

Duvarla Çevrili Türbülanslı Akışlar İçin Yüksek Doğruluklu LES Kodu Geliştirilmesi

Doğukan T. Karahan* ve Ayşe G. Güngör†

İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, 34469 Maslak, İstanbul

ÖZET

Türbülans problemleri havacılık ve uzay endüstrisinde sıkça karşılaşılan kompleks problemlerdir. Hesaplamalı yöntemler türbülans teorisinin anlaşılmasına büyük katkı sağlamaktadır. Modern bilgisayarların sunduğu yüksek başarımlı paralel hesaplama olanakları, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği'nin (HAD) önemini artırmıştır, bu da gerçek problemlerin çözümünü hassas bir şekilde yapılabilmesini sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında türbülans problemlerinin çözümü için geliştirilen LES (Large-Eddy Simulation, Büyük Girdap Benzetimi) metodolojisi ve Lestr3d yazılımı sunulacaktır. Lestr3d; FORTRAN programlama dilinde, MPI kütüphaneleri kullanılarak paralelleştirilen, ses altı sıkıştırılabilir türbülanslı akışları LES yöntemi ile yapısal olmayan gridlerde çözümlemek üzere geliştirilen bir yazılımdır. Bu çalışma kapsamında, Lestr3d'nin validasyonu gerçekleştirilecektir. Bu amaçla, geliştirilen nümerik yöntemlerin ve kodların doğrulanması için sıkça kullanılan ters basamak akışı benzetimi ele alınacaktır. Elde edilen sonuçlar, Lestr3d'nin fiziksel ve yeterli bir benzetim yapabilme kabiliyetini ortaya koymuştur.

GİRİŞ

Havacılık ve uzay endüstrisinde karşılaşılan akış problemlerinin deneysel yollarla incelenmesine yönelik geliştirilen yöntemler oldukça karmaşıktır ve yüksek maliyetlidir. Buna karşın, son yıllarda ivme kazanan teknolojik gelişmelere paralel olarak artan sayısal hesaplama hacmi, sayısal yöntemlerin kompleks akışkanlar dinamiği problemlerine çözüm sunmasını sağlamıştır. Türbülanslı akış problemleri için kullanılan en yaygın yöntemler; doğrudan nümerik benzetim (Direct Numerical Simulation, DNS), Reynolds ortalama Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS) ve büyük eddy benzetimi (Large-Eddy Simulation, LES) yöntemleridir.

Doğrudan nümerik benzetim, yalnızca nümerik hata içerdiğinden, bilinen en güçlü yöntemdir. Bu yöntem ile akış alanındaki yapılar Kolmogorov ölçeğine kadar çözümlenebilmektedir. Bu çözünürlük, hesaplama maliyetini Reynolds sayısının küpü [Pope, 2000] ile orantılı olarak artırır. Basit kanal geometrilerinden [Kim, vd., 1986; Lozano-Duran ve Jimenez, 2014], gerçek hayat problemlerin çözümüne kadar [Karaca ve Güngör, 2016; McDonald ve Menon, 2005] detaylı bir

*Y.L. Öğr., Uçak ve Uzay Müh. Böl., E-posta: karahand@itu.edu.tr

†Yrd. Doç. Dr., Uzay Müh. Böl., E-posta: ayse.gungor@itu.edu.tr

şekilde çalışılan DNS, hesaplama maliyetinin yüksekliği ve hesaplama zamanının fazlalığı dolayısıyla endüstriyel bir araç olmaktan ziyade akademik çalışmalarda tercih edilmektedir.

Reynolds ortalama Navier-Stokes, akış alanının zamandaki ortalamasını çözümleyerek akış alanını istatistiksel bir biçimde irdelemeye dayanmaktadır. Bu sayede, bu yöntemin yaklaşık maliyeti Reynolds sayısı ile orantılı olmakla birlikte [Pope, 2000] hesaplama zamanını da oldukça düşürerek hızlı çözümler sunabilmektedir. Fakat zaman ortalama stratejisi kapatma problemi oluşturduğundan, RANS yöntemi bu kapatma problemi için model oluşturmayı gerektirir. Bu yöntemdeki en önemli konu uygun modelin seçilmesidir. Geissler ve Ruiz-Calavera [Geissler ve Ruiz-Calavera, 1999], NACA0012 ve NACA0015 kanat profillerinin akım ayrılması içeren bir akış alanındaki aerodinamik performanslarını farklı RANS modelleri ile incelemiştir. Yaptıkları bu simülasyonlarda kullanılan modeller birbirinden oldukça farklı sonuçlar vermiştir. Günümüze kadar evrensel bir RANS modeli geliştirilemediğinden, elde edilen sonuçların modellere göre farklı davranışlar göstermesi (büyük olasılıkla) kaçınılmaz olacaktır. Ayrıca, gerek akademik, gerek endüstriyel anlamda, türbülanslı akışlarda var olan yapıların anlık analizinin önemi gün geçtikçe daha iyi anlaşılmaktadır. Buna örnek olarak türbin tipi akışlarda oluşan ikincil yapılar örnek verilebilir. Bloxham [Bloxham, 2010], bu tip akışlarda oluşan ikincil yapıların etkileşim mekanizması konusunda tam bir uzlaşmaya varılamadığına vurgu yapmaktadır. Bu tür yapıların zamandaki ve uzaydaki etkileşimi daha yüksek çözünürlüklü yöntemler kullanılarak incelendiğinde, türbülansın fiziğinin anlaşılmasına ışık tutulabilir. Bu amaçla, direk nümerik benzetime göre daha hesaplı, RANS yöntemine göre daha yüksek çözünürlüklü olan büyük ed benzetimi uygun bir yöntem olarak göze çarpmaktadır.

Smagorinsky [Smagorinsky, 1963] tarafından öne sürülen büyük ed benzetimi yöntemi; Kolmogorov'un küçük ölçekli yapıların evrensel davranışı hipotezine dayanarak, akış alanındaki küçük ölçekli yapıların etkisini yok etmek amacı ile hareket denklemlerine uzaysal bir filtre uygular. Bu sayede, çözünürlükten belli bir miktar feragat ederek, fiziksel bir benzetim yapmak mümkündür. Bu yöntem ile gerçekleştirilen benzetimlerden elde edilen çözünürlüklerin düşük olması durumunda gerçekleştirilecek çözüm ağı iyileştirmesi ise, elde edilecek yeni çözünürlükleri de iyileştirecektir. Bunun sebebi, disipatif kabul edilen girdapların yeni çözüm ağına adapte olarak daha da küçülmesi, enerji taşıyan girdapların da çözünürlüklerinin artmasıdır. Bu yüzden çözüm ağı iyileştirmeleri nümerik iyileştirmeler olmaktan ziyade, fiziksel iyileştirmelerdir [Spalart, 2000]. Bu benzetimin hesaplama maliyeti ve gerekli hesaplama zamanı, eşdeğer DNS çalışmasına oranla daha düşüktür. LES'in hesaplama maliyeti yaklaşık olarak Reynolds sayısının 2, 25. kuvveti ile orantılıdır [Pope, 2000] fakat bu maliyet kullanılan grid altı gerilme modelinin karmaşıklığına bağlı olarak artış gösterebilmektedir. Sınır tabaka problemleri [Huai, vd., 1997], yanma problemleri [Mueller, vd., 2013], türbin tipi akışlar [Cui, vd., 2016] ve bunlar gibi birçok türbülans problemlerinde hassas sonuçlar verebildiği doğrulanan LES'in kullanımı, havacılık ve uzay bilimleri sektörü dahil olmak üzere, akademik ve endüstriyel alanda oldukça yaygınlaşmıştır.

Havacılık ve uzay endüstrisine önem veren ülkelerin çoğu ulusal projeler ile geliştirdikleri yazılımları kullanarak tasarım yapmaktadırlar. Bu çalışma kapsamında geliştirilen *Lestr3d* kodu, havacılık ve uzay bilimleri alanındaki akış problemlerinin yüksek doğruluklu çözümünü büyük girdap benzetimi yöntemi ile gerçekleştirecek bir yazılımdır. Spesifik olarak modern gaz türbinlerinde ortaya çıkan akış problemlerinin çözümüne yönelik geliştirilen bu yazılımın, ayrıca diğer akademik ve endüstriyel uygulamalarda da kullanılması amaçlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında *Lestr3d*'nin kabiliyetlerini ortaya koymak amacı ile ters basamak üzerindeki akışın sayısal benzetimi gerçekleştirilecektir. Bu akışın sergilediği fiziksel mekanizmalar, havacılık ve uzay endüstrisinde karşılaşılan flaplı kanat profilleri üzerindeki akış, helikopter yanma odası içerisindeki akış, gaz türbinlerindeki akış ve benzer akış problemleri ile oldukça benzerlik göstermektedir.

MATEMATİKSEL FORMÜLASYON

LES denklemleri, Navier-Stokes (NS) denklemlerine uzaysal filtre uygulanarak bulunmaktadır. $(\bar{\cdot})$ operatörünü uzaysal bir filtre olarak ifade edersek, uzaysal filtrelenen bir değişken ψ , $\bar{\psi}$ olarak ifade edilir. Sıkıştırılabilir akışlarda akılardan elde edilen birincil değişkenler (primitive variables), yoğunluk ağırlıklı ortalamaya denk gelen Favre filtrelenmiş değişkenler olarak ifade edilir. Favre filtresi, ρ yoğunluk olmak üzere, $\tilde{\psi} = \bar{\rho\psi}/\bar{\rho}$ olarak tanımlanır. Bu bilgiler doğrultusunda hareket denklemleri filtrelenerek LES denklemleri elde edilmiş olur. Sıkıştırılabilir akışlarda süreklilik, momentum ve enerji denklemleri olarak sırası ile tensör notasyonu kullanılarak aşağıdaki formu alır;

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \bar{\tau}_{ij}^{sgs}); \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{E}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{E} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p} \tilde{u}_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{q}_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_i \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial H_j^{sgs}}{\partial x_j} - \frac{\partial \sigma_j^{sgs}}{\partial x_j}. \quad (3)$$

Burada $\tilde{u}_i$, x_i yönündeki hız bileşenini; $\bar{p}$ basıncı; $\bar{\tau}_{ij}$ gerilme tensörünü; $\bar{\tau}_{ij}^{sgs}$ grid altı gerilme tensörünü; $\bar{q}_j$ ısı akısını; $\tilde{E}$, birim kütle başına düşen toplam enerjiyi; H_j^{sgs} grid altı entalpiyi; σ_j^{sgs} ise grid altı ısı akısını temsil eder. Bu çalışmada sunulan *Lestr3d* kodu gaz fazlı akışkanlar için geliştirildiğinden, basınç terimi ideal gaz denklemi ile tanımlanmaktadır.

Hareket denklemlerinin non-lineer terimlerinin filtrelemesinden kaynaklanan grid altı terimlerin varlığı kapatma problemi (closure problem) oluşturmaktadır. Literatürde bu kapatma probleminin çözümüne yönelik bir çok yöntem bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanımı en yaygın metotlar sergilenecektir.

Grid altı gerilme tensörü için kullanılan en yaygın grid altı gerilme tensörü modeli Smagorinsky modelidir. Bu model, tıpkı RANS uygulamalarında kullanılan Reynolds gerilme tensörü modelleri gibi, Boussinesq'in girdap-viskozite hipotezine benzer bir yöntem sunar. Smagorinsky modeli, grid altı gerilme tensörünün anizotropik kısmını akış alanında çözülen büyük girdapların gradyanı ile sıkıştırılabilir akış problemlerinde aşağıdaki şekilde ilişkilendirir [Andersson, vd., 2005];

$$\tau_{ij}^{sgs} = \mu_t \left(2\tilde{S}_{ij} - \frac{2}{3}\tilde{S}_{mm}\delta_{ij} \right) - \frac{2}{3}\bar{\rho}k^{sgs}\delta_{ij}. \quad (4)$$

Burada Δ filtre genişliği, $\tilde{S}_{ij}$ gerinim oranı (strain rate) ve δ_{ij} Kronecker delta olmak üzere; $\mu_t = C_R \bar{\rho} \Delta^2 \sqrt{\tilde{S}_{mn}\tilde{S}_{mn}}$ grid altı ölçeğinin viskozitesine, $k^{sgs} = C_I \Delta^2 \tilde{S}_{mn}\tilde{S}_{mn}$ ise grid altı hız alanının kinetik enerjisine denk gelmektedir. Buradaki C_I ve C_R katsayıları model katsayılarıdır. Bu çalışmada kullanılan katyasılar $C_R = 0,012$ ve $C_I = 0,0066$ olarak belirlenmiştir.

Favre filtrelemesi sonucunda elde edilen grid altı ısı akısı σ_j ise akış alanında çözümlenen sıcaklık alanının gradyanı ile, $\tilde{T}$ sıcaklığı temsil etmek üzere, $\sigma_j^{sgs} = C_p \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j}$ şeklinde ilişkilendirilir. Bu ilişki literatürde sıcaklık gradyan yaklaşımı (temperature gradient approach) olarak bilinmektedir ve C_p , akışkanın sabit basınçtaki özgül ısısına, Pr_t grid altı türbülans Prandtl sayısına tekabül etmektedir.

NÜMERİK YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında geliştirilen *Lestr3d* kodu, FORTRAN programlama dili ile yazılmaktadır. Modüler bir yapıya sahip olan programın paralel hesaplamaları MPI (Message Passing Interface) ve OpenMPI kütüphaneleri kullanılarak yapılmaktadır. Hesaplama ağlarının parsellenmesi METIS [Karypis ve Kumar, 1999] yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Nümerik çözüm yönteminde sonlu hacim formülasyonları kullanılmaktadır. Bu amaçla V hacmine sahip ve yüzey alanı S olan bir sonlu hacim elemanı için sıkıştırılabilir LES denklemleri;

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_V Q dV \right) + \oint_S (F dS_x + G dS_y + H dS_z) = \int_V \phi dV \quad (5)$$

Burada $Q = [\bar{\rho}, \bar{\rho}\tilde{u}, \bar{\rho}\tilde{v}, \bar{\rho}\tilde{w}, \bar{\rho}\tilde{E}]^T$ vektörü ($\tilde{u}$, $\tilde{v}$ ve $\tilde{w}$ sırası ile x , y ve z yönlerindeki hızları temsil etmektedir), F , G , H vektörleri sırası ile x , y ve z yönlerindeki akılardır. Bu vektörlerin her biri invizid, viskoz ve grid altı akıları ihtiva eder. ϕ terimi ise kaynak veya kuyu terimi olup, bu çalışmada kapsamında bu terim sıfır kabul edilecektir. Sıkıştırılabilir LES denklemleri merkezi fark formülasyonları ile ayrıklaştırılmaktadır. Uzaysal türevler için kullanılan ayrıklaştırma şemaları ikinci mertebeden hassasiyete sahiptir fakat zamandaki açık integrasyon beşinci mertebeden Runge-Kutta şemaları ile gerçekleştirilmektedir. Merkezi fark şemalarının sebep olduğu salınım instabilitelerinin sönümlenmesi için Jameson filtresi [Jameson, vd., 1981] uygulanmaktadır. Beşinci mertebeden Runge Kutta şemasına bu filtre uygulanırsa bu şemanın adımları yukarıda belirtilen Q vektörü için en genel formda [Jameson, vd., 1981];

$$Q^0 = Q^n; \quad (6)$$

$$Q^k = Q^0 - \alpha_k \Delta t [C(Q^{k-1}) + \gamma_k (D_v(Q^{k-1} + D_T(Q^{k-1})) + \beta_k D_N(Q^{k-1}) + (1 - \beta_k) D_N(Q^{k-2}))]; \quad (7)$$

$$Q^{n+1} = Q^m; \quad (8)$$

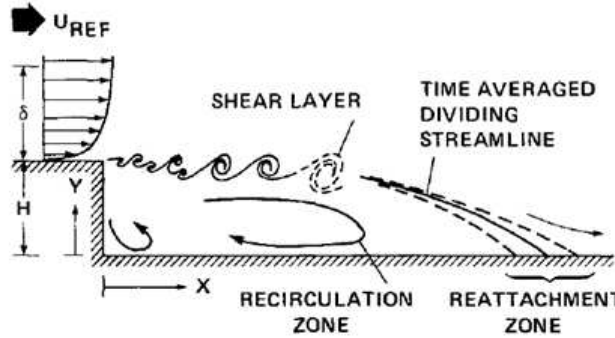
olarak verilir. Burada δt , n , $C(Q)$, $D_v(Q)$, $D_T(Q)$ ve $D_N(Q)$; sırası ile zaman adımını, zaman integrasyon şemasının mertebesini, konvektif akıyı, viskoz akıyı, türbülans akısını ve nümerik sönümlenme terimini temsil etmektedir. k terimi ise Runge-Kutta adımını, m ise beşinci adım sonunda elde edilen sonucu göstermektedir. α_k , γ_k ve β_k katsayıları ise zaman integrasyonu, viskozite ve sayısal sönümlenme katsayılarıdır.

Yukarıda belirtilen nümerik yöntem; hem yapısal hem de yapısal olmayan çözüm ağlarına uygulanabilmektedir. Akış alanına empoze edilecek sınır şartları ise hayali hücre (ghost cell) metodu kullanılarak hayali hücrelere uygulanmaktadır. Bu çalışma kapsamında herhangi bir paralelleştirme yöntemi bulunmayıp; geri basamak problemi için sıkıştırılabilir, izotermal bir akış alanının tek bir işlemci kullanılarak gerçekleştirilen nümerik benzetimi ele alınacaktır. Elde edilecek sonuçlar, literatürde var olan deneysel veriler [Kasagi ve Matsunaga, 1995] ve nümerik veriler [Le, vd., 1997; Karahan, vd., 2015] ile karşılaştırılacaktır.

TERS BASAMAK AKIŞI

Ters basamak üzerindeki akış, *Lestr3d*'nin doğrulanması amacıyla test edilecek ilk problemdir. Türbülanslı akışlar için geliştirilen yöntemlerde ters basınç gradyanı altındaki veya akım ayrılması durumunda gösterdiği davranışı irdelenmek önemlidir çünkü, özellikle havacılık ve uzay endüstrisinde, bu tür fiziksel mekanizmaların tayini zordur ve oldukça önemlidir. Giriş bölümünde geri basamak

akışının gösterdiği fiziksel mekanizmalara benzer özellik gösteren akış problemlerine değinilmişti. Geri basamak akışının test edilmesinin esas sebebi geometrilerinin sadeliğidir. Ayrıca, bu problem için halihazırda var olan çalışmalar oldukça geniş olduğundan, problemin doğasına ilişkin detaylı incelemeler yapılabilmektedir. Ters basamak akışının gösterdiği temel fiziksel mekanizmalar Driver ve diğerleri [Driver, vd., 1987] tarafından şematik olarak Şekil 1 ile gösterilmiştir.

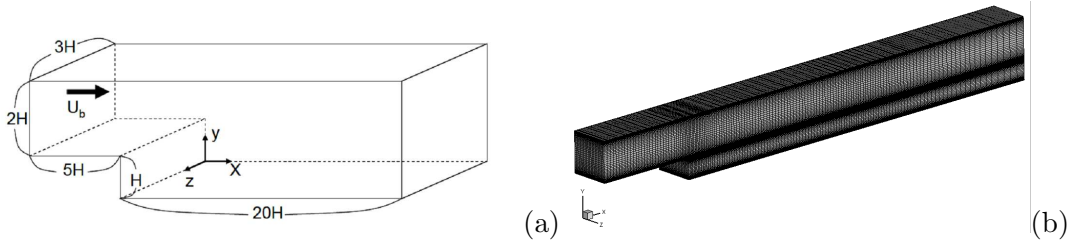


Şekil 1 : Ters basamak akışının şematik gösterimi [Driver, vd., 1987].

Bir plaka üzerinde (veya bir kanal içerisinde) hareket eden akışkanın, akış alanındaki geometride oluşan ani topolojik değişime karşı tepkisi akım ayrılması ve buna bağlı olarak gösterdiği diğer fiziksel olaylar ters basamak probleminin temelini oluşturmaktadır. Akım ayrılmasının varlığı, diğer kayma akışlarındaki gibi, ince bir kayma tabakası meydana getirmektedir. Ortalama akımda "time averaged dividing streamline" olarak gözlemlenen bu kayma tabakası, basamağın komşuluğundaki akışkanı bu tabakaya katar. Genişleyen bu tabaka, serbest akım yönü doğrultusunda herhangi bir noktada yüzeye yapışmasını gerçekleştirir (reattachment). Ayrıca, kayma tabakasının, tabaka dışındaki akışkan ile etkileşimi sonucunda, tabaka ile yüzeye yapışmanın gerçekleştiği duvar arasında Reynolds sayısına bağlı olarak bir veya iki adet girdap oluşmaktadır. Ters basamak akışının incelenmesindeki temel kriterler, yüzeye yapışma noktasının ve bahsi geçen girdapların tayinini oluşturmaktadır. Bahsi geçen fiziksel mekanizmalar bu problemde oldukça fazla sayıda parametreye bağlıdır. Literatürde bildirilen bu parametrelerden önemli olanları; açıklık oranı [Brederode ve Bradshaw, 1972], genişleme oranı [Ötügen, 1991], Reynolds sayısı [Armaly, vd., 1983], serbest akımın türbülans yoğunluğu [Eaton ve Johnston, 1981], ve ayrılma anındaki sınır tabaka kalınlığı [Narayanan, vd., 1974] olarak belirtilmiştir.

Bu çalışmada kullanılacak ters basamak akışının geometri ve hesaplama alanının detayları Şekil 2'de gösterilmektedir. Çalışmada iki adet çözüm ağı kullanılmış olup birinci konfigürasyonu yalaşık olarak 225000 kartezyen eleman oluşturmaktadır ve açıklık yönündeki uzunluk, basamak uzunluğu olan H cinsinden $2H$ olarak alınmıştır. Bu konfigürasyon bu çalışma çerçevesinde LES1 olarak adlandırılacaktır. Diğer konfigürasyon ise açıklık yönündeki uzunluğu $3H$ olan ve diğer ağa göre bu yöndeki eleman sıklığı daha fazla olan, yaklaşık 466000 elemana sahip bir çözüm ağıdır. Bu konfigürasyon ise bu çalışmada LES2 olarak adlandırılacaktır. Basamak yüksekliği H ve referans hız U_{ref} göre Reynolds sayısı 5500'dür. Burada referans hız kanal girişindeki maksimum ortalama hız U_c olarak verilmektedir.

Akışkanın kanala girişi, yüzey sürtünme Reynolds sayısı, Re_τ , 395 olan kanal akışı profilleri ile sağlanmıştır. Ortalama hız ve çalkantı profilleri, Moser vd. [Moser, vd., 1998] tarafından gerçekleştirilen doğrudan nümerik benzetimden alınmıştır. Basamaktan önce türbülans akışını sürdürmek amacı ile ortalama akım üzerine rasgele sayılar ile çarpılmış çalkantı değerleri eklenmiştir. Bu rastgele sayılar uzaya ve zamana bağlı olarak uygulanmıştır ve zaman ortalaması sıfırdır. Kanal duvarlarının pürüzsüz ve geçirgen olmadığı kabul edilmiştir ve bu sınırlara kaymamazlık (no-slip) şartı uygulanmıştır. Kanal çıkışında, hız alanının çıkış düzlemine normal doğrultudaki değişiminin olmadığı (hız gradyanlarının var olmadığı) varsayılmıştır. Kanalın açıklık



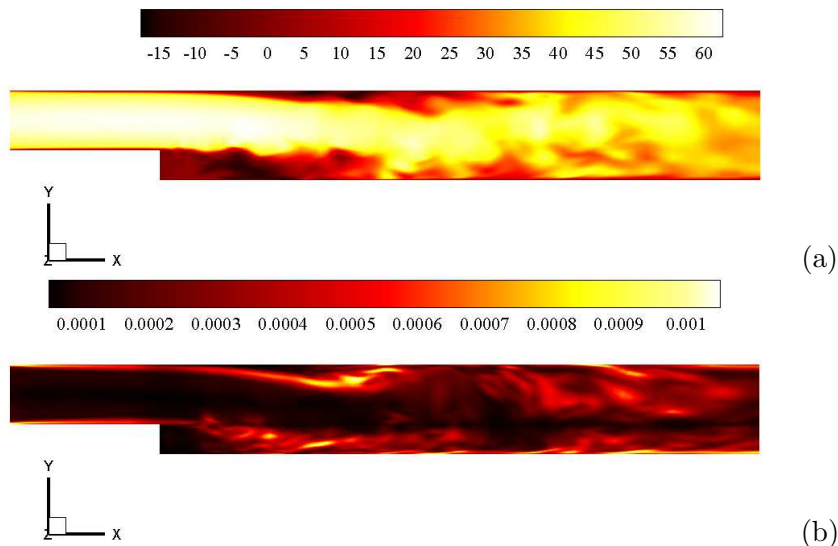
Şekil 2 : Geri basamak akışında kullanılan (a) geometrinin [Kobayashi ve Wu, 2006], (b) hesaplama ağının detayları.

doğrultusundaki sınır düzlemlerine ise kayma (slip) sınır koşulu uygulanmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, sıkıştırılabilir, izotermal bir akış alanı için benzetim yapıldığından akış alanının tümünde sıcaklık $300K$ olarak alınmıştır. Giriş düzleminde uygulanan referans basınç ise $101325Pa$ olarak seçilmiştir. Benzetimin başlamasından itibaren akımın kanal girişinden çıkışına kadar iki kez konveksiyonu sağlandıktan sonra her on zaman adımında bir istatistiksel veri toplanmıştır. Bu çalışma kapsamında ikinci mertebeden istatistikler de inceleneceği için, benzetimler ikinci mertebeden istatistikler yakınsayana kadar istatistik akümüasyonu devam etmiştir.

Gerçekleştirilen benzetimlerde elde edilen maksimum boyutsuz duvar kalınlıkları, alt duvarda, LES1 için $\Delta y_{maks}^+ \approx 1,24$, $\Delta z_{maks}^+ \approx 24,75$, LES2 için ise $\Delta y_{maks}^+ \approx 1,29$, $\Delta z_{maks}^+ \approx 19,35$ olarak bulunmuştur. Δx_{maks}^+ ise her iki durum için de $x/H \in [0, 17]$ aralığında 50 civarında olup, bu bölgeden sonraki grid esnekliğinin fazlalığı sebebiyle lokal olarak 75 – 85 civarına çıkmaktadır. Elde edilen bu çözünürlükler LES çalışmaları açısından yeterlidir.

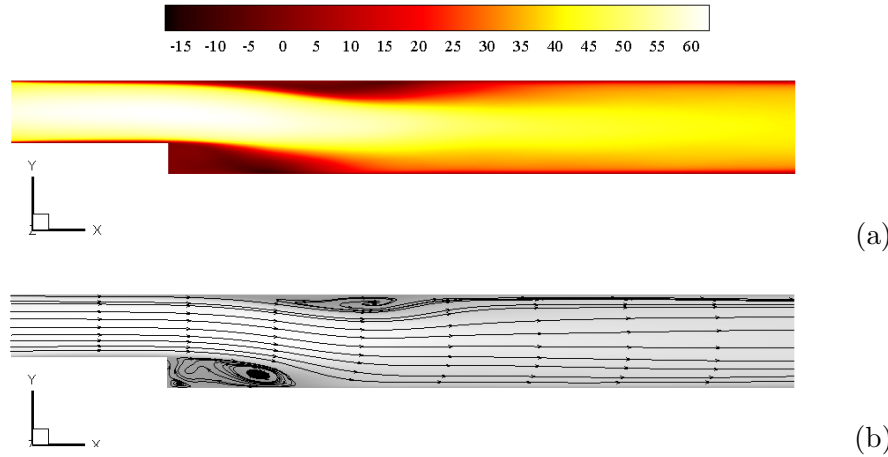
SAYISAL ANALİZ

Bu bölümde yukarıda bahsedilen ters basamak konfigürasyonlarının nümerik benzetiminden elde edilen anlık veriler ve istatistiksel veriler irdelenecektir. Şekil 3, akış alanındaki bir ara kesite ait akım yönündeki anlık hız alanını (a) ve türbülans viskozitesini (b) göstermektedir. Türbülans viskozitesinden anlaşılacağı üzere, kanal girişinden basamağa kadar var olan akımda türbülans aktivitesinin duvar komşuluklarında daha etkin olduğu gözlemlenmektedir. Akım ayrılmasından sonra ise hız alanının çalkantılı bir davranış gösterdiği aşıkardır. Benzer şekilde, türbülans viskozitesinin ayrılmadan sonra, yalnızca duvara yakın bölgelerde değil, bütün akış alanında etkinlik gösterdiğini vurgulamaktadır ki bu da akım ayrılmasının türbülans aktivitesini tetiklemesinin bir sonucudur.



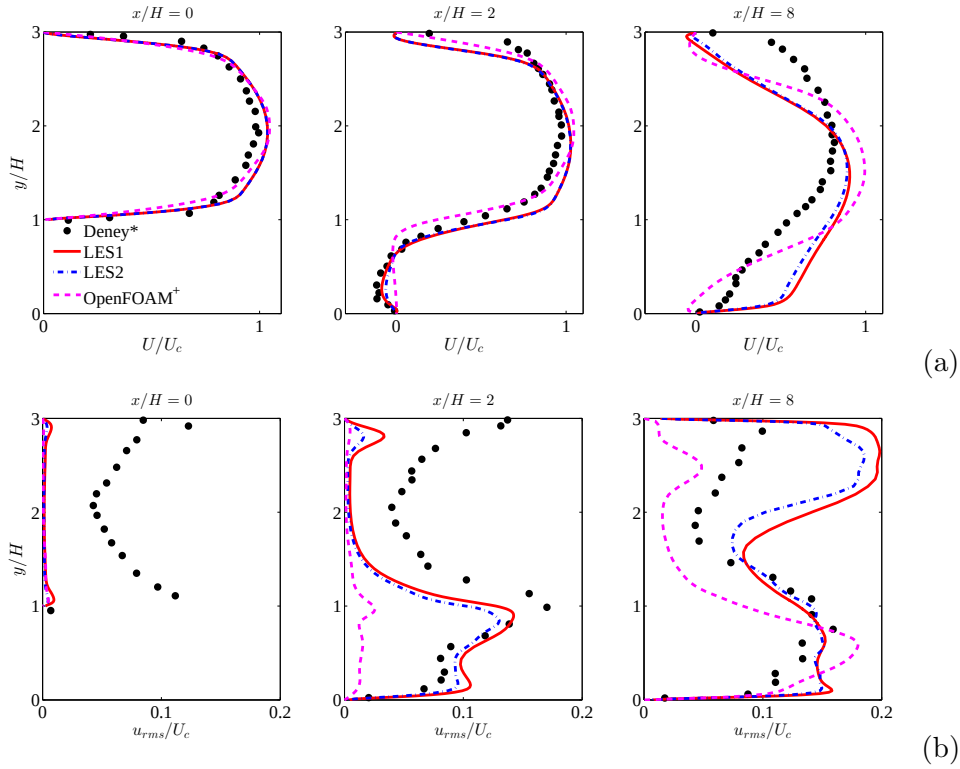
Şekil 3 : Akım yönündeki anlık (a) hız alanı (m/s), (b) türbülans viskozitesi (m^2/s).

Şekil 4, sık ağı ait ortalama hız alanının x bileşenini (a) ve akım çizgilerini temsil etmektedir. Bu bölümde verilecek olan istatistiksel bilgiler, periyodik sınır koşulunun uygulanmaması sebebi ile, açıklık doğrultusunda geometrinin orta ara kesitine ($z = 1,5H$) tekabül eden düzlem üzerinde elde edilen sonuçlar ile tartışılacaktır. Açıklık yönündeki sınırlara kayma sınır şartları uygulandığı için elde edilen verilerin açıklık yönündeki ortalaması (spanwise averaging) alınmamıştır. Ortalama hız alanından anlaşılacağı üzere, basamak sonrasında bir kayma tabakası meydana gelmiş ve bu tabaka ilerideki bir noktada yüzeye yapışmasını gerçekleştirmiştir. Ayrıca akış alanında, alt duvarda iki adet ve üst duvarda bir adet olmak üzere, üç adet resirkülasyon bölgesi mevcuttur. Basamağın alt duvar komşuluğunda bu bölgelerin varlığı literatürde belirtilmiştir [Kasagi ve Matsunaga, 1995; Kobayashi ve Wu, 2006] fakat bu çalışmalarda üst duvar civarında resirkülasyon bölgesinin varlığına rastlanmamıştır. Bunlardan farklı olarak; Karahan ve diğerleri [Karahan, vd., 2015], bu çalışmadaki çözüm ağlarına benzer bir konfigürasyonu OpenFOAM çözücüsünü kullanarak incelemişler, geometrinin üst duvarında benzer bir bölge gözlemlemişlerdir. Bunun sebebini ise kanal girişindeki türbülans aktivitesinin yetersizliği olmasına atfetmişlerdir. Ayrıca, akım çizgilerinden görüldüğü üzere, üst duvardaki akımı bozarak, akım çizgilerinin alt duvara doğru eğilmesini sağlamıştır, resirkülasyon bölgesinin ötesinde ise akım çizgileri duvara paralel seyretmektedir. Üst duvarda bahsi geçen bölgenin yüzeye yapışma noktasına ve türbülans aktivitesine etkileri ileride tartışılacaktır.



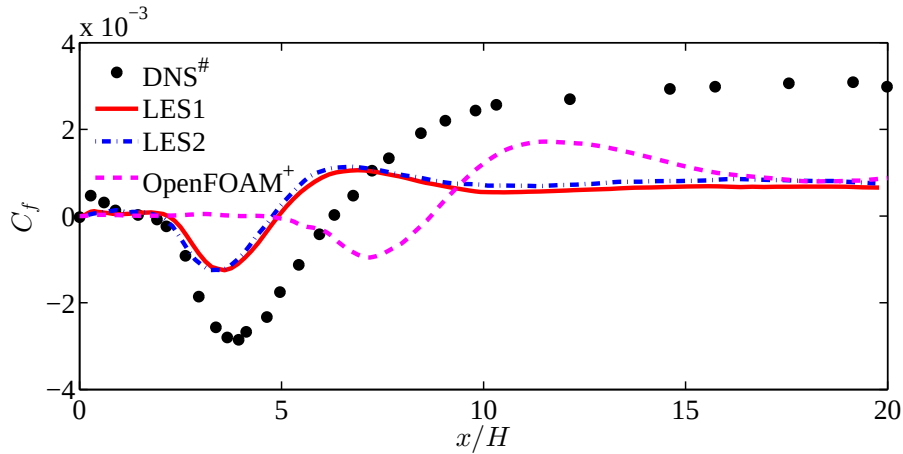
Şekil 4 : Akım yönündeki ortalama (a) hız alanı (m/s), (b) akım çizgileri.

Şekil 5, akım yönündeki boyutsuz ortalama hız (a) ve çalkantı (b) profillerini temsil etmektedir. Elde edilen sonuçlar deneysel veriler* [Kasagi ve Matsunaga, 1995] ve hesaplamalı+ [Karahan, vd., 2015] veriler ile karşılaştırılmıştır. Basamağın bulunduğu, yani akım ayrılmasının meydana geldiği, $x/H = 0$ düzleminde ortalama hız profilleri küçük farklılıklar göstermesine rağmen genel olarak bir uyum içerisindedir. Fakat aynı düzlemdeki çalkantı profilleri bu bölgedeki türbülans seviyesinin oldukça düşük olduğunu göstermektedir. Akım ayrılmasının yakınlarındaki $x/H = 2$ düzleminde LES1 ve LES2, alt duvar komşuluğunu ve kayma tabakasındaki akım davranışını oldukça başarılı bir şekilde yakalamıştır ve burada her iki benzetimle elde edilen hız profilleri tamamiyle örtüşmektedir fakat üst duvar komşuluğundaki hız profillerinde bir sapma söz konusudur. Bunun sebebi üst duvarda meydana gelen akım ayrılmasıdır. Bu düzlemdeki çalkantı profilleri ise, nümerik benzetimlerin üst duvardaki türbülans aktivitesini yeteri kadar iyi yakalayamadığına işaret etmektedir. Açıklık yönünde yapılan çözüm ağı sıklaştırılması ve açıklık oranının artışı, bu çalışmada gerçekleştirilen her iki benzetimde de benzer trendler elde edilmesine rağmen, türbülans aktivitesinde bir iyileşme sağlamıştır. OpenFOAM verileri, genel olarak, akış alanındaki trendi yakalayabilmesine rağmen, duvar komşuluğundaki profilleri yeterli düzeyde çözümleyememiştir. Karahan ve diğerleri [Karahan, vd., 2015] farklı bir grid altı modeli deneyerek, bu farklılıkların sebebini Smagorinsky modelinin disipatif doğasına atfetmişlerdir. Benzer şekilde, bu çalışmada da bu durum söz konusudur. Çözüm ağı iyileştirmesi ile istatistikler belli bir miktar iyileşme sağlanmış, lakin bunun üst duvardaki akım ayrılmasının varlığına bir etki etmediği gözlemlenmiştir.



Şekil 5 : Akım yönündeki ortalama (a) hız, (b) çalkantı profilleri.

Şekil 6; akım ayrılmasından sonraki alt duvardaki yüzey sürtünme katsayısının, C_f , akım yönündeki boyutsuzlaştırılmış uzaklık, x/H , ile değişimini göstermektedir. Yüzey sürtünme katsayısı $C_f = \tau_w/q_c$ formülü ile hesaplanmıştır. Burada τ_w , bahsi geçen duvar üzerindeki kayma gerilmesine; q_c ise kanal girişi merkezindeki yoğunluk, ρ_c ve akım yönündeki hız, U_c ile elde edilen dinamik basınca, $q_c = \frac{1}{2}\rho_c U_c^2$, tekabül etmektedir. Burada verilen dağılım, DNS# verileri [Le, vd., 1997] ve OpenFOAM⁺ verileri [Karahan, vd., 2015] verileri ile mukayese edilecektir. Açıkça görülmektedir ki bu çalışmada gerçekleştirilen her iki benzetim de örtüşen sonuçlar göstermektedir fakat bu sonuçlar DNS ile elde edilen sonuçlardan (mutlak değer olarak) daha düşük seviyededir. LES1 ile LES2 arasındaki küçük farklılıkların sebebi, duvara dik doğrultudaki hız gradyanlarının mutlak değer olarak genellikle daha yüksek olmasıdır. Alt duvarda, basamak ile alt duvarın birleştiği bölge civarında bir resirkülasyon bölgesinin varlığı daha önce de belirlmişti. Yüzey sürtünme katsayısı dağılımından bu resirkülasyon bölgesinin uzunluğunun, DNS verisi ile saptanan uzunluktan daha fazla olduğudur ve bu bölgedeki yüzey sürtünme katsayıları da daha düşük seviyededir. Benzer şekilde, LES1 ve LES2'nin gösterdiği ikinci resirkülasyon bölgelerinin daha kısa olduğudur. Bu yüzden de yüzeye yapışma noktası x_r , literatürde bildirilen değerlerden daha düşüktür. Elde edilen dağılımların sergilediği trend, Karahan ve diğerlerinin [Karahan, vd., 2015] elde ettiği dağılıma oldukça benzemektedir. Fakat, basamak komşuluğundaki resirkülasyon bölgesinin uzun olmasından dolayı sonuçlar örtüşmemektedir ve birleşme noktasını oldukça ileride saptamışlardır. LES1 için $x_r/H = 4,92$, LES2 için ise $x_r/H = 4,78$ olarak bulunmuştur. Literatürde benzer konfigürasyonlarda bu nokta; $x_r/H = 6,28$ [Le, vd., 1997], $x_r/H = 6,51$ [Kasagi ve Matsunaga, 1995], $x_r/H = 6,81$, $6,75$ [Kobayashi ve Wu, 2006] olarak bildirilmiştir. Bu farklılığın muhtemel sebebi, kanal girişinde verilen türbülans seviyelerinin yetersizliği veya Smagorinsky modelinin akış alanındaki gradyanları sönmülmesi olabilir.



Şekil 6 : Alt duvardaki yüzey sürtünme katsayısının kanal boyunca değişimi.

SONUÇLAR

Bu çalışmada büyük girdap benzetimi gerçekleştirmek amacıyla geliştirilmiş metodoloji detaylı bir şekilde sunulmuş ve bu metodoloji *Lestr3d* kodu ile uygulamaya geçirilmiştir. Sergilenen *Lestr3d* kodu, izotermal, sıkıştırılabilir bir akış alanının fiziğini tek işlemcili uygulamalarda başarılı bir şekilde yakalayabilme kabiliyetine sahip bir yazılımdır. Elde edilen bazı sonuçlar, literatürde var olan çoğu çalışmalarda bulgulardan farklıdır. Fakat bu sonuçlar, fiziksel çözüm verme kabiliyeti birçok bağımsız çalışma ile gösterilen OpenFOAM sonuçlarıyla benzer davranışlar sergilemektedir. Üst duvarda elde edilen ayrılma kabarcığı sebebiyle akım çizgileri alt duvara doğru eğrilmiş, buna bağlı olarak da kayma tabakasının alt duvar ile birleşmesi beklenenden daha geride bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre türbülans aktivitesinin yetersiz olduğu saptanmış, bu yetersizliğin akış alanı üzerinde global bir etkisi olduğu görülmüştür. Bu bilgiler ışığında, gelecekteki çalışmalarımızda uygulanan ve uygulanacak sınır koşulları üzerinde daha detaylı durulacak, *Lestr3d*'nin paralel platformlarda kompleks akışlar doğrulaması gerçekleştirilecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 3501 ULUSAL GENÇ ARAŞTIRMACI KARIYER GELİŞTİRME PROGRAMI çerçevesinde 114M593 No'lu proje olarak TÜBİTAK tarafından desteklenmektedir ve bu çalışmada kullanılan hesaplama kaynakları Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Merkezi'nin (UHeM) 1002222012 numaralı desteğiyle sağlanmıştır.

Kaynaklar

Andersson, N., Eriksson, L. E. ve Davidson, L., 2005. *Large-Eddy Simulation of Subsonic Turbulent Jets and Their Radiated Sound*, AIAA Journal, Cilt. 45., No. 9, s. 1899-1912.

Armaly, B. F., Durst, F., Perreira, J. C. F. ve Schönung, B., 1983. *Experimental and theoretical investigation of backward-facing step*, J. Fluid Mech., Cilt. 24, s. 473-496.

Bloxham, M. J., 2010. *A global approach to turbomachinery flow control: loss reduction using endwall suction and midspan vortex generator jet blowing*, The Ohio State University, Doktora tezi.

de Brederode, V. ve Bradshaw, P., 1972. *Three-dimensional flow in nominally two-dimensional separation bubbles. I. flow behind a rearward-facing step*, Imperial College, Aeronautical, No. 72-19.

- Cui, J., Nagabhushana Rao, V. ve Tucker, P. G., 2016. *Numerical investigation of secondary flows in a high-lift low pressure turbine*, International Journal of Heat and Fluid Flow, s. 1-9.
- Driver, D. N., Seegmiller H. L. ve Marvin, J. G., 1987. *Time-dependent behavior of a reattaching shear layer*, AIAA Journal, Cilt. 25, No. 7, s. 914-919.
- Eaton, J. K. ve Johnston, J. P., 1981. *A review of research on subsonic turbulent flow reattachment*, AIAA Journal, Cilt. 19, No. 19, s. 1093-1100.
- Geissler, W. ve Ruiz-Calavera, L. P., 1999. *Transition and turbulence modelling for dynamic stall and buffet*, Engineering Turbulence Modelling and Experiments - 4, s. 679-688.
- Huai, X., Joslin, R. D. ve Piomelli, U., 1997. *Large-eddy simulation of transition to turbulence in boundary layers*, Theoret. Compt. Fluid Dynamics, Cilt. 9, s. 149-163.
- Jameson, A., Schmidt, W. ve Turkel, E., 1981 *Numerical solution of the Euler equations by finite volume methods using Runge Kutta time stepping schemes*, 14th Fluid and Plasma Dynamics Conference, Palo Alto, CA, U.S.A.
- Karaca, S., ve Güngör, A., 2016. *DNS of unsteady effects on the control of laminar separated boundary layers*, European Journal of Mechanics - B/Fluids, Cilt. 56, s. 71-81.
- Karahan, D.T., Özgünoğlu, M., Karaca, S. ve Güngör, A. G., 2015. *A Large Eddy Simulation Methodology for Complex Flows*, 8th Ankara International Aerospace Conference, Ankara, 10-12 Eylül.
- Karypis, G. ve Kumar, V., 1999. *A fast and highly quality multilevel scheme for partitioning irregular graphs*, SIAM Journal on Scientific Computing, Cilt. 20, s. 359-392.
- Kasagi, N. ve Matsunaga, A., 1995. *velocimetry measurement of turbulence statistics and energy budget in a backward-facing step flow*, Int. J. Heat and Fluid Flow, Cilt. 16, p. 477-485.
- Kim, J., Moin, P. ve Moser, R., 1986. *Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number*, Journal of Fluid Mechanics, Cilt. 177, s. 133-166.
- Kobayashi, H. ve Wu. X., 2006. *Application of a local subgrid model based on coherent structures to complex geometries*, Center for Turbulence Research Annual Research Briefs, s. 69-77.
- Le, H., Moin, P. ve Kim J., 1997. *Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step*, Journal of Fluid Mechanics, Cilt. 330, s. 349-374.
- Lozano-Duran, A. ve Jimenez, J., 2014. *Effect of the computational domain on direct simulations of turbulent channels up to $Re_\tau = 4200$* , Physics of Fluids, Cilt. 26.
- McDonald, B. A. ve Menon, S., 2005. *Direct numerical simulation of solid propellant combustion in crossflow*, Journal of propulsion and power, Cilt. 25, No. 3, p 460-469.
- Moser, R. D., Kim, J. ve Mansour, N. N., 1998. *DNS of turbulent channel flow up to $Re_\tau = 590$* , Physics of Fluids, Cilt. 11, s. 943-945.
- Mueller, M. E., Iaccarino, G. ve Pitsch, H., 2013. *Chemical kinetic uncertainty quantification for large eddy simulation of turbulent nonpremixed combustion*, Proceedings of the Combustion Institute, Cilt. 34, s. 1299-1306.
- Narayanan, M. A. B., Khadgi, Y. N. ve Viswanath, P. R., 1974. *Similarities in pressure distribution in separated flow behind backward-facing step*, Aeronautical Quarterly, Cilt. 25, s. 305-312.

Ötügen, M. V., 1991. *Expansion ratio effects on the separated shear layer and reattachment downstream of a backward-facing step*, Experiments in Fluids, Cilt. 10, s. 273-280.

Pope, S. B., 2000. *Turbulent flows*, Cambridge: Cambridge University Press.

Smagorinsky, J., 1963. *General circulation experiments with the primitive equations I. the basic experiment*, Monthly Weather Review, Cilt. 91, No. 3, s. 99-164.

Spalart, P. R., 2000. *Strategies for turbulence modelling and simulations*, International Journal of Heat and Fluid Flow, Cilt. 21, s. 252-263.