayısına yakın bölgede diğer yöntemlerle fark oldukça fazladır. Burada şunu vurgulamakta yarar var: DDES-BCM yöntemi -referans çalışmasıyla kıyaslandığında- çok daha az düğüm sayısı ile fazladan diferansiyel denklem cözmeden bu sonuçlara ulaşmıştır<sup>2</sup>. Bunun yanısıra, mevcut her bir Re sayısındaki değerler karşılaştırıldığında beklenildiği gibi DDES, URANS'tan belirgin biçimde daha iyi sonuçlar göstermiştir. Burada dikkate değer bir diğer nokta, geçiş modeline sahip olmayan DDES-SLA yönteminin standart DDES çalışmalarına göre deney ve geçiş modelli benzetim değerlerine daha yakın değerler elde etmesidir. Bu sonuçlar genel bir yargı ortaya koysa da akış ortamına daha detaylı bakılmalıdır.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Burada bahsedilen üstünlüğün elde edilmesinde METUDES'in düşük kayıplı ve dolayısıyla pahalı ayrıştırma yöntemlerinin payı vardır. Yine de sadece tek türbülans denklemiyle bu sonuçların elde edilmesi, DDES-BCM yöntemini oldukça cazip hale getirmektedir.



Şekil 5: Farklı Re sayıları için hesaplanmış sürüklenme katsayısı değerlerinin karşılaştırılması. 1:[Sørensen vd., 2011], 2:[Weiselberger, 1922; Delany ve Sorensen, 1953]



Şekil 6: Farklı Re sayıları için hesaplanmış akış ayrılması ve çevrinti viskozitesi başlangıç noktası açı değerlerinin karşılaştırılması

Profil sürüklenme katsayısını oluşturan etkenleri incelemek için Şekil 6'da akış ayrılması ve bazı çevrinti viskozitesi değerlerinin ilk görüldüğü noktaların açıları (hücum kenarı başlangıç noktası kabul edilerek) gösterilmiştir. Ayrılma açısı, akışın yüzeyden ayrılıp tamamen iz bölgesini oluşturduğu noktayı işaret etmektedir. Çevrinti açıları ise iki farklı değerin ilk görüldüğü noktayı göstermektedir:  $\tilde{\nu}/\nu_{\infty} = 0.001$  ve  $\tilde{\nu}/\nu_{\infty} = 3.0$ . Şekil 6a'da gösterilen deney değerlerinde kritik Re sayısı sonrası ayrılma noktası açılarının yüksek olmasının sebebi, daha önce de bahsedildiği gibi laminar ayrılma sonrası türbülansa geçen akışın tekrar tutunmasıyla, devamında iz bölgesini oluşturan ayrılmanın gecikmesidir. DDES-SLA çalışması dışındaki tüm çalışmalar tekrar tutunma olayını yakalayamayıp, ayrılan akışın doğrudan iz bölgesini oluşturduğunu göstermektedir (ayrıca bkz. Şekil 7). Bu yüzden yüksek Re sayılarında diğer çalışmalar deneyden büyük farkla ayrılmaktadır. DDES-SLA için iki farklı izge gösterilmiştir. Kesik çizgili olanı diğerlerinden farklı olarak ikinci ayrılma olan türbülans ayrılmasını göstermektedir. SLA uzunluk ölçeği ile yüksek Re'de deneye en yakın değerler elde edilse de Re =  $10^5$  için deneyden ve teoriden farklı olarak yüzey üzerinde iki farklı ayrılma gözükmektedir. Öte yandan, kritik Re sayılarına kadar olan bölgede geçiş modelli DDES çalışmaları daha başarılı olmuştur. Bunun sebebini anlamak için Şekil 6b'de

gösterilen viskozite başlangıç açılarına bakılabilir. Benzetim yönteminden bağımsız olarak hemen hemen aynı çevrinti viskozite başlangıç noktaları elde edilmiştir. Burada DDES-BCM yöntemi, fazladan geçiş modeli kullandığı için farklılaşmıştır. Özellikle tamamen laminar davranış gösteren  $10^4$  Re sayısı dışında diğerlerinden tamamen ayrılmaktadır. Kullanılan geçiş modeli, akış içerisindeki kararsızlık geçiş kriterini sağlayana kadar türbülans denkleminin üretim terimini aktif hale getirmemektedir. Bu sebeple türbülans başlangıcı ötelenmiş ve sürüklenme katsayısında daha iyi sonuçlar elde edilebilmiştir.



Şekil 7: Dairesel silindir etrafında farklı yöntemlerle elde edilen zamanda ortalaması alınmış akış çizgileri (Re $=5.0\times10^5)$ 



Şekil 8: Dairesel silindir etrafında farklı Re sayıları için DDES-SLA yöntemi elde edilen zamanda ortalaması alınmış akış çizgileri

Şekil 7 ve 8'de silindir çevresindeki ortalama akış çizgileri gösterilmiştir. İlkinde kritik Re sayısı sonrası ( $\text{Re} = 5.0 \times 10^5$ ) 4 farklı yöntem ile elde edilen, ikincisinde ise DDES-SLA ile 4 farklı Re sayısı için elde edilen sonuçlar eklenmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, URANS'ın daha dar bir iz bölgesi elde ettiği görülüyor. İz bölgesinde LES modu ile türbülansın çözülmesinin etkisi böylece ortaya

çıkmaktadır. Önceki grafikler için de yorumlandığı gibi sadece DDES-SLA, (kırmızı kare ile işaret edilen) beklenen türbülans tutunmasını ve ardından gelen ikinci ayrılmayı elde etmiştir. Bunun sebebini anlamak için ayrıca Şekil 2 ve Şekil 6 göz önünde bulundurulmalıdır. DDES-SLA yöntemi, geçiş modelsiz diğer yöntemlerde de görüldüğü gibi, ilk ayrılma öncesi çevrinti viskozitesini tam türbülans değerlerine getirmiş görünmektedir. Ancak VTM algılayıcısı ile kararsızlık dalgalarını saptayan DDES-SLA, türbülans uzunluk ölçeğini düşürerek viskozite değerlerini düşürmektedir. Daha hızlı aktif olan LES modu ile akışın tekrar tutunması gerçekleşebilmiş ve ardından türbülanslı akış ayrılması ile iz bölgesi oluşmuştur. Öte yandan, Şekil 8'de Re sayısı ile ayrılma ve iz bölgesinin değişimi görülebilir. Re =  $10^4$  iken laminar ayrılan akışın yüzeye tekrar tutunamadan iz bölgesine karıştığı görülmektedir. Diğer Re sayılarında ise türbülanslı akış ayrılması sebebiyle daha uzun bir iz bölgesi meydana gelmektedir. Ayrıca artan Re ile geçiş olayı laminar ayrılmaya yaklaşmış ve daha erken ayrılan türbülanslı akış daha dar bir iz yaratmıştır.

#### SONUÇ

Dairesel silindir etrafında laminardan türbülansa geçiş olayının aerodinamik etkisi farklı benzetim çalışmalarıyla sınanmıştır. Çeşitli Re sayıları için URANS, DDES, DDES-BCM ve DDES-SLA yöntemleri karşılaştırılmıştır. Beklenildiği üzere tüm DDES çalışmaları URANS'tan daha iyi sonuçlar vermiştir. URANS, çevrinti yapıların tamamını modellediği için, silindir üzerinde akış ayrılması ile birlikte beklenen 3 boyutlu yapıları ortaya çıkaramamaktadır. Ayrıca, hem akış ayrılma noktasını hem de sürüklenme katsayılarını tahmin etmede başarısız olmuştur. DDES benzetim yöntemi ile sınır tabakası dışında çözümlenen türbülanslı yapılar ile daha doğru akış dinamiği elde edilmiştir. URANS'a göre düşük çevrinti viskozite değerleri ortaya çıkaran DDES, iz bölgesi boyunca 3 boyutlu akış profiline izin vermektedir; bu sayede iyileştirilmiş aerodinamik değerler elde edilmiştir. Literatürdeki deney değerlerine en yakın sürüklenme katsayısı sonuçlarını, geçiş modelli DDES çalışması ortaya koymuştur. Sadece geçiş olayı kriterlerine göre Spalart-Allmaras denkleminin kaynak terimlerini etkinleştiren veya devre dışı bırakan BCM geçiş modelini kullanan DDES-BCM yöntemi, silindir üzerinde diğer yöntemlere göre farklı noktalarda çevrinti viskozite değerlerini ortaya çıkarmıştır. Bu da doğrudan ayrılma açısını ve sürüklenme katsayını etkilemektedir. Sonuç olarak, düşük hesaplama maliyetine sahip BCM yönteminin DDES'e entegre edilmesiyle iyileştirilmiş akış dinamiği elde edilmiştir. Benzetim uygulamalarından çıkarılan bir diğer önemli sonuç, türbülans uzunluk ölçeği olarak SLA yöntemi kullanıldığında, yüksek Re sayılarında deneylere daha yakın akış ayrılması olayları gözlenmiş olmasıdır. DDES-SLA yöntemi, sınır tabaka içerisindeki Kelvin-Helmholtz kararsızlık dalgalarını tespit ederek çevrinti viskozite değerlerini düşürmek yoluyla LES modunu daha hızlı etkinleştirmiştir. Dolayısıyla, -diğer yöntemlerin aksineyüksek Re sayılı problemlerde laminar ayrılan akışın türbülansa geçerek yüzeye yeniden tutunmasını ve iz bölgesini oluşturan türbülans ayrılmasının daha geç olmasını sağlamıştır. Akış ayrılma açıları deney değerleriyle uyuşsa da, geçiş modelli DDES çalışmalarından daha iyi sürüklenme katsayıları elde edilememiştir. Burada, hem geçiş olayı başlangıç noktasını tahmin etmenin, hem de türbülansı doğru çözümlemenin önemi ortaya çıkmaktadır. İleriki çalışmalarda, SLA uzunluk ölçeğiyle uyumlu bir geçiş modeli kullanılarak DDES ile dairesel silindir etrafında daha iyi sonuçlar elde edilebileceği; ayrıca airfoil profilli kanat kesitlerinde uygulamaların yapılabileceği düşünülmektedir.

### TEŞEKKÜR

Bu araştırmada yer alan tüm sayısal hesaplamalar TÜBİTAK ULAKBİM Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynaklarında) ve ODTÜ RÜZGEM Yüksek Başarımlı Hesaplama Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Her iki kuruma da destekleri için teşekkür ederiz.

## Kaynaklar

- Cakmakçıoğlu, S. C., Baş, O., ve Kaynak, U., 2018. A correlation-based algebraic transition model. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 232(21):3915–3929.
- Cengiz, K., 2018. Use of detached eddy simulation for aerodynamics and aeroacoustics of blade sections. PhD thesis, Middle East Technical University.
- Cengiz, K. ve Ozyörük, Y., 2020. Experiences with two detached eddy simulation approaches through use of a high-order finite volume solver. *International Journal for Numerical Methods in Fluids.*
- Coder, J. G. ve Ortiz-Melendez, H. D., 2019. Transitional delayed detached-eddy simulation of multielement high-lift airfoils. *Journal of Aircraft*, 56(4):1303–1312.
- Crivellini, A., D'Alessandro, V., ve Bassi, F., 2013. A Spalart–Allmaras turbulence model implementation in a discontinuous Galerkin solver for incompressible flows. *Journal of Computational Physics*, 241:388–415.
- Cui, W., Xiao, Z., ve Yuan, X., 2020. Simulations of transition and separation past a wind-turbine airfoil near stall. *Energy*, page 118003.
- Delany, N. K. ve Sorensen, N. E., 1953. Low-speed drag of cylinders of various shapes.
- Mura, R. ve Çakmakçıoğlu, S. C., 2020. A revised one-equation transitional model for external aerodynamics-part i: Theory, validation and base cases. In *AIAA Aviation 2020 Forum*, page 2714.
- Shur, M. L., Spalart, P. R., Strelets, M. K., ve Travin, A. K., 2015. An enhanced version of des with rapid transition from rans to les in separated flows. *Flow*, *Turbulence and Combustion*, 95(4):709–737.
- Sørensen, N. N., Bechmann, A., ve Zahle, F., 2011. 3d cfd computations of transitional flows using des and a correlation based transition model. *Wind Energy*, 14(1):77–90.
- Spalart, P. R. ve Streett, C., 2001. Young-person's guide to detached-eddy simulation grids.
- Weiselberger, C., 1922. New data on the laws of fluid resistance, naca tech. Note TN84.
- Xiao, Z., Wang, G., Yang, M., ve Chen, L., 2019. Numerical investigations of hypersonic transition and massive separation past orion capsule by ddes-tr. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 137:90–107.
- Yalçın, Ö., Cengiz, K., ve Özyörük, Y., 2018. High-order detached eddy simulation of unsteady flow around nrel s826 airfoil. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 179:125–134.