

Silindirik yanma odası içerisindeki akışın lattice Boltzmann metodu ile sayısal benzetimi

Alihan Atilla Çınar*, Burakhan Şüküroğlu† ve Ayşe G. Güngör‡
İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, 34469, İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada, silindirik yanma odası içerisindeki akışın çözümüne yönelik geliştirilen modüler, yüksek doğruluklu, özgün HAD yazılımı lbmles, iç ve dış akış olmak üzere iki genel problem özelinde laminer ve türbülanslı akışlarla test edilmiştir. Tamamen duvarla çevrilmiş kübik oyuk akışı problemi ve gömülü sınır şartı metodu (immersed boundary method, IBM) uygulaması için de eğrisel bir yüzey olan silindir üzerindeki akış problemi ele alınmıştır. Lattice Boltzmann yöntemini temel alan özgün akış çözücüsü, türbülanslı büyük edî benzetimi yöntemi ile beraber çözümlenmektedir. Silindir etrafında daimi akışlar incelendiğinde silindirin arkasında oluşan devridaim bölgesinin uzunluğu, ayrılma açısı ve sürükleme katsayısı gibi büyüklükler literatür ile tutarlı biçimde elde edilmiştir. İkinci olarak yan-yan ve üst-üste iki silindirden oluşan konfigürasyonlarda daimi olmayan akış problemi ele alınmıştır. İki silindirin birbirine olan etkisi sonucunda oluşan von Karman girdap caddelerinin zengin fiziği, literatür ile uyumlu sonuçlar vererek başarılı bir şekilde çözümlenmiştir. Öte yandan, laminer oyuk akışı problemi ele alınmış, ve elde edilen sonuçlar incelendiğinde ana girdap yapısının oluştuğu; köşelerde ise ikincil girdap yapılarının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Sonrasında ise büyük edî benzetimi yöntemi kullanılarak oyuk akış problemi türbülanslı olarak incelenmiştir. Türbülanslı çalkantıların, literatür ile uyumlu olarak duvara yakın bölgede yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Son olarak ise, silindirik yakıcı içerisinde akış analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda yakıcı duvarlarında sınır tabakanın fiziksel olarak geliştiği, genişleme bölgesinde ise üst ve alt duvarlarda akım ayrılması ile beraber ters akım bölgelerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.

*Araştırma Görevlisi, Uçak Müh. Böl., E-posta: cinarali17@itu.edu.tr

†Doktora Öğrencisi, Uzay Müh. Böl., E-posta: sukuroglu20@itu.edu.tr

‡Prof. Dr., Uzay Müh. Böl., E-posta: ayse.gungor@itu.edu.tr

GİRİŞ

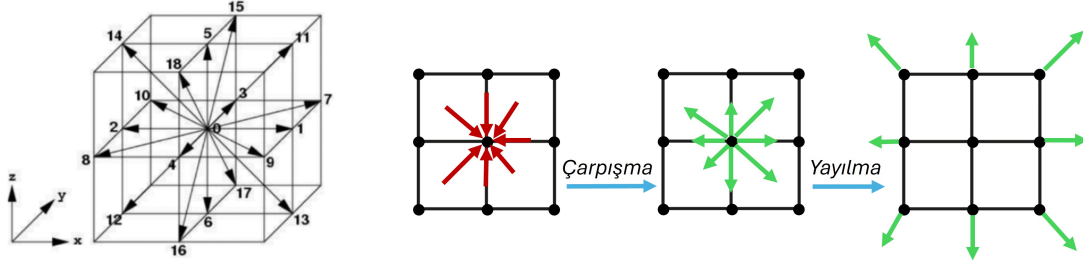
Başta havacılık olmak üzere çeşitli mühendislik uygulamalarında kompleks, türbülanslı ve çok türlü akışlar görülmektedir. Bu akışların sayısal benzetiminin hesaplama maliyeti geleneksel yollar ile fazla olabilmektedir. Bu bağlamda bahsi geçen akışların sayısal benzetimi için alternatif yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. LBM bu bakımdan sonlu hacimler yöntemi (finite volume method, FVM) ve sonlu farklar yöntemi (finite difference method, FDM) gibi geleneksel metodların yanında güçlü bir alternatif olarak görülebilmektedir. Paralel uygulamalardaki verimliliği, düşük hesaplama maliyeti ve kompleks geometrilerdeki akışın modellenmesinde sağladığı kolaylık [Krüger vd., 2022]. LBM'in sağladığı en önemli avantajlar arasında gösterilmektedir. LBM bu avantajları doğrultusunda kazandığı ivme ile çeşitli kompleks akışların sayısal çözümünde kullanılmıştır. LBM'in yanma alanındaki uygulamaları ise sıkıştırılmaz ve çok fazlı akışlardaki uygulamalara göre daha geç başlamış ve daha yavaş ilerlemiştir. Ancak son yıllardaki gelişmeler LBM'nin yanma için de kullanılmasına zemin hazırlamıştır [Hosseini vd. 2024]. Hosseini vd. çalışmalarında son yıllarda LBM ile yanma modelleyebilmek için geliştirilen stratejileri ve modelleri sunmaktadır [Hosseini vd. 2024]. Bu stratejilerden biri hibrit bir model olan LBM-FVM/FDM'un geliştirilmesidir. Hosseini vd. bir diğer çalışmalarında düşük Mach sayılı yanma uygulamalarının simülasyonu için LBM-FDM hibrit modelini kullanmışlardır [Hosseini vd. 2019]. Ek olarak Boivin vd. hibrit bir LBM modelini hidrojen yanması simülasyonu için kullanmıştır [Boivin vd. 2021]. Tayyab vd. hibrit LBM yaklaşımını kullanarak küt cisim tarafından stabilize edilmiş türbülanslı alev dinamiğini incelemiştir [Tayyab vd. 2020]. Bu çalışmalarda süreklilik ve momentum denklemleri LBM ile, enerji ve tür denklemleri ise FVM/FDM ile çözülmüştür. Bahsi geçen çalışmalar LBM'in kompleks akışlara uygulanabilirliğini gözler önüne sermektedir. Dolayısıyla özgün bir LBM çözücüsü geliştirmek, birçok kompleks akışta hesaplama maliyeti düşük ve yüksek doğruluklu analizler yapabilme kabiliyetini beraberinde getirebilmektedir. Bu çalışma kapsamında silindirik yanma odasındaki soğuk akışın analizinde kullanılmak üzere türbülanslı kompleks akışları simüle edebilen özgün akış çözücüsü *lbmls* geliştirilmiştir. Çözücü; laminer, daimi olmayan ve türbülanslı akış rejimlerindeki çeşitli problemlerinin çözümünde kullanılmış ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Temel hedef doğrultusunda basitleştirilmiş bir silindirik yanma odasında soğuk akış analizi gerçekleştirilmiştir.

YÖNTEM

Lattice Boltzmann metodu, Navier-Stokes denklem uygulamalarının aksine akışkanı mezoskopik boyutlarda parçacık yoğunluk dağılım fonksiyonları ile tanımlamaktadır. Parçacık yoğunluk dağılım fonksiyonu, yoğunluğun üç boyutlu fiziksel uzayda ve üç boyutlu hız uzayında aynı zamanda tanımlanmasıyla ifade edilir. Dolayısıyla, fonksiyonunun nümerik olarak hesaplanabilmesi için hesaplama alanının kafes yapılarına bölünmesi gerekmektedir. Çözüm alanındaki her bir kafesin yapısında, merkezde bir hareketsiz parçacık bulunurken farklı yönlere doğru hareket eden parçacık bulutları bulunmaktadır. Problemin çözüm yöntemine göre parçacık bulutlarının yön ve sayısını belirleyen kafes tipleri değişmektedir. Geliştirilen *lbmls* çözücüsünde, 3 boyutlu bir kafes yapısı olan ve 19 farklı yönde parçacık hızı içeren şekil 1'de şematik olarak gösterilen D3Q19 kafes yapısı kullanılmıştır. *lbmls* çözücüsü, FORTRAN programlama dilinde, mesaj geçiş arayüzü (message passing interface, MPI) yöntemi ile paralelleştirilmiş bir akış çözücüsüdür. Çözücü modüller olarak geliştirilmiş olup, farklı problemler için kullanılabilirliktedir.

LBM formülasyonlarında esas değişken parçacık yoğunluk dağılım fonksiyonudur. Akışkan özellikleri ise bu fonksiyonun momentlerine bağlı olarak elde edilmektedir. Bu doğrultuda, denklem 1'de verilen boyutsuzlaştırılmış Boltzmann denklemi çözülerek dağılım fonksiyonu (f) elde edilmektedir.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + c_i \frac{\partial f}{\partial x_i} = \Omega_f \quad (1)$$



Şekil 1: D3Q19 kafes yapısı ve örnek bir düzlem için çarpışma-yayılma şematifi.

Bu denklemde f çarpışma operatörünü, t ve \hat{x} ise kafes sisteminde zamanı ve yönü temsil etmektedir. Ω_f ve c_i ise sırasıyla çarpışma operatörü ve parçacık hız vektörlerini temsil etmektedir. Denklemdeki ilk terim parçacıkta meydana gelen değişimi, ikinci terim parçacığın taşınımını, üçüncü terim ise parçacıkların çarpışmasını ifade etmektedir. Lattice Boltzmann metodu parçacıkları çarpıştırarak yeni hızlara sahip yeni parçacık bulutlarının elde edilmesi ve elde edilen yeni parçacık bulutlarının komşu kafes hücrelerine yayılması prensibiyle çalışmaktadır. Şekil 1'de çarpışma ve yayılma prensipleri şematik olarak gösterilmiştir. Boyutsuz Boltzmann denklemindeki çarpışma operatörü için geliştirilen farklı modeller mevcuttur [Alhilo vd. 2020]. Bu çalışmada çarpışma operatörü (Ω_f) Bhatnagar-Gross-Krook (BGK) modeli kullanılarak basitleştirilmiş ve $\Omega_f = \frac{f-f_0}{c\tau}$ olarak tanımlanmıştır. Burada f_0 denge dağılım fonksiyonunu, τ çarpışma süresini temsil etmektedir. LBM'de çarpışma süresinin hesabı için tek dengeleme zamanına sahip çarpışma operatörü (single relaxation time SRT) ve çoklu dengeleme zamanına sahip çarpışma operatörü (multiple relaxation time MRT) olmak üzere iki model kullanılabilir. LBM ile türbülanslı akışları da inceleyebilmek için LES yöntemi kullanılmıştır. LES yöntemini LBM'e uygulamak için temel ızgara yöntemine dayalı bir uzaysal filtre tanımlanmıştır. Filtre, yüksek dalga sayılı yoğunluk dağılımı fonksiyonlarını filtrelemektedir. Filtremenenin uygulanması ile denklem 2'de verilen MRT-LBM-LES denklemi elde edilir [Dong vd. 2008].

$$|\bar{f}(x_i + e_\alpha \delta t, t + \delta t) - \bar{f}(x_i, t)| = -M^{-1} \bar{S} [|m(x_i, t) - m^{eq}(x_i, t)|], \quad \alpha = 0, 1, \dots, 18 \quad (2)$$

Burada, \bar{f} filtrelenmiş yoğunluk dağılım fonksiyonunu ifade etmektedir. Akış problemlerinin fiziksel olarak sayısal benzetimi için sınır şartlarının doğru bir şekilde uygulanması gerekmektedir. Kaymazlık sınır şartını sağlamak için geri yansıma [Chang vd., 2009] yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, momentum taşıyan bir parçacığın katı bir yüzeye karşılaştığında ters yönde aynı momentum ile yansımaları sağlamaktadır. Bu metod ile denklem 3'te verilen interpolasyon şeması kullanılarak kaymazlık sınır şartı uygulanmıştır [Bouzidi vd., 2001]. Bu yöntem ile akışkan-sınır bölgesi arasındaki uzunluk kesrine, Δ , göre geri-yansımayı sağlayacak olan çarpışma sonrası dağılım fonksiyonu (f) elde edilmektedir.

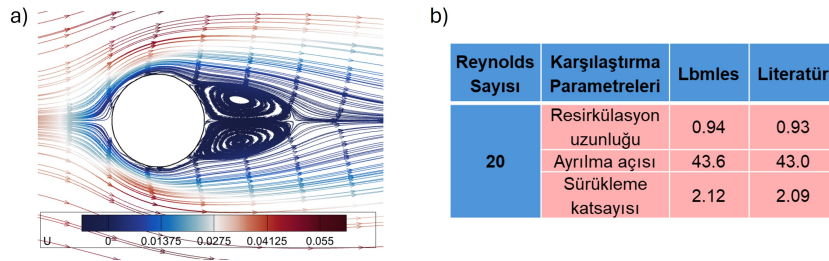
$$f_{\bar{a}}(x_f, t + \delta t) = \begin{cases} \frac{1}{2\Delta} \tilde{f}(x_f, t) + \frac{2\Delta-1}{2\Delta} \tilde{f}_a(x_f, t), & \text{for } \Delta \geq \frac{1}{2} \\ 2\Delta \tilde{f}(x_f, t) + (1-2\Delta) \tilde{f}_a(x_f - e_a \delta t), & \text{for } \Delta < \frac{1}{2} \end{cases} \quad (3)$$

Düzgün ağ yapılarında fiziksel uzay ve hız alanının ayrıklaştırılması sonucunda elde edilen yayılma mesafesi ve kafes hücresi uzunluğu birbirine eşittir. Dolayısıyla parçacık dağılım fonksiyonundaki bilgiler bir iterasyonda sadece bir kafes hücresi uzaklığa yayılır. Ancak düzgün olmayan ağ yapısı kullanıldığında fiziksel uzay, farklı uzunluklardaki kafes hücreleriyle ayrıklaştırılmaktadır. Bu durumda yayılma mesafesi ve kafes hücresi uzunluğu birbirine eşit olmadığı için düzgün olmayan ağ yapısına sahip kafes yapılarında denklem 4 ile verilen interpolasyon şeması kullanılmıştır.

$$f_\alpha(x_i, t + \delta t) = \sum_{j=0}^n \prod_{k=0, k \neq j}^n \left(\frac{x_i - x_{i+\gamma_\alpha} - e_\alpha \delta t}{x_{i+j\gamma_\alpha} - x_{i+k\gamma_\alpha}} \right) f_\alpha(x_{i+j\gamma_\alpha} + e_\alpha \delta t, t + \delta t) \quad (4)$$

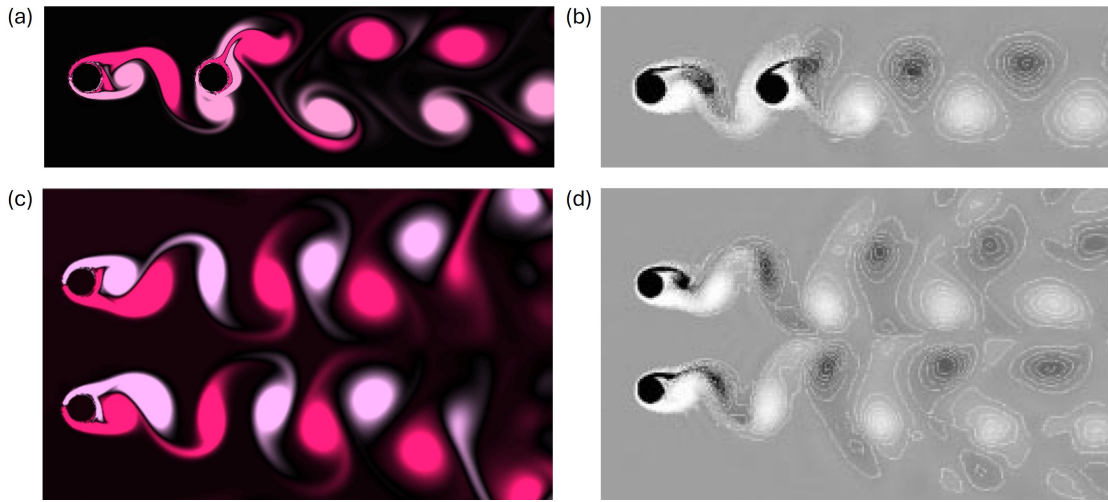
UYGULAMALAR

LBM düşük hesaplama bütçeleriyle birlikte yüksek doğruluklu çözüm üretebilen bir yöntem olması itibarıyla avantajlı olsa da; bazı dezavantajları da mevcuttur. Bu dezavantajlardan en önemlisi sınır şartlarının probleme entegre edilmesidir. Silindir etrafındaki akış $Re = 20$ için incelenmiştir. Referans değerler silindir çapı ve giriş hızı olarak alınmıştır. Analiz için hesaplama alanı $2500 \times 1200 \times 2$ 'lik bir kafes yapısı oluşturulmuştur. Analiz sonucunda *lbmles* ile elde edilen sonuçlar ve sonuçların literatür [Cui vd. 2022] ile karşılaştırılması şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2(a)'da silindir etrafında akış hızı ile renklendirilmiş akım çizgileri görülmektedir. Silindirin iz bölgesinde, ters yönlü iki simetrik girdap yapılarının oluşumu gözlemlenmiştir. Bu girdap yapıları, akışın ters yönlü hareketini başlatmış ve devridaim bölgesi oluşturmuştur. Silindir etrafında laminer akış; resirkülasyon uzunluğu, ayrılma açısı ve sürüklenme katsayısı gibi parametreler ile karakterize edilmektedir. Resirkülasyon uzunluğu devridaim bölgesinin sonu ile silindirin arka yüzeyi arasındaki uzunluğu ifade etmektedir. Ayrılma açısı ise silindir merkezi ile akım çizgilerinin ayrıldığı nokta arasındaki doğrunun yatay eksenle yaptığı açıyı göstermektedir. *lbmles* çözücüsü ile elde edilen akış alanı incelendiğinde devridaim uzunluğu, ayrılma açısı ve sürüklenme katsayısı parametrelerinin literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Sonuçlardan görülebildiği üzere, küt-cisim kaynaklı iz bölgesinde oluşan akışın fiziği yüksek doğruluklu olarak çözümlenmiştir. Aynı zamanda, yine küt cisim kaynaklı, iz bölgesinde akışın momentum kaybının da fiziksel olarak yüksek doğruluklu bir şekilde sayısal benzetildiği gözlemlenebilmektedir.



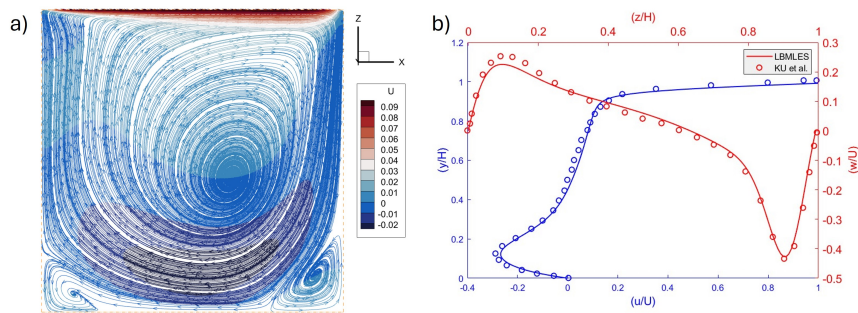
Şekil 2: Silindir etrafında elde edilen akım çizgileri (a) ve sonuçların literatürle [Cui vd. 2022] karşılaştırılması (b).

Silindir üzerindeki daimi akış problemi incelendikten sonra çözücünün daimi olmayan akışlardaki performansı; yan-yana ve üst-üste iki silindir üzerindeki akış problemleriyle incelenmiştir. Bunun için yan yana ve üst üste birbirinden 4 silindir çapı kadar uzağa konumlandırılmış silindirler etrafında akış analizi gerçekleştirilmiştir. Yan yana silindir konfigürasyonu için akış analizi $Re = 100$ için $2000 \times 1000 \times 2$ 'lik bir kafes yapısında gerçekleştirilmiştir. Üst üste silindir konfigürasyonunda ise akış analizi $Re = 200$ için $600 \times 300 \times 2$ 'lik bir kafes yapısında gerçekleştirilmiştir. Her iki konfigürasyonda gerçekleştirilen analizlerde çarpışma modeli olarak MRT kullanılmıştır. Analiz başından itibaren elde edilen girdaplılık eş yüzeyleri ve literatürde [Meneghini vd. 2001] aynı koşullar için bulunan sonuçlar şekil 4'te gösterilmiştir. Şekil 4 (a),(c) *lbmles* çözücüsünden elde edilen sonuçları gösterirken şekil 4 (b),(d) Meneghini vd.'nin elde ettiği sonuçları göstermektedir. Buna göre, yan yana ve üst üste konumlandırılmış silindirlerin, birbirlerine olan uzaklıklara bağlı olarak akış fiziğini etkilediği görülebilmektedir. Yan yana konumlandırılmış silindir analizinde, iki silindirin arasında yeterli aralık oluşturulmasından kaynaklı olarak iki farklı girdap dökülme mekanizması gözlemlenebilmektedir. Fakat ilk silindirden oluşan girdaplar, ikinci silindir üzerindeki akışı etkileyerek ikili sistemin iz bölgesindeki akışın dinamiğini değiştirmektedir. Öte yandan, üst üste konumlandırılmış silindir analizinde ise oluşan girdapların simetrik olduğu, ve aynı frekans ve periyotta oluştuğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu sonuçlar vermesi ışığında, özgün akış çözücüsünün daimi olmayan kompleks akışlar için de yüksek doğruluklu sayısal çözümler oluşturduğu görülebilmektedir.



Şekil 4: Yanyana (a) ve üst üste (c) iki silindirin ardında *lbmles* ile elde edilen eş girdap yüzeyleri ve literatürde [Meneghini vd. 2001] verilen eş girdap yüzeyleri (b) (d).

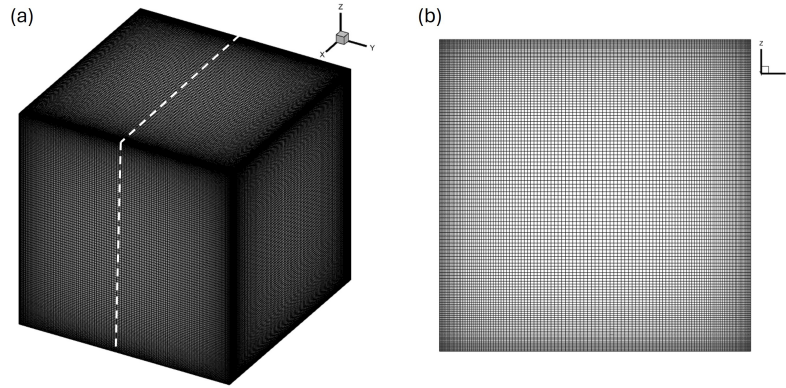
Silindir etrafında daimi ve daimi olmayan akışlara ek olarak kapak tarafından hareket ettirilen oyuk akışı problemi $Re = 1000$ için incelenmiştir. Oyuk akış probleminde Reynolds sayısı, geometrinin akış yönündeki uzunluğu ve kapak hızı referans alınarak tanımlanmıştır. Hesaplama alanı olarak $129 \times 129 \times 129$ 'luk bir kafes yapısı oluşturulmuştur. Kapak tarafından hareket ettirilen laminer oyuk akışı probleminde *lbmles* ile elde edilen sonuçlar ve sonuçların literatür ile karşılaştırılması Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3(a)'da aksel akış hızı ile renklendirilmiş akım çizgileri görülmektedir. Kapağın hareketi ile beraber momentum kazanan akış, akış içerisinde aşağı yönlü bir jet oluşturmaktadır. Bunun sonucunda ise, orta bölgede ana girdap yapısının oluştuğu gözlemlenebilmektedir. Aynı şekilde, Reynolds sayısına bağlı olarak köşelerde ise ikincil girdap yapılarının oluştuğu gözlemlenebilmektedir. *lbmles* çözücüsü, oyuk akış dinamiklerini başarılı ile yakalamış ve fiziksel sonuçlar elde etmiştir. Şekil 3(b)'de ise yatay ve dikey merkez hattı boyunca *lbmles* çözücüsünden elde edilen aksel hız profillerinin literatür ile karşılaştırmalı grafiği verilmektedir. Girdap hareketleri ve kaymaz duvar şartı ile beraber aksel hız dağılımlarının da fiziksel olarak literatür ile uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Buna göre, kaymaz duvarlarda hızlar sıfır olmakla beraber, girdaplar nedeniyle kuvvetli ters yönlü akışlar oluşmaktadır.



Şekil 3: Oyuk akışında oluşan akım çizgileri (a) ve hız profillerinin literatürle [Ku vd. 1987] karşılaştırılması (b).

Oyuk akışı problemi, Reynolds sayısının 12000 olduğu durumda $130 \times 130 \times 130$ 'luk bir kafes yapısı kullanılarak tekrar ele alınmıştır. Reynolds sayısının sayısal kararlılığı etkileyecek kadar yüksek olduğu türbülanslı akış rejimindeki oyuk akışı probleminde stabiliteyi sağlamak ve aynı zamanda yüksek doğruluklu sonuçlar elde edebilmek amacıyla düzgün olmayan ağ yapısı kullanılmıştır. Düzgün

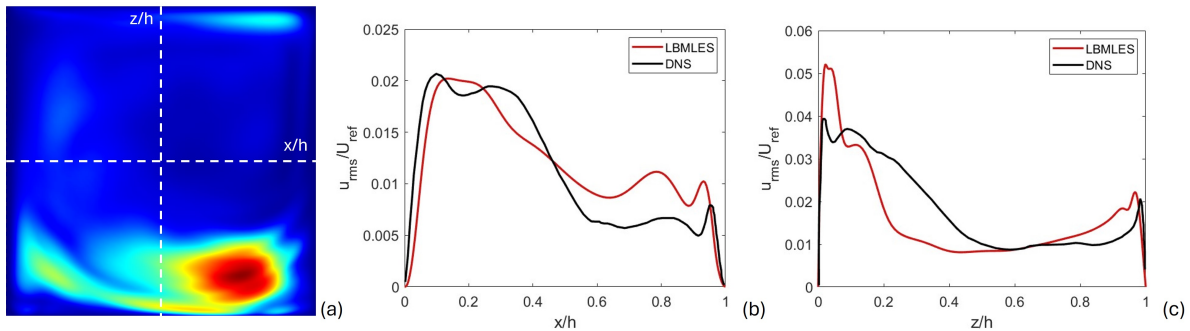
ve düzgün olmayan ağ yapılarının detaylı incelemesi Sukuroglu vd. 2024 çalışmasında verilmiştir. Düzgün olmayan ağ yapısı Şekil 5'te verildiği gibi kübik oyuğun kenarlarına doğru sık hücreler ile oluşturulurken oyuk ortalarına doğru seyrek hücreler ile oluşturulmuştur. Kafes yapısı, ardışık iki ağ hücresi arasındaki uzunluk oranı maksimum 1.2 olacak şekilde oluşturulmuştur.



Şekil 5: Yüksek Reynolds sayısında gerçekleştirilen oyuk akışı analizinde kullanılan düzgün olmayan ağ yapısının 3B gösterimi (a), 2B gösterimi (b)

Simülasyonda MRT çarpışma modeli ve Smagorinsky ağ altı modeli [Smagorinsky, 1963] kullanılmıştır.

Şekil 6'da türbülanslı çalkantı kontürü ile XZ düzleminde çalkantı dağılımının literatürdeki DNS sonuçlarıyla [Leriche vd. 2000, Bouffanais vd. 2007] karşılaştırılması gösterilmektedir. Sonuçlardan görülebileceği üzere, duvara yakın bölgelerde türbülans aktivitelerinin yüksek olduğu gözlemlenebilmektedir. Duvara yakın bölgede yüksek hız gradyanları, bu bölgelerde yüksek türbülans çalkantılarını beslemektedir. Bununla beraber ana girdap ile ikincil girdaplarının etkileştiği bölgelerde ise yine yüksek türbülans çalkantıları gözlemlenmektedir. Düzgün olmayan ağ yapısının kullanımı ile, duvara yakın bölgelerdeki değişimlerin daha yüksek doğruluklu olarak çözümlenmiş, ve kuvvetli türbülans çalkantılarının sayısal benzetimi, literatür ile uyumlu bir şekilde tamamlanmıştır. Aynı zamanda duvardan uzak bölgelerde ise literatür sonuçlarıyla az da olsa farklılıklar görülse de, türbülans eğilimi doğru olarak yakalanmıştır.

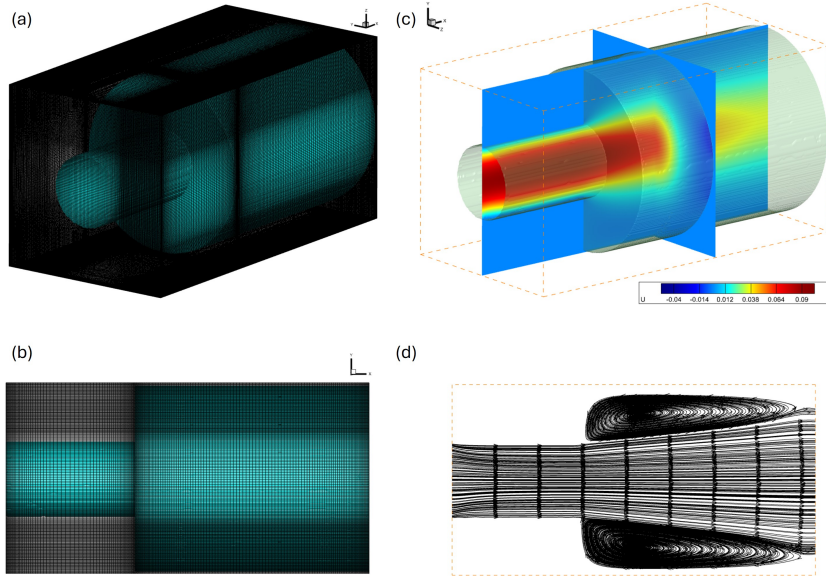


Şekil 6: XZ düzleminde türbülans istatistikleri (u_{rms}) (a), u_{rms} 'in sırasıyla x (b) ve z (c) eksenini boyunca DNS verisi ile karşılaştırılması

Son olarak, çalışmanın temel hedefi kapsamında silindirik yakıcı içerisindeki akış problemi, özgün akış çözücüsü ile ele alınmıştır. Çalışmada, gömülü sınır şartı yöntemi ile silindirik yakıcı geometrisi düzgün olmayan ağlar ile oluşturulmuştur. Şekil 7 (a,b)'da yanma odasının düzgün olmayan kafes yapısı içerisinde elde edilmiş hali görülmektedir. Silindir yüzeylerine kaymaz duvar şartı geri-zıplama

metodolojisi ile tanıtılmıştır. Silindir girişi ve çıkışına sırasıyla, hız giriş ve sıfır gradyen sınır şartları uygulanmıştır. Bu çalışma, daha sonrasında yapılacak olan türbülanslı tepkimeli akış analizleri için öncül bir çalışma niteliğindedir. Analizler $Re = 40$ için $300 \times 155 \times 155$ kafes yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Reynolds sayısı için referans değerler yakıcı giriş çapı ve giriş hızı olarak alınmıştır. Çarpışma SRT yöntemi ile modellenmiştir.

Şekil 7 (c)'de analiz sonucunda elde edilen eksenel hız dağılımı gösterilmektedir. Buna göre, yakıcı girişinden itibaren sınır tabakanın oluştuğu, ve fiziksel olarak geliştiği görülebilmektedir. Daha sonrasında, akışın yanma odasına girerek genişlediği ve yavaşlamaya başladığı gözlemlenebilmektedir. Şekil 7 (d)'de ise iki boyutlu akım çizgileri temsil edilmektedir. Buna göre, akışın jet çıkışında köşelerden ayrıldığı, ve yanma odasının çıkışına doğru tekrar bağlandığı görülmektedir. Ayrılan akış sonucunda üst ve alt köşelerde iki ayrı ters akım bölgesi oluşmuştur.



Şekil 7: Basitleştirilmiş silindirik yakıcı geometrisi (a) ve (b) gömülü sınır şartı uygulaması ile düzgün olmayan kafes yapısında elde edilmesi, (c) ve (d) akış analizi sonucu elde edilen eksenel hız konturları ve akım çizgileri.

SONUÇ

Bu çalışmada yanma odası içerisindeki akışı incelemek için lattice Boltzmann temelli bir çözücü geliştirilmiştir. Çözücünün yanma odası gibi kompleks geometrilerde çalışabilmesi için gömülü sınır şartı metodu, düzgün olmayan ağ yapısı ve geri yansıma sınır şartı uygulamaları geliştirilmiş ve birlikte kullanılmıştır. Geliştirilen *lbmes* çözücüsü ile kapak tarafından hareket ettirilen laminer oyuk akışı ve silindir etrafında laminer akış problemleri analiz edilmiştir. Silindir etrafında incelenen laminer akışta gerçekleşen akım ayrılması neticesinde silindirin arkasında simetrik iki girdap bölgesi oluşmuştur. Akım ayrılma açısı, resirkülasyon bölgesinin uzunluğu ve sürüklenme katsayısı parametreleri literatür [Cui vd. 2022] ile karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bir diğer çalışma olarak daimi olmayan akış rejiminde yan-yana ve üst-üste konumlandırılmış iki silindir konfigürasyonları incelenmiştir. Yan-yana konumlandırılmış silindirlerde ilk silindirden kopan girdapların ikinci silindir üzerindeki akışı etkilediği ve iki silindirin arkasında literatür ile uyumlu olarak [Meneghini vd. 2001] iki farklı girdap dökülme mekanizmasının oluştuğu görülmektedir. Üst-üste konumlandırılmış silindirlerde ise Meneghini vd. çalışmaları ile tutarlı bir şekilde simetrik ve aynı frekansta girdapların oluştuğu gözlemlenmiştir. Laminer akış problemlerine ek olarak incelenen kapak tarafından hareket ettirilen oyuk akışı probleminde birincil merkez girdabının yanısıra iki köşe

girdabı oluşmuştur. Merkez hattı boyunca hız profili incelendiğinde sınır tabakanın doğru yakalanması sonucunda literatürle [Ku vd. 1987] uyumlu hız profillerinin oluştuğu görülmüştür. Laminer ve daimi olmayan akışlardan sonra türbülanslı akışlar da oyuk akışı geometrisinde *lbmles* ile incelenmiştir. Duvar yanlarında daha küçük ağ hücreleri ile oluşturulan bir kafes yapısında duvarlara yakın bölgelerdeki yüksek hız gradyanları yakalanmış ve bu yüksek hız gradyanlarının beslediği yüksek türbülans çalkantıları literatürdeki DNS verisi [Bouffanais vd. 2007] ile tutarlı bir şekilde elde edilmiştir. Son olarak çalışmanın temel hedefi doğrultusunda basitleştirilmiş silindirik yakıcı içerisindeki akış *lbmles* ile analiz edilmiştir. Reynolds sayısının 40 olduğu durumda silindirik yakıcının genişlediği bölgelerde simetrik laminer ters akım bölgelerinin oluşması ile fiziksel bir çözüm elde edilmiştir. Çözücü; kaymazlık sınır şartı, geri-yansıma metodolojisi, düzgün olmayan ağ yapısı ve büyük edî benzetimi yöntemi ile birlikte sorunsuz bir şekilde çalışmakta ve çok geniş bir akış rejim aralığında fiziksel sonuçlar üretmektedir. Gelecek çalışmalarda, belirlenen bir yanma odası basitleştirilmeden tüm detaylarıyla türbülanslı akış rejiminde *lbmles* kullanılarak analiz edilecek ve sonuçları literatür ile karşılaştırılacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 122M607 proje numarası ile desteklenmektedir. Bu çalışmada kullanılan hesaplama kaynakları Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Merkezi'nin (UHeM), 4016232023 numaralı desteğiyle, sağlanmıştır.

Kaynaklar

- Alhilo, A., Hasan, W. F., Farhat, H., 2020. *On the SRT-MRT Lattice Boltzmann Method: Validity Limits of the Single Relaxation Time for Simulating Single-Phase Flows*, International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing Cilt.8(3)
- Boivin, P., Tayyab, M., ve Zhao, S., 2021. *Benchmarking a lattice-Boltzmann solver for reactive flows: Is the method worth the effort for combustion?*, Physics of Fluids, Cilt.33(7)
- Bouffanais, R., Deville, M. O., ve Leriche, E., 2007. *Large-eddy simulation of the flow in a lid-driven cubical cavity*, Physics of Fluids, Cilt.19(5)
- Bouzidi, M., Firdaouss, M., ve Lallemand, P., 2001. *Momentum transfer of a Boltzmann-lattice fluid with boundaries*, Physics of Fluids, Cilt.13(11)
- Chang, C., Liu, C. H., ve Lin, C. A., 2009. *Boundary conditions for lattice Boltzmann simulations with complex geometry flows*, Computers and Mathematics with Applications, Cilt.58(5), s.940-949
- Cui, X., Wang, Z., Yao, X., Liu, M., ve Yu, F., 2022. *A coupled two-relaxation-time lattice Boltzmann-volume penalization method for flows past obstacles.*, Mathematics and Computers in Simulation, Cilt.198, s.85-105
- Dong, Y. H., Sagaut, P., ve Marie, S., 2008. *Inertial consistent subgrid model for large-eddy simulation based on the lattice Boltzmann method.*, Physics of Fluids, Cilt.20(3)
- Hosseini, S. A., Boivin, P., Thévenin, D., ve Karlin, I., 2024. *Lattice Boltzmann methods for combustion applications.*, Progress in Energy and Combustion Science, Cilt. 102
- Hosseini, S., Safari, H., Darabiha, N., Thevenin, D., ve Krafczyk, M., 2019. *Hybrid lattice Boltzmann-finite difference model for low Mach number combustion simulation.*, Combustion and Flame, Cilt.209, s.394-404

- Krüger, T., Kusumaatmaja, H., Kuzmin, A., Shardt, O., Silva, G., ve Viggen, E. M., 2022. *The lattice Boltzmann method*, Springer, birinci baskı
- Ku, H. C., Hirsh, R. S., ve Taylor, T. D., 1987. *A pseudospectral method for solution of the three-dimensional incompressible Navier-Stokes equations*, Journal of Computational Physics Cilt.70(2), s.439-462
- Leriche, E., ve Gavrilakis, S., 2000. *Direct numerical simulation of the flow in a lid-driven cubical cavity*, Physics of Fluids, Cilt.12(6), s.1363-1376
- Menegini, J.R., Saltara, F., Siqueira, C.D.L.R., ve Ferrari Jr.,J.A., 1963 *Numerical simulation of flow interference between two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangements*, Journal of fluids and structures, Cilt. 15(2), s.327-350
- Smagorinsky, J. 1963 *General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment*, Monthly Weather Review, Cilt. 91(3), s.99-164
- Sukuroglu, B., Cinar, A.A., ve Gungor, A.G., 2024. *Lattice Boltzmann method for large eddy simulation of turbulent flows*, AIAA AVIATION FORUM AND ASCEND 2024, AIAA 2024-4465
- Tayyab, M., Zhao, S., Feng, Y., ve Boivin, P., 2020. *Hybrid regularized lattice-Boltzmann modelling of premixed and nonpremixed combustion processes*, Combustion and Flame, Cilt.211, s.173-184