



A study on required grid resolution for large eddy simulation analyses

Kürşad Melih Güleren*

Aeronautical Engineering Department, Faculty of Engineering and Architecture, Eskişehir Osmangazi University, 26040, Eskişehir, Türkiye

Highlights:

- Grid resolution proposal for LES
- The method is based on a simple algorithm and a priori RANS simulation
- Comparison required between the grid size (filter) and Taylor scale

Keywords:

- Grid Resolution
- Large Eddy Simulation
- Taylor Scale

Article Info:

Research Article
Received: 17.02.2023
Accepted: 08.09.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1252212

Correspondence:

Author: Kürşad Melih Güleren
e-mail: kursadmeli.guleren@ogu.edu.tr
phone: +90 222 239 37 50 / 3249

Graphical/Tabular Abstract

In this study, a methodology is proposed on the required grid resolution to ensure the accuracy of the results in LES (Large Eddy Simulation) solutions of turbulent flows.

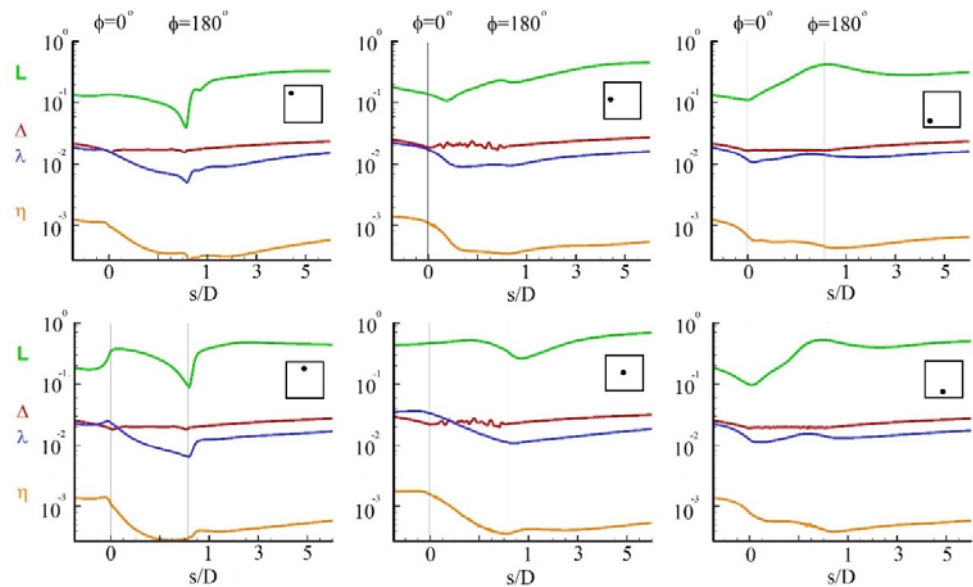


Figure A. Variation of characteristic scales along the duct according to the $k-\epsilon$ turbulence model (L: Integral Length Scale, Δ : filter, λ : Taylor Length Scale η : Kolmogorov Length Scale; The right and left lines of the square show the side walls, the top and bottom lines show the inner and outer walls of the channel, respectively)

Purpose: The purpose is to develop an algorithm that guarantees the accuracy of an LES solution with a correct strategy in the absence of experimental data.

Theory and Methods: The method is different from the grid-independent analyses previously performed using multiple and different grid structures for the resolution adequacy of LES. In the proposal, which is based on the temporal and dimensional comparison of the Integral, Kolmogorov and Taylor Scales and the scale that characterizes the cell size, the information about resolution adequacy was obtained before proceeding the LES solution (Figure A.) For the referenced U-duct flow problem, the proposal has been validated with the available experimental data.

Results: According to the suggestions and validation results presented, it was interpreted that the velocities in the direction of the main flow and perpendicular to the main flow were calculated correctly. Therefore, the proposal was sufficient for the determination of the first-order flow statistics. It was observed that the acceleration in the inner wall, the deceleration in the outer wall, the flow separation near the inner wall, and the formation and development of counterflow in the U-duct were accurately captured in the current LES analysis. When the root-mean-square values of the velocity fluctuations in the direction of the main flow and perpendicular to the main flow, which are the second-order flow statistics parameters, are examined, it is understood that the results are promising and acceptable.

Conclusion: It has been shown that the resolution adequacy proposed for the LES in this study is easy to implement, fast, and reliable.



Büyük girdap benzetimi analizleri için gerekli ağ çözünürlüğü üzerine bir çalışma

Kürşad Melih Güleren*

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, 26040, Eskişehir, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- LES için ağ çözüm önerisi
- Yöntem basit bir algoritmaya ve öncül RANS simülasyonuna dayanmaktadır.
- Ağ hücre boyutu (filtre) ile Taylor ölçeği arasında karşılaştırma yapılması gerekir.

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 17.02.2023

Kabul: 08.09.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1252212

Anahtar Kelimeler:

Ağ Çözünürlüğü

Büyük Girdap Benzetimi

Taylor Ölçeği

ÖZ

Bu çalışmanın amacı deneysel veri yokluğunda doğru strateji ile LES çözümünün doğruluğunu garanti eden bir algoritma geliştirmektir. Benimsenen yöntem, LES'in çözünürlük yeterliliği için daha önce çoklu ve farklı ağ yapıları kullanılarak gerçekleştirilen ağdan bağımsız analizlerden farklıdır. İntegral, Kolmogorov ve Taylor Ölçekleri ile hücre boyutunu karakterize eden ölçeğin zamansal ve boyutsal karşılaştırmasına dayanan öneride, LES çözümüne geçmeden önce çözünürlük yeterliliği hesaplanmıştır. U-kanal akış problemi için öneri, mevcut deneysel verilerle doğrulanmıştır. Ana akış yönünde ve ana akışa dik hızların doğru bir şekilde hesaplandığı görülmüştür. Dolayısıyla önerinin, birinci dereceden akış istatistiklerinin için yeterli olduğu ortaya çıkarılmıştır. Mevcut LES analizinde iç duvara yakın akıştaki ivmelenme, dış duvara yakın bölgelerdeki yavaşlama, iç duvar yakınındaki akış ayrılması, U-kanalındaki karşı akışın oluşumu ve gelişimi doğru bir şekilde hesaplanmıştır. İkinci dereceden akış istatistikleri olan ana akış yönünde ve ana akışa dik hız salınımlarının ortalama karekök değerleri incelendiğinde sonuçların umut verici ve kabul edilebilir olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışmada LES için önerilen çözünürlük yeterliliğinin uygulanmasının kolay, hızlı ve güvenilir olduğu gösterilmiştir.

A study on required grid resolution for large eddy simulation analyses

HIGHLIGHTS

- Grid resolution proposal for LES
- The method is based on a simple algorithm and a priori RANS simulation
- Comparison required between the grid size (filter) and Taylor scale

Article Info

Research Article

Received: 17.02.2023

Accepted: 08.09.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1252212

Keywords:

Grid Resolution

Large Eddy Simulation

Taylor Scale

ABSTRACT

The purpose of this study is the develop an algorithm that guarantees the accuracy of an LES solution with a correct strategy in the absence of experimental data. The method adopted is different from the grid-independent analyses previously performed using multiple and different grid structures for the resolution adequacy of LES. In the proposal, which is based on the temporal and dimensional comparison of the Integral, Kolmogorov and Taylor Scales and the scale that characterizes the cell size, the information about resolution adequacy was obtained before proceeding the LES solution. For the referenced U-duct flow problem, the proposal has been validated with the available experimental data. According to the suggestions and validation results presented, it was interpreted that the velocities in the direction of the main flow and perpendicular to the main flow were calculated correctly. Therefore, the proposal was sufficient for the determination of the first-order flow statistics. It was observed that the acceleration in the inner wall, the deceleration in the outer wall, the flow separation near the inner wall, and the formation and development of counterflow in the U-duct were accurately captured in the current LES analysis. When the root-mean-square values of the velocity fluctuations in the direction of the main flow and perpendicular to the main flow, which are the second-order flow statistics parameters, are examined, it is understood that the results are promising and acceptable. It has been shown that the resolution adequacy proposed for the LES in this study is easy to implement, fast, and reliable.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *kursadmeli@guleren@ogu.edu.tr / Tel: +90 222 239 37 50 / 3249

1. Giriş (Introduction)

Andrey Nikolayevich Kologorov'un 1941 yılında temellerini atması ile başlayan ve sonradan Kologorov Hipotezi olarak anılan tanımlamaya göre türbülanslı akış; farklı frekans, boyut ve hızı sahip "eddy" denilen girdapsal yapılar ve bunların etkileşimlerinden oluşmaktadır [1]. Bu akış yapılarının türbülans enerji tayfında ifade edilmesi mümkündür. Genel olarak bu tayfi; enerji içeren bölge, enerji geçiş bölgesi ve enerji kaybolma bölgesi olarak üçe ayrılmak mümkündür. Enerji içeren bölgedeki yapılar enerji üretimini sağlamakta olup daha düşük frekansa sahiptirler. Kaybolma (dissipation) bölgesindeki yapılar ise üretilen türbülansın yok olması veya yitiminden sorumlu olup çok daha yüksek frekansa sahiptirler. Enerji geçiş bölgesinde ise türbülans enerjisinin büyük ölçekli yapılardan küçük ölçekli yapılara transferi söz konusudur [2]. Dolayısı ile türbülanslı bir akış alanındaki enerji hesabı için en büyüğünden en küçüğüne kadar tüm bu "eddy" yapılarının etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Bu yapıldığında teorik olarak herhangi bir türbülans modeline ihtiyaç duyulmadan akış alanı uygun sayısal yöntemler uygulandığında çözülebilmektedir.

Türbülans enerji tayfındaki tüm yapıların çözümüne dayalı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yaklaşımı olan Doğrudan Sayısal Benzetim (DNS-Direct Numerical Simulation) yöntemi geliştirilmiştir [3]. DNS ile yapılan HAD çözümleri sonucundaki ortaya çıkan veriler, Kologorov Hipotezi doğrultusunda deneysel verilere çok yakın olabilmekte ve hatta bazı durumlarda deneysel verilerin yerini tutabilmektedir. Fakat sayısal çözümdeki en önemli sorun küçük ölçekli yapıların birbirlerine göre frekans, boyut ve hız oranlarının Reynolds sayısı ile doğru orantılı olarak üstel olarak değişmeleridir. Dolayısı ile Reynolds sayısı arttıkça küçük türbülanslı yapılar daha da küçülmekte ve bu yapıları DNS ile yakalayabilmek için kullanılan ağ hücrelerinin de bu yapıların boyutuna eşit veya daha küçük olması beklenmektedir. DNS'te model kullanılmadığından tüm enerji tayfındaki türbülanslı yapıların çözülmesi gerekmektedir. Bu da tüm akış alanı için kullanılan toplam ağ hücrelerinin yine üstel olarak artması anlamına gelmektedir. Daha büyük boyutlu ağ hücreleri ise kendisinden küçük yapıları çözemeyeceğinden modellenmesi gerekir. Bunun için de Büyük Girdap Benzetimi (LES-Large Eddy Simulation) tekniği uygulanmaktadır.

Ulusal literatüre bakıldığında türbülanslı akış analizlerinde özellikle son yıllarda LES'in sıkça kullanılan bir yöntem olduğu gözle çarpmaktadır. Karahan vd. [4] düşük basınçlı türbin pali etrafındaki türbülanslı akışı kendi geliştirdikleri lestr3d kodu ile incelemişlerdir. Sert [5] şok dalgası sınır tabaka etkileşimlerinin LES ile incelenmesi üzerine çalışmıştır. Sert başla bir LES çalışmasında damarlardaki daralmaların oluşturduğu akustik yayılımını OpenFOAM çözücüsü ile incelemiştir (Sert ve Yazıcıoğlu [6]). Coşgun ve Çadırıcı [7], ANSYS/Fluent kullanarak kavite akışının aeroakustiğini LES ile çalışmışlardır. ANSYS/Fluent çözücü LES çalışmasına başka bir örnek Aköz vd. [8] tarafından yapılan çalışmadır. Ekip LES'in yanında açık kanal akımını DES (Detached Eddy Simulation-Ayrık Girdap Benzetimi) ile incelemiştir. Eraslan ve Ergin [9], kanat yunuslaması ve değişken kanatçık açıları sırasında oluşan akış fiziklerini Aero-Flower isimle kod ile incelemişlerdir. Yılmaz [10] ise türbülanslı Rayleigh-Bénard ısı taşınım problemini farklı LES modelleri uygulayarak geliştirmiş oldukları kod ile çalışmıştır. ANSYS/Fluent ile gerçekleştirilen LES çalışmasına başka bir örnek Güngör [11] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada jenerik bir sualtı aracının akış gürlüğü; ses basınç seviyeleri, ses yönelimi, gürlüğü spektrumları ve akustik iz hesapları ile analiz edilmiştir. Görüldüğü üzere ulusal düzeyde LES'in birçok ekip tarafından farklı problemlere uygulandığı, bu uygulamaların da ticari, açık kaynak kodlu veya in-house akış çözücülerle gerçekleştirildiği görülmüştür.

Makale ve bildiri örneklerine ilaveten LES ile yapılan lisansüstü tezler de örnekler kapsamında verilebilir. YÖK'ün ulusal tez arama sitesinde 2010'den bu tarafa "Büyük Girdap Benzetimi" ismini taşıyan 4, "Büyük Burgaç Benzetimi" ismini taşıyan 1, "Large Eddy Simulation" ismini taşıyan 15 olmak üzere toplam 20 lisansüstü tezi bulunmuştur. İTÜ UHeM ve TÜBİTAK TRUBA altyapılarının yüksek başarılı hesaplama imkanı sağlaması LES'in giderek daha da yaygınlaşmasına katkıda bulunmaktadır.

Reynolds sayılarının artması ile ağ çözünürlüğünün üstel artış göstermesi gerçeği göz önüne alındığında yakın gelecekte özellikle endüstriyel akışlar için DNS yönteminin uygulanması mümkün gözükmemektedir. Öyle ki, Spalart [12] mevcut bilgisayar hızındaki değişimleri de hesaba katarak DNS'in ancak 2080'lerde endüstriyel akışlar için hazır hale gelebileceğini ifade etmektedir. Spalart [12] bu hesabı 2000 yılında yaptığında CPU tarafında Intel'in GPU tarafında ise NVIDIA'nın işlemci başına 20 milyon transistor üretim kapasiteleri bulunmaktadır. Spalart [12], DNS'in 2080'lerde hazır olması hesabını bilgisayar gücünün her iki senede iki kat artması tahminine göre yapmıştır. 2020 yılı sonu itibarı ile Intel ve NVIDIA'nın işlemci başına transistor üretimi 20 milyar civarına yaklaşmıştır. Bu da geçen 20 yıl sonrasında 1000 kat artış anlamına gelmektedir. Her iki senede iki kat artış 20 senede $2^{10}=1024$ kat artışa denk geldiğinden Spalart [12]'in bu çerçevedeki hesabının geçerliliğini halen koruduğu görülmüştür. Bilindiği üzere günümüzde endüstriyel akışlar için yoğun olarak Reynolds-Ortalama Navier Stokes (RANS-Reynolds Averaged Navier-Stokes) türbülans modelleri ile gerçekleştirilen analizler tercih edilmektedir. RANS modelleri türbülans kinetik enerji tayfında sadece İntegral Uzunluğu Ölçeği boyutlarındaki türbülanslı yapıların çözülmesi ve geri kalan yapıların ise modellenmesi ilkesine dayanmaktadır. Dolayısı ile RANS modelleri sonuçlara doğrudan ve önemli ölçüde etki yapmaktadır. Spalart ve Allmaras [13]'in sunduğu gibi 1-eşitlik modellerinden başlayarak Launder vd. [14]'nin önerdiği daha gelişmiş Reynolds Gerilme Modeli (RSM-Reynolds Stress Model) gibi 7-eşitlik modellerine kadar geniş bir alanda RANS modellerini literatürde görmek mümkündür. Eşitlik sayısı ile orantılı olarak RANS modellerinin de sonuçlardaki doğruluğu artmakta, fakat çözüm süresi uzamaktadır. Ayrıca eşitlik sayısının artması ile çözücü kararlılığında da azalmalar görülmektedir. Bu yüzden pratik uygulamalarda $k-\epsilon$ [15] (Launder ve Spalding (1972)) veya $k-\omega$ [16] (Wilcox (1998)) gibi 2-eşitlik modellerinin kullanıldığı görülür. Fakat bu RANS modelleri ile yapılan HAD analiz sonuçlarının deneysel verilerle doğrulanması gerekir. Dolayısı ile deneysel veri yokluğunda kısıtlı bilgisayar gücü kullanarak türbülanslı akışlar için daha güvenilir bir yöntem belirlenmelidir. DNS'in yüksek hesaplamaya gücü gereksinimi RANS modellerinin de sonuçlar üzerinde model etkisinin çok fazla olması sebebi ile bu modellerin ihtiyacı gidermek için kullanımı mümkün görülmemektedir.

Bu çalışmada bir algoritma dahilinde ifade edilen şekli ile türbülanslı akışlarda deneysel veri yokluğunda veya deneysel veriye ihtiyaç duymadan HAD çözümlerinin sonuçların doğruluğunun tespiti üzerine bir öneri getirilmiştir. Temelde uygun bir ağ ile Büyük Girdap Benzetimi (LES-Large Eddy Simulation) çözümünün sonuçlarının deneysel verilere alternatif olacağı ifade edilmektedir. İzlenen bu yöntem kolayca uygulanabilir bir yapıda olup, daha önce LES'in gerektirdiği ağ yeterliliği için çoklu ve farklı ağ yapıları kullanılarak yapılan ağdan bağımsız analizlerden [17-21] farklı ve özgün bir niteliktedir. Boudier vd. [17] bir helikopter yanma odasındaki tepkisel akışlar için yapmış oldukları üç farklı ağ sayısına sahip LES analizlerinde, ortalama akış değerlerinin ağ sayısından bağımsız olduğunu RMS değerlerinin ise ağ sayısı arttıkça önemli değişiklik gösterdiğini görmüşlerdir. Gousseau vd. [18] yüksek bina üzerinde yaptıkları bir LES çalışmasında iki farklı ağ yapısının ortalama hız ve

basınç ile türbülans kinetik enerji değerlerine olan etkisini gösterilmişlerdir. Ağ çözünürlüğünün türbülans ölçeklerinin büyük bir kısmını içerdiği dolayısı ile LES'in deneysel verileri doğruladığı tespit edilmiştir. Wurps vd. [19], atmosferik sınır tabakayı LES ile farklı ağ yapılarında çözerek 1,25 m'den başlayarak 80 m ölçeğine sahip ağ eleman uzunluklarının sonuçlara nasıl etki ettiğini görmüş ve bu anlamda hangi istatistiksel yaklaşımın ağ çözünürlüğü yeterliliğini belirlemede doğru olduğunu tespit etmeye çalışmışlardır. Eldeki sonuçlara göre iki-nokta korelasyonun uygun bir yöntem olduğu sonucuna varmışlardır. Khan vd. [20], çok daha basit bir geometri olan silindir üzerindeki akış için LES yapmışlardır. Çalışmalarında 14 farklı ağ çözünürlüğü ile akış ayrılmasını, girdap büyüklüklerini, silindir arkası akış yapısını; ortalama hız, basınç ve türbülans gerilmeleri ile incelemişlerdir. Rezaeiravesh ve Liefvendahl [21] ise düşük Reynolds sayılarında kanal akışı için yaptıkları LES'te ağ çözünürlüğünün boyutsuz hücre boyutları ile tanımlanma yolunu seçmiş ve bu çerçevedeki yapılan analizlerin sonucu olarak akış yönündeki ağ uzunluğunun 18'den küçük, akışa dik yöndeki periyodik sınırlara doğru olan ağ uzunluğunun 12'den küçük olması gerektiği ve y^+ değerinin ise 2'nin altında olmasının yeterli olacağını tespit etmişlerdir. Choi ve Moin [22] ise bu kapsamdaki çalışmalar için daha pratik bir öneri sunarak ağ sayısının duvar modelleyen LES analizleri için Re, duvar çözen LES analizleri için ise $Re^{13/7}$ mertebelerinde olması gerektiğini ifade etmişlerdir. Ağ çözünürlüğü tespiti üzerine yapılan çalışmalardan en çok atıf alan yöntemin başında Celik vd. [23]'ün önerdiği LES ağ çözünürlüğü için ağ kalitesi indeksi yöntemi gelmektedir. Fakat bu yöntem de diğer çalışmalarda uygulanan yöntemler de [17-21], LES koşuturulmadan ağ kalitesi hakkında bir strateji sunmamakta, ağ yeterliliği ancak LES analizlerinden sonra belirlenebilmektedir. Bu çalışmada ise, algoritmadan da anlaşılacağı üzere önceden LES koşuturulmadan ağ kalitesi hakkında fikir edinilecek, ağ yeterli ise LES'in deneysel veri ile doğrulanması yapılacaktır.

2. Yöntem (Methodology)

Uluslararası literatürde "Large Eddy Simulation" olarak bilinen Büyük Girdap Benzetimi, DNS ve RANS modelleri arasında yer alan melez bir çözüm yöntemi olarak kabul edilir. DNS gibi tüm türbülans tayfında yer alan akış yapılarının çözümü yerine sadece enerjinin büyük bölümünden sorumlu yapılarının çözümüne, geriye kalan çözülmeyen ve Kolmogorov Hipotezi'ne göre benzer veya izotropik olarak tanımlanan bu yapıların ise modellenmesi ilkesine dayalıdır. Dolayısı ile LES, doğru ağ yapısı seçildiğinde DNS'in ihtiyaç duyduğu kadar ağ yapısı gerektirmemekte ve RANS modellerinden ise daha doğru sonuçlar vermektedir. Elbette bunun için LES'in ihtiyaç duyduğu ağ çözünürlüğünün uygulanması ve doğru zaman adımı büyüklüğünün tespit edilmesi gerekir. Bu yapıldığı zaman LES,

deneysel veri yokluğunda başvurulacak önemli referans araçlarından biri olabilir. Bunun için geliştirilen algoritmanın detayları 2.1'de verilmiş ve daha kolay anlaşılması için algoritma bir özet halinde Tablo 1'de sunulmuştur.

2.1. Algoritma (Algorithm)

2.1.1. Adım 1 (Step 1)

Öncelikle eldeki akış problemi için çözüme bir RANS modeli ile başlanmalıdır. Türbülans kinetik enerji k ve türbülans kinetik enerji kaybolma oranı ε parametrelerini hesaplamak için, k - ε ya da k - ω modeli tercih edilebilir. Bu çözüm için kullanılacak ağ, makul sürede çözüm sunabilecek seyrek tipte bir ağ olabilir. Probleme başlamadan önce tahmini olarak y^+ hesabı yapılmalıdır. Bu çalışmada y^+ hesabı için öncelikle $Re=DU_b/\nu$ ile Reynolds sayısı (U_b ortalama hız, D kare kesiti ve ν ise kinematik viskozitedir), sonrasında ise duvar sürtünme katsayısı C_f hesaplanmalıdır. Bu katsayı için Schlichting [24] yaklaşımı olan $C_f = [2\log_{10}(Re)-0,65]^{-2,3}$ eşitliği kullanılmıştır. C_f hesabını takiben duvar kayma gerilmesi $\tau_w=0,5 C_f \rho U_b$, τ_w hesabını takiben sürtünme hızı u_τ ve son olarak da $y^+ = u_\tau y/\nu$ hesabı yapılarak tahmin gerçekleştirilir (y duvara en yakın hücrenin duvarla arasındaki mesafe). Yüksek Reynolds sayılarındaki akışlarda duvara komşu ilk hücre yüksekliğinin $30 < y^+ < 300$ olması, düşük Reynolds sayılarındaki akışlarda ise $y^+ < 5$ olması sağlanmalıdır. RANS ile yapılan ilk çözümde ana akıştaki muhtemel değişimlerin (hızlanma, yavaşlama, girdap oluşumu, akış ayrılması, akış tutunması gibi) gerçekleştiğinden emin olunduktan sonra Adım 2'ye geçilir. Aksi halde sınır şartları ve sayısal yöntemleri için kontroller yapıldıktan sonra ağ tekrar oluşturulur veya ağ sıklaştırması yapılır.

2.1.2. Adım 2 (Step 2)

Yapılan RANS çözümü, dögüsel olarak izlenen akış parametrelerinin yüzdesel olarak 10^{-4} değerlerinin altında seyretmeye başladığı anda çözüm durdurulabilir. Bu çözümden elde edilecek k ve ε değerleri ile büyük ölçekli türbülans yapılarını boyutsal olarak karakterize eden İntegral Uzunluğu Ölçeği (L , Eş. 1), küçük ölçekli türbülanslı yapılarını boyutsal olarak karakterize eden Kolmogorov Uzunluk Ölçeği (η , Eş. 2) ve bu iki yapı arasında kalan Taylor Uzunluk Ölçeği'nin (λ , Eş. 3) hesaplanması gerekir. Pope [1]'a göre Taylor Uzunluk Ölçeğine sahip yapılar; L ve η arasında kalan Grid Türbülansı'nı tanımlamakta kullanılan küçük türbülanslı yapıları karakterize etmektedir. Bu ölçekleri matematiksel olarak formülize eden eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$L = 0,09 \frac{k^{1/2}}{\varepsilon} \quad (1)$$

Tablo1. Algoritma Özeti (Summary of Algorithm)

Adım	İşlem
1	RANS ile çözüme başla. Ana akıştaki temel akış fiziği gerçekleşti ise 2. Adıma geç, değil ise akış modeli (sınır şartları, sayısal yöntem ...vs) kontrol edildikten sonra ağ çözünürlüğü artırıp 1. Adıma dön.
2	Türbülans yapılarını karakterize eden İntegral Uzunluğu Ölçeği, Kolmogorov Uzunluk Ölçeği, Taylor Uzunluk Ölçeği ve filtreyi hesapla. 3. Adıma geç.
3	2. Adımda hesaplanan türbülans yapılarını karakterize eden ölçekleri karşılaştır.
4	Filtrenin, İntegral Uzunluğu Ölçeği ve Kolmogorov Uzunluk Ölçeği arasında olma şartını kontrol et. Şart sağlanıyorsa 5. Adıma geç, sağlanmıyorsa şartı sağlayacak ağı tekrar oluştur veya filtre, Taylor Uzunluk Ölçeğine gelene kadar ağı sıklaştır.
5	İntegral Zaman Ölçeği, Kolmogorov Zaman Ölçeği ve Taylor Zaman Ölçeğini hesapla. 6. Adıma geç.
6	LES için seçilecek zaman adımı büyüklüğünün İntegral Zaman Ölçeği ve Kolmogorov Zaman Ölçeği arasında olmasını sağla. Taylor Zaman Ölçeğine yakın bir büyüklük tercih et. LES çözümüne başla.

$$\eta = \left(\frac{v^3}{\varepsilon}\right)^{1/4} \quad (2)$$

$$\lambda = \left(10v\frac{k}{\varepsilon}\right)^{1/2} \quad (3)$$

Burada k türbülans kinetik enerji, ε türbülans kinetik enerji kaybolma oranı ve v ise kinematik viskozitedir. LES yönteminde filtrelenmiş Navier-Stokes eşitlikleri çözüldüğü için hücre boyutunun ve bu hücre boyutunun Eş. 1-3 arasında verilmiş olan boyutlarla karşılaştırıldığında nerede olduğunun tespiti gerekir. Birçok akış çözücülerinde uygulanan filtre aslında ağ hücresinin kendisi olup literatürde "Implicit Filtering" şeklinde ifade edilmektedir. Ağ hücresi ise tanımlanan filtre ise hücre hacminin (V) küp kökü şeklinde tanımlanabilir.

$$\Delta = V^{1/3} \quad (4)$$

2.1.3. Adım 3 (Step 3)

Sonuçta LES'nin teorisi gereği filtrenin türbülans kinetik enerji tayfındaki geçiş bölgesinde yer alması gerektiğinden,

$$\eta < \Delta < L \quad (5)$$

olmalıdır. Bu anlamda filtre Δ ve Taylor Uzunluk Ölçeği λ karşılaştırılabilir boyutlarda olup $\Delta \approx \lambda$ yaklaşımında bulunabilir.

2.1.4. Adım 4 (Step 4)

Oluşturulan ağ Adım 3'teki Eş. 5 şartını sağlamaz ise, Eş. 1-4'ten elde edilen bilgiler sayesinde:

- a. Ağ, filtre Taylor Uzunluk Ölçeği boyutlarına gelinceye kadar sıklaştırılmalı,
- b. Veya bu şartı sağlayacak şekilde ağ tekrar oluşturulmalıdır.

Böylelikle belirli bir akış problemi için uygun bir LES ağ çözünürlüğünün ne olacağı LES koşturulmadan hesaplanmış olur.

2.1.5. Adım 5 (Step 5)

Boyutsal olarak uygun ağın tespitinden sonra uygun zaman adımı büyüklüğünün hesaplanması gerekir. Bunun için Adım 2'de tanımlanmış olan ifadelerin zamansal olarak dönüşümü gerekir. Bu anlamda RANS modelleri çözümden elde edilen k ve ε değerleri ile büyük türbülanslı yapılarını zamansal olarak karakterize eden İntegral Zaman Ölçeği'nin (T) Eş. 6 ile, küçük türbülanslı yapılarını zamansal olarak karakterize eden Kolmogorov Zaman Ölçeği'nin (τ) Eş. 7 ile ve bu iki ölçeğin arasında kalan Taylor Zaman Ölçeği'nin (λ_t) Eş. 8 ile hesaplanması gerekir.

$$T = \frac{k}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$\tau = \left(\frac{v}{\varepsilon}\right)^{1/2} \quad (7)$$

$$\lambda_t = \left(15\frac{v}{\varepsilon}\right)^{1/2} \quad (8)$$

2.1.6. Adım 6 (Step 6)

Eş. 5'e benzer şekilde LES çözümü için tespit edilecek zaman adımı büyüklüğü Δt , olmalıdır.

$$\tau < \Delta t < T \quad (9)$$

Dolayısı ile uzunluk ölçeklerinden olduğu gibi benzer bir şekilde $\Delta t \approx \lambda_t$ yaklaşımında bulunulabilir. Yalnız burada akış probleminin yapısı ve oluşturulan hücrelerin boyutlarına göre birçok zaman ölçeği mevcuttur. Zamana bağlı HAD analizleri her hücre için tek bir zaman adımı değeri ile koşturulduğundan, uygun zaman adımı için tüm ağ hücrelerindeki en düşük değer veya bu değere yakın bir değer seçilmelidir. Eğer çözücü kararlılığını etkileyen bir değer söz konusu ise kararlılığı sağlayacak düzeyde Δt düşürülmelidir.

DeneySEL verilere alternatif olacak bir LES çözümü için uygun ağın (Adım 4) ve bu ağa uygun zaman adımı büyüklüğünün (Adım 6) nasıl hesaplanacağı ifade edilmiştir. LES yöntemi, ağa bağlı bir yöntem olduğundan esasen ağdan bağımsız çözüm beklemek pek de mümkün değildir. Ağ çözünürlüğünün artması ile birlikte çözülen ölçekler artacak ve çözülmeyen (alt ağ ölçekler) ise azalacaktır. Bu da LES modelleme hataların azalması anlamına gelmektedir. Dolayısı ise aslında çözünürlük artışı, çözümün bir nevi RLES'e (Refined Large Eddy Simulation) ve DNS'e yaklaştığını göstermektedir. Bu da, mevcut çalışma ile önerilen pratik uygulamadan uzaklaşılacağı anlamına gelecektir. Bu sebepten Adım 4 ve Adım 6'daki ölçeklerin sağlanması LES ağı ve çözümü için yeterli olacaktır.

2.2. Türbülans Modelleri (Turbulence Models)

LES, büyük ölçekleri çözmeye ve küçük ölçekleri modellemeye dayanan türbülanslı akışları sayısal olarak analiz etmeye yarayan bir tekniktir. Bunu yapabilmek için büyük ölçekleri küçük olanlardan ayırmak gerekir. Ayırma işlemi için bir filtreleme işlemine ihtiyaç vardır. Sıkıştırılamaz türbülanslı akış için tensör notasyonundaki filtrelenmiş süreklilik ve Navier-Stokes Eş. 10 ve Eş. 11 şeklinde yazılabilir.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}^{sgs}}{\partial x_j} \quad (11)$$

Buradaki u_i ve p ile ifade edilenler filtrelenmiş hız bileşenleri ve basıncıdır. ρ yoğunluk ve ν ise kinematik viskozitedir. Eş. 11'in sağ tarafındaki son terim, modellenmesi gereken alt ağ ölçeği (SGS) gerilmelerini temsil eder. SGS gerilme tensörü, Bousinesq yaklaşımına dayalı modellenmiştir. Buna göre Eş. 12 şeklinde yazılır.

$$\tau_{ij}^{sgs} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk}^{sgs} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} \quad (12)$$

Burada δ_{ij} Kronecker-delta, S_{ij} çözülmüş ölçekteki gerilme oranı tensörü ν_t ise SGS eddy viskozitesini göstermektedir. Bu çalışmada eddy viskozitesini, dolayısı ile de küçük ölçekli eddyleri modellemek için Nicoud ve Ducros [25] tarafından önerilen Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity (WALE) modeli kullanılmıştır.

RANS türbülans modelleri temelde LES'teki eşitliklerle aynı yapıda olup türbülanslı parametrelerin ortalama ve salınım bileşenlerinin toplamı ile oluştuğu ilkesine dayanmaktadır. Salınımların karesininin toplamı türbülans kinetik enerjisi olarak, salınımların birbirleri ile ikişerli çarpımı ise türbülans veya Reynolds gerilmeleri olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada algoritmadaki eşitliklerde yer alan türbülans kinetik enerji ve türbülans kinetik enerji kaybolma oranı değerlerini bulmak için süreklilik ve Navier-Stokes eşitlikleri haricinde bu değer için tanımlanmış transport eşitliklerini çözen standart k - ε türbülans modeli [15] ve türbülans gerilmeler için

tanımlanmış transport eşitliklerini çözen Reynolds Gerilme Modeli [14] kullanılmıştır.

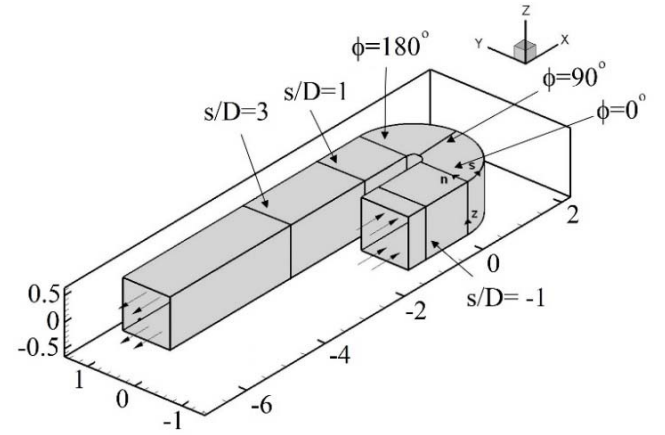
2.3. Akış Modellemesi ve Sınır Koşulları (Flow Models and Boundary Conditions)

Bu çalışmada sunulan öneri için doğrulama çalışması kapsamında yüksek ters basınç gradyanına maruz kalarak akış ayrılmasının önemli düzeyde olduğu türbülanslı bir iç akış örneği olan kare kesitli U-kanalı seçilmiştir. Akışın iç bükey ve dış bükey yüzeylerde hızlanması ve yavaşlaması, Reynolds sayısının yüksek olması, akış ayrılması ve tekrar tutunması, ana akış şiddetinde ikincil akışların meydana gelmesi, akışın tekrar tutunması, türbülansın ise akıştaki meydana gelen bu olaylar paralelinde önemli değişikliğe uğraması U-kanalı içerisindeki akışı önemli bir test çalışması haline getirmiştir. Bu minvalde farklı birçok konuda U-kanalı akışı çalışılmıştır ve halen de bu çalışmalar devam etmektedir. Son yıllardaki çalışmalara bakıldığında bir Belçika ekibinin öncelikli olarak U-kanalında LES ve RANS çalıştığı [26] daha sonrasında ise bu çalışmalar ekseninde adjoint şekil optimizasyonu çalıştığı görülmüştür [27]. Çin ekibi Bao vd. [28], U-kanal akışını jeotermal enerjiden en uygun şekilde faydalanma amacı ile sayısal olarak çözmüşlerdir. Güney Afrika'dan Jatau ve Bello-Ochende [29] ise U-kanalı ısı eşanjöründe sayısal analiz yürüterek entropi üretimine bakmışlardır. Hindistan ve İtalya ortaklığında katalizör yerleşiminin ve katı termal iletkenliğin U-kanalı şeklinde bir mikro yatacının stabilitesi üzerindeki birleşik etkisi, HAD kullanılarak önceden karıştırılmış propan/hava yanması için araştırılmıştır [30]. Patel vd. [31] kurşun-lityum sıvı metali için bir U-kanalında 3 boyutlu manyetohidrokinamik akış analizi yapmışlardır. Yine Çin'den başka bir ekip U-kanalında parçacık birikimi üzerine sayısal çalışma yürütmüşlerdir [32].

Farklı ülkelerde çeşitli amaçlarla HAD ve özellikle son yıllarda LES analizleri gerçekleştirilen U-kanalındaki akış probleminin geometrik temsili Şekil 1'de göstermektedir. Özellikle gaz türbinli motorların türbin kademesindeki yüksek sıcaklığa maruz kalan kanatların soğutulmasında bu tür kanallar ve türevleri kullanılmaktadır. Bu kapsamda en çok atıf alan çalışmalardan bazıları Cheah vd. [33], Lin vd. [34] ve Iacovides vd. [35] tarafından yapılmıştır. Lazer Doppler Anemometre ile deneysel çalışması Cheah vd. [33] tarafından yapılmış olan U-kanalının kavis oranı $R_c/D=0,65$ olup D kare kesitin bir kenarı, R_c ise kavislik yarıçapıdır. Kare kenarlı D ve kesit-ortalama hızı (U_b) bağlı Reynolds sayısı ise $Re=DU_b/\nu=10^{5^*}$ 'dir. Giriş ve çıkış sınır lokasyonları dönüşün başlangıcından $1,5 D$ mesafe geride ve dönüşün bitiminden $6 D$ mesafe ileride bulunmaktadır. Akış gelişmekte olduğu için kare kesitli uzun bir kanal için öncül bir çalışma yapılmış olup $-1,5 D$ lokasyonundaki deneysel hız verilerine uyumlu olacak şekilde sınır şartı çıkarılmış ve Şekil 1'deki U-kanal girişine aktarılmıştır. Dolayısı ile giriş bölgesine akış için ne üniform ne de UDF (User Defined Function-Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon) ile tam gelişmiş bir girdi yapılmıştır. Yapılan öncül çalışma ile Şekil 6 ve Şekil 7'de $s/D=-1$ bölgesinde açıkça görüleceği üzere girişteki deneysel hız bileşenleri tam olarak tutturulmuştur. Türbülanslı akışlarda, zamana bağlı akış sınır koşulları LES için oldukça önemlidir. Son zamanlarda harcanan büyük çabalara rağmen, evrensel olarak kabul edilmiş bir giriş koşulu reçetesi hala mevcut değildir. Bu çalışmada, Sergent [36] tarafından önerilen girdap yöntemi benimsenmiştir. Bu yaklaşımla, salınımlar dalgalı bir girdap alanı (yani, akış yönüne dik düzlemde iki boyutlu) aracılığıyla belirli bir ortalama hız profiline eklenir. Bu girdap alanı rastgele oluşturulur, ancak girdaplığın 2 boyutlu eşitliği Lagrange formuna ve Biot-Savart yasasına dayanır. Girdap parçacık boyutu bir uzunluk ölçeği biçimi olarak hesaplanır ve her zaman çözümlenen ölçeklere ait olmasını sağlamak için yerel hücre ölçeğiyle sınırlandırılır. Bu uygulamanın neticesi olarak Şekil 8 ve Şekil 9'dan da görüleceği üzere $s/D=-1$ bölgesinde ana akış yönündeki hız salınımlardan ziyade ana akışa dik

yöndeki hız salınımları daha fazla etkilenmiştir. Deneysel verilere göre düşük seyreden ana akış yönündeki hız salınımlar daha sonra, akıştaki doğrusal olmayan etkileşimler sayesinde kısa sürede artmış ve kanal boyunca ilerledikçe deneysel verilere uyum daha çok sağlanmıştır. Çıkışta, tüm akış değişkenleri için sıfır akıyla ve genel bir kütle dengesi düzeltmesiyle sonuçlanan çıkış sınır koşulu tanımlanmıştır. İç, dış ve yan duvarlara kaymama sınır koşulları, türbülanslı sınır tabaka için standart duvar fonksiyonları tanımlanmıştır.

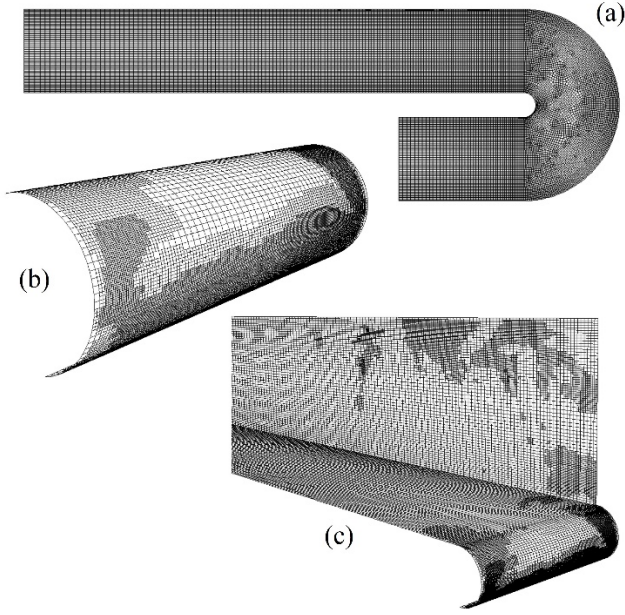
Kanal dönüşlerinin iç kısmında ve dönüş sonrası yapılan hücre artışları ile birlikte tüm geometri için Şekil 2'de bazı örnekleri görülen ağda yaklaşık 1,1 milyon hücre kullanılmıştır. Ağ iyileştirilmesi olmayan yaklaşık 1 milyon hücreden oluşan ilk ağ için yapılan önceki bir analiz, ayrılma yerine ($\phi \approx 90^\circ$) iç duvarın yakınında tamamen tutunmuş akış davranışıyla sonuçlanmıştır. İlk ağda, standart duvar fonksiyonlarının yeterli olmadığı yüksek hız gradyanları nedeniyle yüksek y^+ değerleri ortaya çıkmıştır. y^+ değerlerini azaltmak için, yüksek yüzey gerilmesi bölgesinin yakınlarında kartezyen ağ (cartesian mesh) veya asılı düğüm ağı (hanging node mesh) adı verilen ağ sıklaştırma yöntemi kullanılmıştır. Mevcut teknikle, etki alanındaki seçilen hücreler her eksende ikiye bölünerek toplamda sekiz kat artışa neden olur. Dönüşte iç duvarının bazı kısımlarında, y^+ değerlerini duvar yasası bölgesine getirmek için iki seviye iyileştirme yapılmıştır (bkz. Şekil 2(b)). İyileştirmeden sonra, duvarlardaki toplam ağ yüzlerinin % 80'i için y^+ değerleri 35'in altına düşmüştür. Toplam bölgenin sadece % 5'i 50'den büyük y^+ değerleri kullanırken, akış alanında herhangi bir yerde 70'in üzerinde y^+ değeri bulunmamaktadır. Bu dağılım, dönüşlerde iç duvarda akış davranışının gerçekçiliğinde önemli bir rol oynamıştır. Ayırma bölgesinde, y^+ değerleri 30 ile sınırlı tutulmuştur.



Şekil 1. U-kanalının geometrik görünümü
(Geometric view of the U-duct)

Bu çalışmadan LES'te filtrelenmiş eşitliklerin sayısal çözülmesi, yapılandırılmamış bir ağ algoritması ile sonlu hacim yöntemine göre yapılmıştır. Tüm hesaplamalarda, konveksiyon terimi için, genellikle saf bir merkezi farklar yöntemi seçildiğinde ortaya çıkan fiziksel olmayan salınımları ortadan kaldırmak için Leonard [37] tarafından geliştirilen sınırlı bir merkezi farklar yöntemi kullanılmıştır. Zamansal ayrıklaştırma için ikinci dereceden kapalı bir yöntem uygulanmıştır. Hız-basınç akuplesi için PISO algoritması [38] ve basınç interpolasyonu için [39] PRESTO yöntemi kullanılmıştır. LES uygulaması ile ilgili ek bilgiler Kojlat'ın [40] çalışmasında bulunabilir. RANS yöntemlerinde ise tüm çözümler tüm eşitliklerdeki konveksiyon terimleri ve basınç interpolasyonu için akışa karşı ikinci dereceden ayrıştırma tercih edilmiştir. Hız-basınç akuplesi için SIMPLE algoritması yeterli olmuştur. Tüm bu yöntemler

ANSYS/Fluent çok amaçlı akış çözücüsüne tanımlanmış ve analizler ona göre yapılmıştır.



Şekil 2. U-kanalı akışı için kartezyen ağ uygulaması (a) Simetri yüzeyi $z/D = 0$ (b) Dönüşteki iç duvar (c) Dönüş sonrası $\phi > 180^\circ$ iç duvarı takip eden alt duvar ve yan duvar (Cartesian mesh application for U-duct flow (a) Symmetry plane $z/D = 0$ (b) Inner wall in bend (c) Bottom wall and side wall following $\phi > 180^\circ$ after bend)

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussion)

Bu kısımda önerilen yöntemin uygulanması ve doğrulanması için seçilen U-kanalı içerisindeki türbülanslı akışın sonuçları algoritmaya uygun olarak adımlar özelinde gösterilmiş ve tartışılmıştır.

3.1. Algoritma Çıktıları (Algorithm Outputs)

3.1.1. Adım 1 çıktıları (Step 1 outputs)

Deneysel koşullara göre U-kanalı içerisinde akışın izotermal ve sıkıştırılmaz yapıda olduğu söylenebilir. Reynolds sayısı 10^5 seviyesinde olduğundan akışın çözümü tercih edilen $k-\epsilon$ türbülans modeli yüksek Reynolds sayısına uygun bir modeldir. Bu yüzden akışın dönüşten önceki bölümü için ($s/D < 0$) duvara yakın ilk hücrenin duvar yasına uygun bir şekilde $30 < y^+ < 300$ olmasına dikkat edilmiştir. Akışın dönüşle birlikte hızlanması ve buna bağlı olarak y^+ değerlerinin daha yükseleceği düşünüldüğü için dönüş öncesi duvarlarda $y^+ \approx 30$ değerlerine yakın ilk hücre boyutları sınır tabaka teorisine göre hesaplanmıştır. Bu boyutlar yaklaşık olarak 0,5 %-1% D arasında değişmektedir. Kare kesit için 50×50 , kanal içinse 400 hücre tercih edilmiş olup 10^6 hücre sayısına ulaşılmıştır. Bu ağ çözünürlüğü için ilk $k-\epsilon$ çözümünde dönüşteki akışın ayrıldığı gibi y^+ değerlerinin de 300 ve üzerine çıktığı görülmüştür. Dolayısı ile Adım 1’de önerildiği gibi ağ sıklaştırma yoluna gidilmiştir. Detaylar bir önceki bölümde anlatılmıştır.

3.1.2. Adım 2 çıktıları (Step 2 outputs)

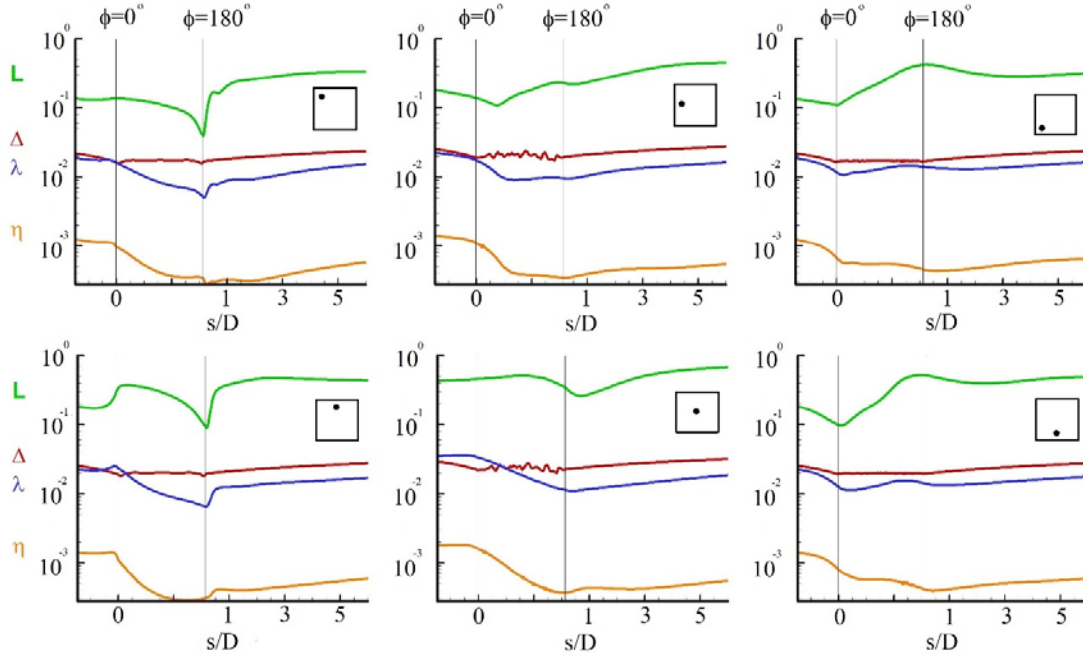
Hücre artışı asgari düzeyde tutulacak şekilde % 10’luk bir artış gerçekleşmiş ve toplam hücre sayısı $1,1 \times 10^6$ civarına getirilmiştir. Böylece y^+ değerleri ciddi anlamda düşmüş ve kanal dönüşünün iç

kısımında akışın olması gerektiği gibi ayrıldığı görülmüştür. Analiz sonrası İntegral Uzunluğu Ölçeği L , Kolmogorov Uzunluk Ölçeği η , Taylor Uzunluk Ölçeği λ ve filtre Δ hesaplanmış olup birbirlerine göre logaritmik y-ekseninde karşılaştırmaları Şekil 3’teki gibi gösterilmiştir. Bu şekilde altı adet grafik görülmektedir. Uzunluk ölçekleri U-kanalı boyunca kare kesitin köşelerinde ve orta kısımlarda gösterilmiştir. Geometri $z=0$ ’a göre simetrik olduğu için 9 noktasal bölge yerine 6 noktasal bölge ölçeklerin değişimini kanal boyunca anlamak için yeterli olmuştur. Bilindiği üzere İntegral Uzunluğu Ölçeği L geometrik boyutlarla karşılaştırılabilir düzeyde olmalıdır, bu bağlamda olması gerektiği gibi L , tüm bölgelerde D ’den daha küçük çıkmıştır. Değişim ise yaklaşık olarak 0,6 D ile 0,05 D arasında olmaktadır. İç, yan ve dış duvar bölgelerinde kendi içerisinde benzer bir değişim görülmektedir. Bu değişim sadece İntegral Uzunluğu Ölçeği L ’de değil, Kolmogorov Uzunluk Ölçeği η , Taylor Uzunluk Ölçeği λ ve Filtre Δ ölçeklerinde de göze çarpmaktadır. Kolmogorov Uzunluk Ölçeği ise tüm bölgede benzer bir değişim izlemektedir. Buna göre 0,001 D civarında başlayıp dönüş içerisinde ($0^\circ < \phi < 180^\circ$) düzenli olarak azalmakta ve 0,0002 D değerine kadar düşmektedir. Dönüş sonrası ($s/D > 0$) ise düzenli ve hafif bir artış meyillinde olduğu görülmektedir. DNS çalışmalarında tüm ölçeklerin çözülmesi gerektiğinden bu çalışmada η için hesaplanan değer için ölçeğin 0,001 D olduğu varsayımı ile oluşturulan ağ sayısının 10 kat kadar artırılması gerekir. Dolayısı ile bu çalışmadan LES yerine DNS yapılmak istenmesi durumunda en az 100 milyon hücre sayısına ulaşılması gerekecekti. Özetle, Şekil 3’te verilen İntegral Uzunluğu Ölçeği ve Kolmogorov Uzunluk Ölçeği değişimleri türbülans akış teorisine göre beklenildiği ölçüde çıkmıştır.

3.1.3. Adım 3 çıktıları (Step 3 outputs)

LES için ağ hücre boyutunun yeterli olup olmadığını bu ölçeklerinin boyutunun yanı sıra Taylor Uzunluk Ölçeği λ ve hücre boyutunu karakterize eden filtreyi Δ karşılaştırarak anlayabiliriz. Filtrenin kanal boyunca tüm grafiklerde görüldüğü üzere çok fazla değişmediği, dönüş öncesi ve dönüş boyunca nerdeyse sabit kaldığı, dönüş sonrası ise ana akış yönündeki hücreler arası uzaklığın artırılmasından kaynaklı hafif düzeyde bir artış görülmektedir. Taylor Uzunluk Ölçeği ise değişim olarak Kolmogorov Uzunluk Ölçeğine benzemektedir. Dönüş öncesi bazı bölgelerde, filtreden bile daha büyük olan Taylor Uzunluk Ölçeği dönüş ile birlikte hızlıca düşmekte olup dönüş sonrası ise düzenli bir şekilde yükselmiştir. Dönüş ve sonrasında tüm bölgelerde filtreden daha düşük olduğu, filtre ile farklılığın dönüş sonrası en fazla iç bölgelerde görüldüğü, bu farklılığın da 0,01 D civarında olduğu hesaplanmıştır. Şekil 3 genel olarak değerlendirildiğinde Taylor Uzunluk Ölçeği ve filtrenin karşılaştırılabilir büyüklükte olduğu, İntegral Uzunluğu Ölçeği L ve Kolmogorov Uzunluk Ölçeği η değerlerinden ise oldukça uzak olduğu görülmüş olup ağ çözünürlüğünün LES için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Şekil 3’te ölçeklerin noktasal bölgelerdeki kanal boyunca değişimi gösterilmiştir. Şekil 4’te ve Şekil 5’te ise $k-\epsilon$ ve RSM türbülans modellerinden elde edilen İntegral Uzunluğu Ölçeği L ile Taylor Uzunluk Ölçeği λ değerlerinin filtre değerine oranı, U-kanalı boyunca $z/D=0$ ve $z/D=0,375$ düzlemlerinde eş bölgeler şeklinde gösterilmiştir. Şekil 4’te gösterilen L/Δ eş bölgelerine bakıldığında zaman $k-\epsilon$ modeli ile bu oranın $z/D=0$ düzleminde genel olarak 15 ve yukarısı olarak hesaplandığı, iç ve dış duvarlara yaklaşıldığında ise bu oranın düştüğü, iç bölgedeki akış ayrılması ile birlikte bu oranın 7-8 ve aşağısına indiği görülmektedir. $z/D=0,375$ düzleminde ise yan duvarlara yaklaşmanın neden olduğu 3-boyutlu etki ile bu değerlerin dönüş öncesi ve $\phi < 90^\circ$ bölgesine kadar azaldığı fark edilmiştir. Aynı eş bölgelerin RSM modeli ile değişimine bakıldığında genelde $k-\epsilon$ modeli ile benzer sonuçlar elde edildiği, fakat akış ayrılmasının RSM



Şekil 3. k-ε türbülans modeline göre karakteristik ölççeklerin kanal boyunca değişimi

(L: İntegral Uzunluk Ölçeği, Δ: filtre, λ: Taylor Uzunluk Ölçeği λ: Kolmogorov Uzunluk Ölçeği; kanal kesitindeki sağ ve sol çizgiler yan duvarları, üst ve alt çizgiler sırası ile iç ve dışarı duvarı göstermektedir)

(Variation of characteristic scales along the duct according to the k-ε turbulence model (L: Integral Length Scale, Δ: filter, λ: Taylor Length Scale η: Kolmogorov Length Scale; The right and left lines of the square show the side walls, the top and bottom lines show the inner and outer walls, respectively.))

modeli ile daha uzun hesaplandığı ve bundan kaynaklı değerlerin k-ε türbülans modeline kıyasla düştüğü görülmüştür. $z/D=0,375$ düzleminde ise yan duvarların etkisi ile oranın azaldığı fakat dönüşteki ve sonrasındaki iç duvar bölgesinde ise bu değer nispeten arttığı görülmüştür. Sonuç olarak her iki modelde de kanalın genelinde filtrenin İntegral Uzunluğu Ölçeğinden beklenildiği ölçüde küçük olduğu görülmüştür. Diğer taraftan sayısal hücre boyutlarının oldukça düşürülmesine rağmen türbülansın daha güçlü olduğu duvar ve ayrılma bölgelerinde ise filtrenin İntegral Uzunluğu Ölçeğine yaklaştığı anlaşılmış olup filtre boyutundan emin olmak için Taylor Uzunluk Ölçeği ile karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 5'te bu karşılaştırma verilmektedir. λ/Δ eş bölgelerine bakıldığında her iki modelde de $z/D=0$ düzleminde dönüşün büyük bir kısmında, $z/D=0,375$ düzleminde ise dönüş kadar λ/Δ oranının 1 ve yukarısı olduğu görülür. İç ve dış duvara yakın ve dönüş sonrası kısımlara bakıldığında ise bu oran düşmekte ama kanal boyunca 0,4-0,5 aralığında değişmektedir. Dolayısı ile filtre, Taylor Uzunluk Ölçeği ile kıyaslanabilir durumda olmaktadır. Şekil 3'teki gösterimdeki sonucu destekler bir şekilde Şekil 4 ve Şekil 5'teki oran eş bölgeleri de mevcut tercih edilen ağın yeterli olduğunu işaret etmektedir.

3.1.4. Adım 4 çıktıları (Step 4 outputs)

U-kanalı akışı uygulaması için ağ çözünürlüğü yeterli düzeyde olduğundan bu çalışmada ağ sıklaştırması yapılmaya gereği duyulmamıştır. Fakat önerilen yöntemin doğrulanması için sayısal sonuçlar, mevcut deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve tartışılmıştır.

3.1.5. Adım 5 çıktıları (Step 5 outputs)

Deneysel verilerle uygun karşılaştırmalar yapabilmek için, Eş. 1 ve Eş. 2'deki anlık hız bileşenleri, her zaman adımında akış yönünde (s-ekseni), duvar-normal yönde (n-ekseni) ve yanal yöndeki (z-ekseni) hız bileşenlerine dönüştürülür. Dönüştürülmüş hızlara dayalı olarak 2216

türbülanslı akış istatistikleri toplanır. LES analizleri, 0,002'lik boyutsuz bir zaman adımı dahilinde yürütülmüştür ($t^*=t/(D/U_b)$). Boyutlu t zaman adımı, çözülen türbülanslı yapıların zaman ölçeğinden ($T=k/\varepsilon$) çok daha küçük ve küçük türbülanslı yapıların zaman ölçeğine yakın olacak şekilde seçilmiştir (Taylor Zaman Ölçeği, $(\lambda_t=15\nu/\varepsilon)^{1/2}$). İntegral Zaman Ölçeği (T), Taylor Zaman Ölçeği (λ) ve Kolmogorov Zaman Ölçeği'nin (τ) minimum değerleri, boyutsuz zaman birimleri cinsinden sırasıyla 0,252, 0,029 ve 0,0075 olarak bulunmuştur.

3.1.6. Adım 6 çıktıları (Step 6 outputs)

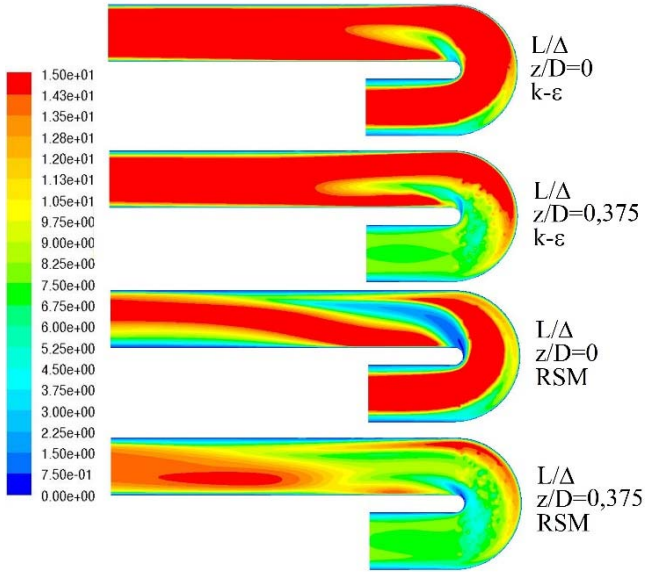
Seçilen boyutsuz zaman adımı, sıklaştırılmış ağ kullanımı nedeniyle Kolmogorov Zaman Ölçeğinden küçük çıkmıştır. Dolayısı ile geçilen zaman adımı LES için yeterli seviyededir. LES ve DNS gibi yöntemlerde fiziksel olarak zaman adımı dışında sayısal yöntemin kararlılığı da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışmada sayısal yöntemin gerektirdiği zaman adımı koşulları da gözetilmiştir. Süreklilik ve hız bileşenlerinin kalıntıları (residual) her zaman adımında 10^{-3} 'ten daha düşük tutulmuştur. Akış istatistiklerini tamamlamak için yaklaşık 20 000 zaman adımı gerçekleştirmiş olup bu sayı da yaklaşık olarak 3,75 Konvektif Akış Zamanına karşılık gelmektedir. Konvektif Akış Zamanı akışın girişten çıkışa kadarki alınan yolun ne kadar sürede alındığını gösteren bir tanımlamadır.

3.2. Doğrulama (Validation)

3.2.1. Ana akış yönündeki ortalama hız değişimleri (Streamwise mean velocity variations)

Bu çalışmada önerilen yöntemin doğrulanması için U-kanalı için mevcut deneysel veriler kullanılmıştır [32]. Bunun için $z/D=0$ düzleminde 9 farklı kesitte ana akış yönündeki ortalama hızın sayısal ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6'da gösterildiği

yapılmıştır. Akış, türbülanslı sınır tabakaya uygun bir şekilde dönüştürülmektedir ($s/D = -1$). Akış; dış bükey iç duvara yaklaştıkça hızlanmakta, iç bükey dış duvara yaklaştıkça ise yavaşlamaktadır ($\phi=0^\circ$). Bu durum dönüşün ilk çeyreğine geldikçe daha belirgin bir hale gelmektedir ($\phi=45^\circ$). Akış; dönüşün yarısına geldiğinde ($\phi=90^\circ$) iç duvar tarafında maksimum hıza ulaşırken, $n/D > 0,99$ bölgesinde hızı negatif olmaktadır ve ters akış gerçekleşmektedir. Dolayısı ile duvara çok yakın bölgede akışın ayrıldığı anlaşılmaktadır. Dönüşün yarısında, akış yönündeki hızın ayırma bölgesini deneysel ölçümlere göre daha ince hesapladığı görülmektedir. Bu da sayısal ayırmanın deneylerden sonra gerçekleştiğini işaret etmektedir. Fakat bu durum, ayırma bölgesinin detaylarının genel öngörülerini üzerinde olumsuz bir etkiye yol açmamaktadır. Dönüşle birlikte ters akış bölgesi $\phi = 135^\circ$ ve $\phi = 180^\circ$ kesitlerinden de görüldüğü gibi genişlemekte, ancak dönüş sonrası ters akış azalır ($s/D=1$) sonrasında kaybolmakta ($s/D=3$) ve tekrar üniform yapıya ulaşmaktadır ($s/D=5,9$). Dönüş çıkışına doğru LES verilerinin deneysel verilerle iyi bir uyum yakaladığı söylenebilir. Dönüş içerisindeki deneysel veriler ile görülen bazı uyumsuzlukların temel nedeninin ayırma bölgesinde gerçekleşen farklılıkların yansımalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, bu durumun özellikle dönüşün iç yarısı için hesaplanan dik yöndeki ortalama hız değişimleri ile yakından ilişkili olduğunu belirtmek gerekir. LES verilerine baktığımızda akışın dönüşle birlikte iç duvardaki hızlanmanın, dış duvardaki yavaşlamanın, dönüşün yarısındaki iç duvardaki akış ayrılmasının, ters akış oluşumunun ve gelişiminin doğru bir şekilde yakalandığı görülmektedir. Verilerin nicelik olarak uyumluluğunun ise yeterli düzeyde olduğu görülmektedir.

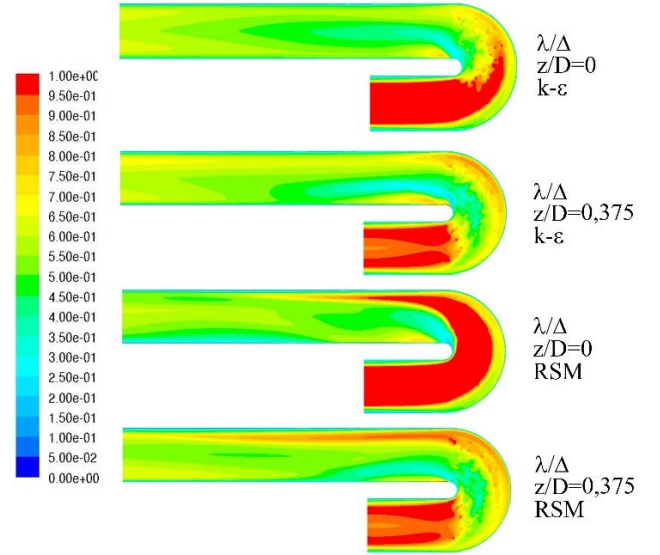


Şekil 4. k-ε ve RSM türbülans modellerine göre $z/D=0$ ve $z/D=0,375$ düzlemlerindeki L/Δ eş bölgeleri (L/Δ contours on the $z/D=0$ and $z/D=0,375$ planes for k-ε ve RSM turbulence models)

3.2.2. Ana akışın dik yönündeki ortalama hız değişimleri (Normalwise mean velocity variations)

Şekil 7’de ana akışa dik yöndeki ortalama hızın sayısal ve deneysel verilerin karşılaştırılması yapılmıştır. Ana akışa dik yöndeki hız değişimlerinin varlığı, akışta kayda değer düzeyde ikincil akışlar olduğu göstermektedir. Detayları bu bölümde açıklanan ikincil akışlar, U-kanalında özellikle dönüş bölgesinde ana akışa yön verme ve enerji transferi rolleri üstlenmektedir. Şekil 7.’de görülen pozitif

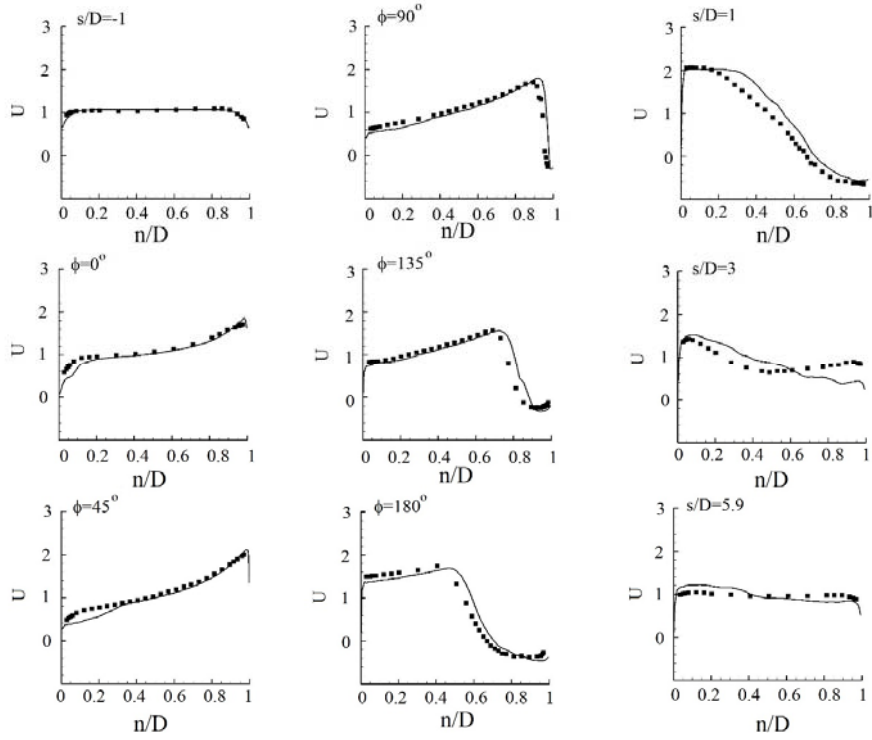
değerler akışın dış duvardan iç duvara doğru yöneldiğini, negatif değerler ise akışın tam tersi şekil aldığını ifade etmektedir. Ana akış, türbülanslı gelişen sınır tabaka dışında üniform bir çizgi ile dönüşe yaklaşıncan dik akış ise sıfır düzeyindedir ($s/D = -1$). Dönüşün ilk çeyreğine kadar dış duvar tarafında yavaşlayan akışta fark edilir düzeyde iç duvardan dış tarafa doğru yönlü dik akış oluşmuştur ($\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$). Dönüşün ortasında ise dik akış, ana akışla kıyaslanabilir büyüklüğe ulaşmıştır ($\phi=90^\circ$). Bu büyüklükteki bir dik akış, iç taraf bölgesinde hızlanan ana akışı kanalın iç bölgelerine doğru yönlendirmekte ve bu yönlendirme dönüşün sonuna kadar devam etmektedir ($\phi=180^\circ$). Bu bölgede ikincil akışın ana akışa önemli düzeyde yönlendirmede bulunduğu görülmektedir. Dik akışın yönlendirmesi ile açıklanabilecek diğer bir husus da ana akışta oluşan ters akıştaki bölgenin genişlemesidir. Dönüşe doğru dik akış aniden azalmış, buna paralel olarak ters akış da yavaş yavaş azalmakta ve gücünü kaybetmektedir. Dönüş sonrası giderek kaybolan dik akış ($s/D = 1$, $s/D = 3$), kanal sonuna ise sıfırlanmaktadır ($s/D=5,9$). LES verilerine baktığımızda dik akışın yön değiştirmeleri, büyüklüğü ve genel olarak iç duvardan dış duvara doğru eğilimi başarılı bir şekilde tutturulduğu görülmektedir. Dönüşün ikinci yarısında sayısal ve deneysel veri farklılıklarının ise ana akıştaki ayırma bölgesindeki farklılıkların bir sonucu olduğu yorumu yapılabilir.



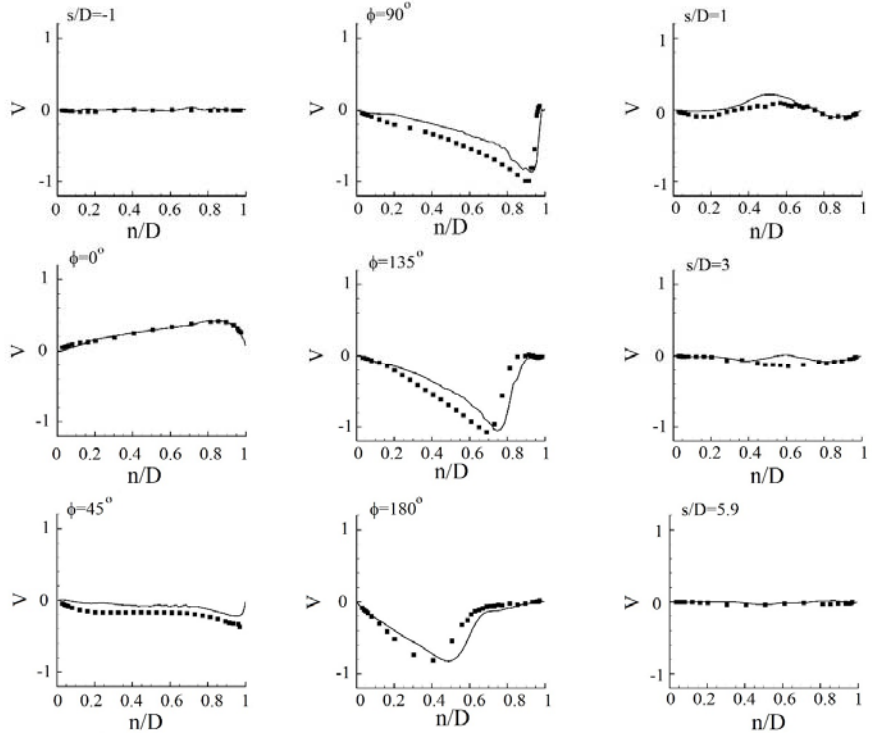
Şekil 5. k-ε ve RSM türbülans modellerine göre $z/D=0$ ve $z/D=0,375$ düzlemlerindeki λ/Δ eş bölgeleri (λ/Δ contours on the $z/D=0$ and $z/D=0,375$ planes for k-ε ve RSM turbulence models)

3.2.3. Türbülans gerilmesi değişimleri (Turbulent stress variations)

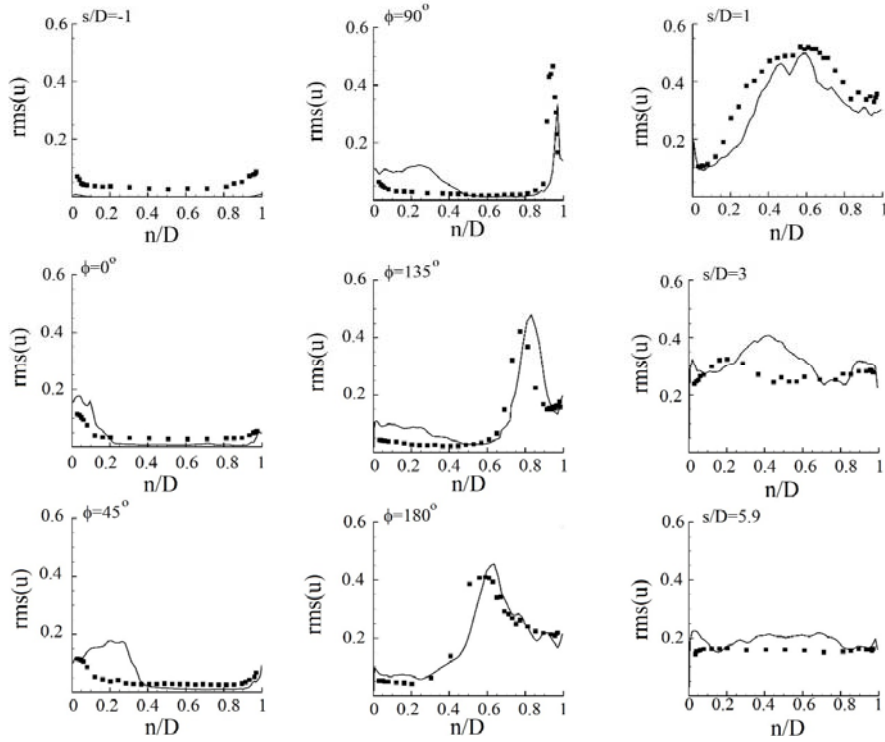
Türbülanslı bir akışta ortalama değerlerin yanı sıra türbülans veya Reynolds gerilmeleri diye adlandırılan değişimler de genellikle incelenir. İstatistik olarak bakıldığında Şekil 8 ve Şekil 9’da bu gerilmeleri karakterize eden hız salınımlarının karekök ortalamaları verilmiştir. Şekil 8’de $z/D=0$ düzleminde ana akış yönündeki hız salınımlarının karekök ortalamaları değişimleri gösterilmiştir. Kanal girişinde uygulanan LES giriş koşullarının deneysel verilere oranla daha düşük türbülans ürettiği, fakat dönüşe girişle birlikte özellikle iç ve dış duvara sonrasında ise türbülansın giderek azaldığı, iç ve dış duvar taraflarında aynı düzeye geldiği ama girişteki değere kıyasla yüksek olduğu görülmüştür ($s/D = 5,9$). Şekil 9’da $z/D=0$ düzleminde ana akışa dik yöndeki hız salınımlarının karekök ortalaması değişimleri gösterilmiştir. Ana akış salınımlarının aksine bu sefer girişte deneysel verilere yakın değerde türbülans üretildiği görülmüştür ($s/D = -1$).



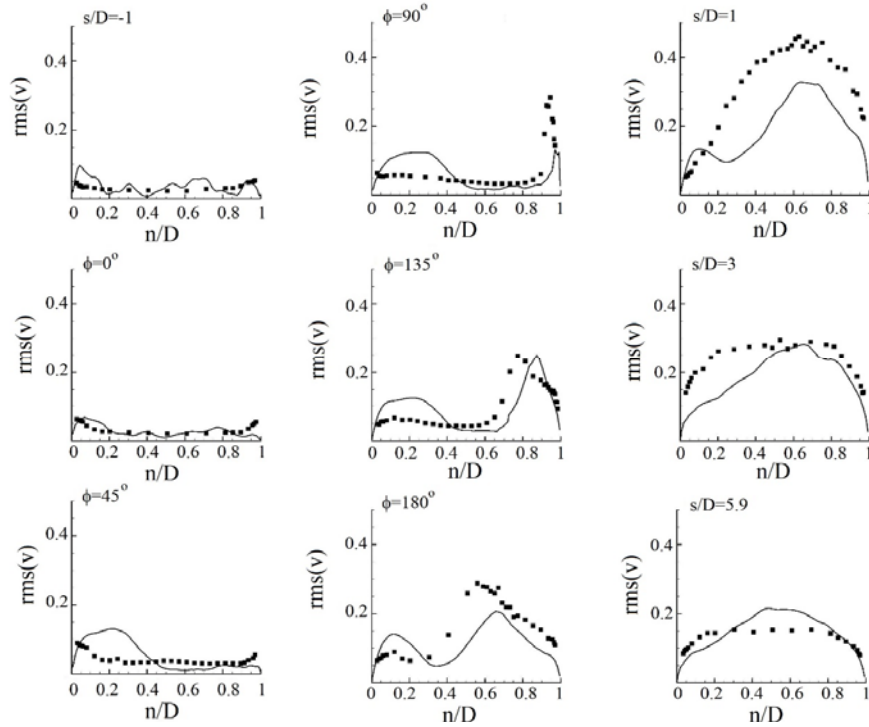
Şekil 6. Simetri düzlemindeki ($z/D=0$) ana akış yönündeki ortalama hız değişimleri (semboller deneysel verileri [32], çizgiler şimdiki çalışma sonuçlarını gösterir; $n/D=0$ dış duvar, $n/D=1$ ise iç duvardır)
 (Mean velocity variations in the main flow direction on the plane of symmetry ($z/D=0$) (symbols show experimental data [32], lines show current study results; $n/D=0$ is outer wall, whereas $n/D=1$ is inner wall)))



Şekil 7. Simetri düzlemindeki ($z/D=0$) ana akışa dik yöndeki ortalama hız değişimleri (semboller deneysel verileri [32], çizgiler şimdiki çalışma sonuçlarını gösterir; $n/D=0$ dış duvar, $n/D=1$ ise iç duvardır)
 (Mean velocity variations in the normal-wise direction on the plane of symmetry ($z/D=0$) (symbols show experimental data [32], lines show current study results; $n/D=0$ is outer wall, whereas $n/D=1$ is inner wall)))



Şekil 8. Simetri düzlemindeki ($z/D=0$) ana akış yönündeki hız salınıminin karekök ortalaması değişimleri (semboller deneysel verileri [32], çizgiler şimdiki çalışma sonuçlarını gösterir; $n/D=0$ dış duvar, $n/D=1$ ise iç duvardır)
 (Root mean square variations of the velocity fluctuations in the main flow direction on the plane of symmetry ($z/D=0$) (symbols show experimental data [32], lines show current study results; $n/D=0$ is outer wall, whereas $n/D=1$ is inner wall))



Şekil 9. Simetri düzlemindeki ($z/D=0$) ana akışa dik yöndeki hız salınıminin karekök ortalaması değişimleri (semboller deneysel verileri [32], çizgiler şimdiki çalışma sonuçlarını gösterir; $n/D=0$ dış duvar, $n/D=1$ ise iç duvardır)
 (Root mean square variations of the velocity fluctuations in the normal-wise direction on the plane of symmetry ($z/D=0$) (symbols show experimental data [32], lines show current study results; $n/D=0$ is outer wall, whereas $n/D=1$ is inner wall))

Dış duvara yakın tarafta ana akışın yavaşlaması ve buna paralel olarak ana akış hız salınımlarının yükseldiği görülmüştü. Benzer bir durum $\phi=0^\circ$ ve $\phi=45^\circ$ kesitlerinde de göze çarpmaktadır. LES salınımları ise bu salınım değişikliklerine Şekil 8'de olduğu gibi deneysel salınımlara oranla fazla çıkmıştır. Dönüşün yarısındaki iç duvar bölgesinde başlayan akış ayrılması ve buna bağlı olarak ana akıştaki salınımlara benzer oranda değişim ve eğilim Şekil 9'da da görülmektedir. LES salınımları ise bu değişime ve eğilime yeterli yanıt vermekle birlikte özellikle $s/D=1$ kesitinde ciddi farklılıklar göze çarpmaktadır. Fakat bilindiği üzere türbülanslı akışlarda ana akışa dik yöndeki salınımları sayısal olarak hesaplamak genellikle zordur, bu motivasyonla geliştirilen v^2-f gibi türbülans modelleri bulunmaktadır [40]. Genel olarak bu kapsamdaki LES ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında sonuçların olumlu olduğu ve önerilen yöntemin bu çerçevede doğrulamasının gerçekleştiği söylenebilir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada türbülanslı akışlarda deneysel veri yokluğunda veya deneysel veriye ihtiyaç duymadan LES çözümlerinin sonuçların doğruluğunun tespiti için İntegral, Kolmogorov ve Taylor Ölçekleri ile hücre boyutunu karakterize eden ölçeğin zamansal ve boyutsal karşılaştırmasını temel alan bir öneri getirilmiştir. Bu çalışmada sunulan öneri ile LES yapmadan ağ kalitesi hakkında fikir edinilmiş ve referans alınan bir akış problemi için mevcut deneysel veriler ile doğrulaması da yapılmıştır. Sunulan öneri ve doğrulama sonuçlarına göre:

- Türbülanslı akış için HAD analizi olarak LES'in kullanılması gerekmektedir.
- Önerinin uygulaması için akış fiziğinin zorluğundan U-kanalı seçilmiştir. Reynolds sayısı endüstriyel akış şartlarına yakın olarak 10^5 alınmıştır.
- LES için ağ çözünürlüğü tespiti gerekmektedir, onun için LES öncesi k ve ε değerlerini veren 2-eşitlik modeli koşturulmuştur.
- 2-eşitlik modeli sonucunda İntegral, Kolmogorov ve Taylor Ölçekleri hesaplanmıştır. Hücre boyutunu karakterize eden filtrenin Taylor Uzunluk Ölçeğine çok yakın olduğu görülmüştür. Dolayısı ise ağ çözünürlüğü yeterli bulunmuştur.
- Zaman ölçekleri içinse boyutsuz zaman adımının tüm ölçeklerden küçük bir değer seçilmiştir. Dolayısı ise ağ çözünürlüğü için seçilen adım da yeterli olmuştur.
- Doğrulama için deneysel verilerle yapılan karşılaştırmalarda; ana akış yönünde ve ana akışa dik yöndeki hızların doğru hesaplandığı, dolayısı ile önerinin birinci dereceden akış istatistiği parametrelerin tayini için yeterli olduğu görülmüştür.
- U-kanalında görülen iç duvardaki hızlanmanın, dış duvardaki yavaşlamanın, iç duvardaki akış ayrılmasının, ters akış oluşumunun ve gelişiminin doğru bir şekilde mevcut LES analizi yakalandığı görülmüştür.
- İkinci dereceden akış istatistiği parametreleri olan ana akış ve ana akışa dik yöndeki hız salınımlarının karekök ortalaması değerlerine bakıldığında sonuçların olumlu ve kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada çalışılan U-kanalı, akış fiziğinin birçok unsurunu taşımaktadır. Akış, öncelikle endüstriyel akış problemlerine yakın bir Reynolds sayısında çalışılmıştır. U-kanalı girerken dış bükey tarafında akış hızlanmakta, ama yüksek ters basınç gradyanına maruz kaldığı için ayrılmakta ve bu ayrılmayı izleyen yüksek türbülans bölgeleri oluşmaktadır. İç bükey tarafındaki sınır tabaka ile şekillenen yüksek kayma gerilmesi, ayrılma ile serbest kayma tabakasına dönüşmüş, ayrılma bölgesindeki türbülans hareketleri ile kararsız bir halde kanal içinde hareketine akış tekrar tutunana kadar devam etmiştir. Akış U-kanal içerisine girerken, dış bükey bölgede ise

kütlenin korunumu gerçekleşeceğinden iç bükey bölgedeki davranış aksine önemli bir yavaşlama gerçekleşmiştir. İç bükey taraftaki ayrılmanın yansımaları olarak akış dış bükey tarafta hızlanmaya başlamış olup U-kanal çıkışında ve sonrasında bu davranışa devam etmiştir. Kanal sonuna doğru ise iç ve dış bükey tarafındaki akış eşitlenmiş ve üniform yapıya yakın bir görünüme kavuşmuştur. Akışın 3 boyutlu olması ve yan yüzeylerin önemli düzeydeki etkileri paralelinde ikincil akışlar meydana gelmiş ve iç/dış bükey yüzeyler arasında enerji transferinde rol oynamıştır. Bu kadar kapsamlı ve farklı akış tiplerini barındıran U-kanalıdaki akış yapısını test olarak referans olan bu çalışmadaki deneysel veriler ile olan uyumun hakemin bahsettiği girdap oluşturmalar, akış düzenleyiciler veya akış önünde engeller olduğu durumlarda geçerli olacağı düşünülmektedir. Elbette her akış kendine ait birtakım yapıları bulundurmaktadır, fakat mevcut çalışma evrensel olarak kabul edilen türbülans parametreleri ve teorileri üzerinde kurulduğu için geçerliliğini diğer akış tiplerinde de sürdüreceği söylenebilir.

Neticede bu çalışmada sunulan LES çözünürlüğü önerisinin kolay uygulanabilir, pratik ve güvenilir olduğu bulunmuştur. Önerinin ısı transferi, çoklu fazlı akışlar, döngüsel akışlar, sıkıştırılabilir ve yanma içeren farklı akış problemleri için uygulama yönünde hazırlık çalışmaları devam etmektedir.

Kaynaklar (References)

1. Pope S. B., Turbulent Flows, Cambridge University Press, 2000.
2. Hinze J. O., Turbulence. An Introduction to Its Mechanism and Theory, McGraw Hill, 1959.
3. Orszag S., Analytical theories of turbulence, Journal of Fluid Mechanics, 41 (2), 363-386, 1970.
4. Karahan F.T., Er S., Güngör A.G., Düşük basınçlı türbin pali etrafındaki türbülanslı akışın Büyük girdap benzetimi ile incelenmesi, 20. Ulusal mekanik kongresi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 05 - 09 Eylül 2017.
5. Sert C., Sıkıştırma – Genişletme Rampasında Oluşan Şok Dalgası Sınır Tabaka Etkileşimlerinin Büyük Girdap Benzetimleri ile İncelenmesi. Çevrimiçi, <https://hdl.handle.net/11511/59029>, 2018.
6. Sert C., Yazıcıoğlu Y., Damarlardaki Daralmaların Oluşturduğu Akustik Yayılmının Büyük Girdap Benzetimleri ile İncelenmesi. Çevrimiçi, <https://hdl.handle.net/11511/59023>, 2018.
7. Coşgun F., Çadırcı S., Numerical Investigation of Unsteady Cavity Flow Aeroacoustics by Large Eddy Simulation. DEUFMD, 22 (64), 259-269, 2020.
8. Aköz M. S., Soydan N. G. & Şimşek, O., Kritik Üstü Açık Kanal Akımının Detached Eddy ve Large Eddy Simülasyon ile Sayısal Modellenmesi. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 4 (4), 213-224, 2016.
9. Eraslan H. & Ergin A., Kanat yunuslaması ve değişken kanatçık açılırlar sırasında oluşan büyük girdap oluşumlarının simülasyonu. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 4 (1), 61 – 75, 2009.
10. Yılmaz İ., Large Eddy Simulation of Turbulent Rayleigh-Bénard Convection: An Assessment of Subgrid-Scale Models., Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21 (2), 478-495, 2021.
11. Güngör E., Hydroacoustical investigation on an generic underwater vehicle using Lighthill-Curle, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (3), 1351-1364, 2019
12. Spalart P. R., Strategies for Turbulence Modelling and Simulation, International Journal of Heat and Fluid Flow, 21, 252-263, 2000.
13. Spalart P. R. & Allmaras S., A one-equation turbulence model for aerodynamic flows, Technical Report, AIAA-92-0439, AIAA, 1992.
14. Launder B. E., Reece G. J. & Rodi W., Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure, J. Fluid Mech., 68 (3), 537-566, 1975.
15. Launder B. E. & Spalding D. B., Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England, 1972.
16. Wilcox D. C., Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, Inc., La Canada, California, 1998.
17. Boudier G., Gicquel L.Y.M., Poinot T.J., Effects of mesh resolution on large eddy simulation of reacting flows in complex geometry combustors, Combustion and Flame, 155, 1–2, 196-214, 2008.

18. Gousseau P., Blocken B., van Heijst G.J.F., Quality assessment of Large-Eddy Simulation of wind flow around a high-rise building: Validation and solution verification, *Computers & Fluids*, 79, 120-133, 2013.
19. Wurps H., Steinfeld G., & Heinz S., Grid-Resolution Requirements for Large-Eddy Simulations of the Atmospheric Boundary Layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 175 (2), 179-201, 2020.
20. Khan N. B., Ibrahim Z., Badry A. B. B., Jameel M., & Javed M. F., Numerical investigation of flow around cylinder at Reynolds number=3900 with large eddy simulation technique: Effect of spanwise length and mesh resolution. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M-Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 233 (2), 417-427, 2019.
21. Rezaeiravesh S., & Liefvendahl M. Effect of grid resolution on large eddy simulation of wall-bounded turbulence. *Physics of Fluids*, 30(5), 2018.
22. Choi H., & Moin P., Grid-point requirements for large eddy simulation: Chapman's estimates revisited, *Physics of Fluids*, 24 (1), 2012.
23. Celik I. B., Cehreli Z. N. & Yavuz I., Index of Resolution Quality for Large Eddy Simulations, *ASME. J. Fluids Eng.* September, 127 (5), 949-958, 2005.
24. Schlichting, H., *Boundary Layer Theory*, ISBN 0-07-055334-3, 7th Edition, 1979.
25. Nicoud F. & Ducros F., Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor., *Flow, Turbul. Combust.*, 62 (3), 183-200, 1999.
26. Alessi G., Verstraete T., Koloszar L., & van Beeck J., Comparison of large eddy simulation and Reynolds-averaged Navier-Stokes evaluations with experimental tests on U-bend duct geometry, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part a-Journal of Power and Energy*, 234 (3), 315-322, 2020.
27. Alessi G., Verstraete T., Koloszar L., Blocken B., & van Beeck, J., Adjoint shape optimization coupled with LES-adapted RANS of a U-bend duct for pressure loss reduction, *Computers & Fluids*, 228, 2021.
28. Bao L. L., Li J. Y., Guo H. M., Niu G. Q., Wang Z., Zhang Y., & Wang Y. S., Numerical Simulation Study on Heat Transfer Performance of Middle-deep U-bend Geothermal Well., *Applied Geophysics.*, 2022.
29. Jatau T., & Bello-Ochende T., Numerical investigation and entropy generation for flow boiling evaporation in U-bend tube heat exchanger with elliptical and circular cross-sections, *Thermal Science and Engineering Progress*, 35, 2022.
30. Kaisare N. S., & Di Sarli V., The Effect of Catalyst Placement on the Stability of a U-Bend Catalytic Heat-Recirculating Micro-Combustor: A Numerical Investigation, *Catalysts*, 11 (12), 2021.
31. Patel A., Bhattacharyay R., Vasava V., Jaiswal A., Kumar M., Kumar R., Pedata P., Ministry A.N. & Satyamurthy, P., Numerical study of 3D MHD flow of Pb-Li liquid metal in a rectangular U-bend, *Fusion Engineering and Design*, 171, 2021.
32. Li L., Liu C. L., Li B. R., Zhu H. R., Wu Z., & Chen W. B., Numerical Study on Particles Deposition in the U-bend Ribbed Passage, *Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme*, 143 (2), 2021.
33. Cheah S.C., Iacovides H., Jackson D.C., Ji H., Launder B.E., LDA investigation of the flow development through rotating U-ducts, *J. Turbomach.*, 118 (3), 590-596, 1996.
34. Lin Y., Shih T. I., Stephens M. A. & Chyu, M. K., A Numerical Study of Flow and Heat Transfer in a Smooth and Ribbed U-Duct With and Without Rotation, *ASME. J. Heat Transfer*, 123 (2), 219-232, 2021.
35. Iacovides H., Launder B.E. & Li H.Y., The computation of flow development through stationary and rotating U-ducts of strong curvature, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 17 (1), 22-33, 1996.
36. Sergent E., *Vers une methodologie de couplage entre la Simulation des Grandes Echelles et les modeles statistiques*, PhD thesis, L'Ecole Centrale de Lyon, France, 2002.
37. Leonard B.P., The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection, *Comp. Methods Appl. Mech. Eng.*, 88, 17-74, 1991.
38. Issa R. I., Solution of Implicitly Discretized Fluid Flow Equations by Operator Splitting, *J. Comput. Phys.*, 62, 40-65, 1986.
39. Patankar S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow.*, Hemisphere, Washington, D.C., 1980.
40. Cokljat D., Large-eddy simulation of flow around surface-mounted cubical obstacles, Part I: Numerical Aspect. LESFOIL Project Report. Fluent Europa Ltd, Sheffield, UK, 1999.
41. Behnia, M., Parnoux, S., Shabany, Y. ve Durbin, P. A., Numerical Study of Turbulent Heat Transfer in Confined and Unconfined Impinging Jets, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 20, 1-9, 1999.

