

Üç boyutlu bir kavite üzerindeki sıkıştırılamaz akışın sayısal bir yöntemle analizi

Elif ÖZSOY*, A. Rüstem ASLAN

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak-Uzay Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bu çalışmada basit bir geometriye sahip olmasına rağmen oldukça karmaşık bir akım yapısı sergileyen ve gerek askeri gerekse de endüstriyel pekçok uygulamada sıkça karşılaşılan iki veya üç boyutlu kaviteler üzerindeki zamana bağlı, sıkıştırılamaz akış sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmanın ana amacı, düşük Reynolds sayılarındaki kavite akışı hakkındaki bilgileri ilerletmek ve 3 boyutlu kavite akışı ile 2 boyutlu (2B) veya 3 boyutlu (3B) kavite üzerindeki akımın 3 boyutluluk etkilerini incelemektir. Sayısal çalışmada, Navier-Stokes denklemleri, zamana bağlı, 3B'lu, sıkıştırılamaz bir akış için Fluent ticari yazılımıyla sonlu hacimler yöntemi kullanılarak çözülmüştür ve türbülans modellemesi için de Large Eddy Simülasyonu (LES) yaklaşımı kullanılmıştır. Çalışmada uzunluğunun derinliğine oranı (L/h) 4 olan ve uzunluğunun genişliğine oranı (L/w) 0.8 olan dikdörtgenel bir kavite ele alınmıştır. Yaklaşmakta olan akımın tipi laminer olarak seçilmiştir. Kavite derinliği ve serbest akış hızına göre hesaplanan Reynolds sayısı 4000'dir. LES kullanılarak yapılan sayısal çalışmanın doğruluğu, 2 farklı Re sayısı için (4000 ve 13000) için Özsoy ve diğerleri (2005)'nin yapmış olduğu deneysel çalışma kullanılarak sağlanmıştır. Doğrulama yapıldıktan sonra 2B'lu bir kavite üzerindeki akımın 3B'lu yapısı ile, 3B'lu bir kavite üzerindeki akış yapısı sırasıyla incelenmiştir. Hem 2B'lu hem de 3B'lu kavite akışının içerdikleri akım ayrılması, kayma tabakası, vorteks üretimi, vorteks yayınma mekanizması ve vorteks-duvar etkileşimleri nedeniyle oldukça karmaşık bir yapıya sahip oldukları gözlemlenmiştir. 2B'lu ve 3B'lu çözümlerin kavite orta düzleminde yapılan karşılaştırmaları ortalama akış büyüklükleri cinsinden benzer sonuçlar verse de türbülanslı büyüklükler açısından farklılıklar içerdiği ve özellikle duvara yakın bölgelerde duvar etkisi nedeniyle oldukça farklı bir akış yapısı sergiledikleri gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kavite akışı, LES, Vorteks, Laminer akım.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Elif ÖZSOY, aslanr@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 67 85.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler, Uçak-Uzay Mühendisliği Programında tamamlanmış olan "Üç boyutlu dikdörtgen kavite üzerindeki sıkıştırılamaz laminer akışın sayısal yöntemle analizi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 10.03.2010 tarihinde dergiye ulaşılmış, 19.04.2010 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.08.2011 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Bu makaleye "Özsoy, E., Aslan, A R., (2011) 'Üç boyutlu bir kavite üzerindeki sıkıştırılamaz akışın sayısal bir yöntemle analizi', İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 10: 3, 149-159" şeklinde atıf yapabilirsiniz.

Numerical Simulation of incompressible laminar flow over three dimensional rectangular cavity

Extended abstract

There are many engineering structures which require some form of cavities on their surfaces in order to perform the task they are designed for. However, these cavities can also be a source of various problems if structures with cavities are subjected to flow conditions. It is well known that the flow over a cavity is a complex phenomenon due to there usually being strong pressure, velocity and sometimes density fluctuations. These in turn can lead to increased drag forces, excessive noise and vibrations problems in structures. It is therefore essential to understand the cavity-flow physics and to be able to model, analyze and predict the outcome of such flows with acceptable accuracy if the adverse effects are to be controlled and minimized.

Although many studies have been conducted about the cavity flows most of them have mainly focused on supersonic and compressible flows because of their relevance to aeronautical applications. However, much less attention has been given to very low Mach number cavity flows that are encountered in various grounds, industrial and environmental applications so far. There have been some studies dealing with incompressible cavity flow, but these were mainly focused on flow inside or around two-dimensional cavities and there have been very few investigations on flow inside a three-dimensional cavity. Therefore, there is a real need for better understanding of the three-dimensional effects in cavity flows at very low Reynolds numbers.

The main purpose of this work is to study the three-dimensional effects on the characteristics of the cavity flow at very low Mach numbers and to improve the understanding of this type of flow. Therefore this study presents a numerical study into the problem of incompressible laminar flow passing a two and three-dimensional rectangular cavity with a view to understanding the complex nature of the flow and the three-dimensional structure of the cavity.

The study is based on the solution of the unsteady, three-dimensional, incompressible Navier-Stokes equations by using finite volume method and Large Eddy Simulation approach. A cavity with length to

depth ratio of 4 under an incoming laminar boundary layer is investigated for Re is equal to 4000 (based on cavity depth and free stream velocity). To validate the used computational procedure and simulations, the study of Özsoy et al. (2005) on two dimensional cavities under laminar incoming flow with L/h ratio of 4 is used. After this validation step, three-dimensional flow features of incompressible cavity flows with an incoming laminar boundary layer is investigated. The influence of the recirculating flow inside the cavity on the separated shear layer, the nature of the interactions between the large-scale eddies and the trailing edge corner and the dynamic behavior of the vortex structures occurring in a cavity are studied.

The results obtained from computations show that the flow field inside the cavity has a three dimensional structure, even in two-dimensional cavity geometries including vortex shedding mechanism, stretching, wall vortex interaction like clipping or partially escape and so on. Time-averaged parameters in 3D analyses of 3D cavity reveal that the characteristics of the flow change significantly due to the side wall effects. As expected the wall effects are stronger at locations closer to the wall. Another important result from 3D analyses is that if the instantaneous flow field is considered, flow structures are quite different at different stations and highly time dependent. When 3D flow characteristics are compared to those of 2D it is found that the mean flow features are almost the same for 3D and 2D only at the middle of the cavity. However, this is not the case when the results are compared outside this plane. The 2D and 3D results are significantly different at planes away from the symmetry plane. Although the mean flow quantities are about the same for 2D and 3D in the middle plane, turbulence behavior is quite different.

It is believed that the validated computational procedure presented in this study for the analyses of flow over cavities can be used to determine the forces acting to the structures due cavities and this information can also be used for design purposes. Also, the validated computational procedure in this work can help future researchers to perform similar analyses for various kinds of cavities with high level of confidence and to optimize the geometry of the cavities for minimum drag, noise and vibration.

Keywords: Cavity flow, vortex, LES, laminar flow.

Giriş

Kavite akışı genellikle katı yüzeyler üzerindeki boşluk veya oyuklar üzerinden geçen akış olarak tanımlanmaktadır ve akışkanlar mekaniği açısından oldukça temel bir konudur.

Günümüzde gerek askeri gerekse de endüstriyel pek çok uygulamada kavitelere veya kavite benzeri yapılara sıkça rastlanmaktadır. Mesela uçakların iniş takımları, silah ve bomba yuvaları havacılık uygulamalarına, araçların camları ile açılır tavanı otomobil endüstrisi uygulamalarına, liman girişleri veya yüksek binalar etrafındaki akışlar çevresel uygulamalarına örnek olarak verilebilirler. Kavite, bir yapıda, ya kendilerine verilen özel bir görevi yerine getirmeleri amacıyla ya da dizayn ve imalat kısıtlamalarından dolayı bulunurlar. Ancak, bu yapılar akış koşullarına maruz kaldıkları zaman buldukları yapılar üzerinde aynı zamanda değişik problemlerin kaynağı da olabilirler. Basit bir geometriye sahip olmalarına rağmen, kavite üzerindeki akışın, güçlü basınç, hız ve bazen yoğunluk değişimleri nedeni ile oldukça karmaşık ve kompleks bir yapıya sahip olduğu çok iyi bilinmektedir. Sözü edilen kompleks akış ve güçlü değişimler daha yüksek sürtünme kuvvetlerine, aşırı gürültü ve titreşim problemlerine de sebep olabilmektedir. Bu nedenle, eğer kavite akışının olumsuz etkilerinin kontrol ve minimize edilmesi gerekiyorsa, kavite akışının fiziğinin anlaşılması, bu akışın modellenebilmesi, analiz edilebilmesi ve bu akışın neden olduğu sonuçların kabul edilebilir hassasiyette tahmin edilebilmesi şarttır.

Bugüne kadar kavite akışı ile ilgili pek çok çalışma yapılmış olup bu çalışmalardan kavite akışının doğasının, Reynolds sayısına, yaklaşmakta olan akımın sınır tabaka özelliklerine (laminer / türbülans) ve kavitenin geometrik özelliklerine (uzunluk/derinlik oranı, uzunluk/genişlik oranı gibi) güçlü bir şekilde bağlı olduğu belirlenmiştir. (Rockwell ve Naudascher, 1978). Ancak bu çalışmaların büyük bir kısmı özellikle aerodinamik alanındaki önemli uygulamalarından dolayı, süpersonik ve sıkıştırılabilir kavite akışı üzerinedir. Endüstriyel ve çevresel uygulamalarda karşımıza çıkan düşük Mach sayılarındaki, sıkıştırılmaz kavite akışı

üzerindeki çalışmalara ise son zamanlarda ağırlık verilmeye başlanmıştır. Bu çalışmalarda daha ziyade 2 boyutlu kavite ve kavite akışı üzerine çalışılmıştır. 3 boyutlu kavite ve akışın 3 boyutluluk etkisi üzerine olan çalışmalar ise oldukça azdır. Bu nedenle düşük Reynolds sayılarında üç boyutlu kavite akışının etkilerinin daha iyi anlaşılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmanın ana amacı, düşük Reynolds sayılarındaki kavite akışı hakkındaki bilgileri ilerletmek ve Large Eddy Simülasyonu kullanılarak yapılan sayısal tahminlere güvenilirliği arttırmaktır. Bu hedefe ulaşmak için: (i) bir kanal içerisindeki 2 boyutlu, dikdörtgen, sık bir kavite üzerindeki 3 boyutlu, sıkıştırılmaz, laminer bir akış araştırılmıştır (ii) Sayısal simülasyonlardan elde edilen tahminler 2 boyutlu kavite akışından elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmış ve kullanılan sayısal yöntem $Re=4000$ ve $Re=13000$ için doğrulanmıştır, (iii) Doğrulanmış yöntem kullanılarak iki boyutlu kabul edilen kavite akışındaki üç boyut etkileri incelenmiştir, (iv) Üç boyutlu bir kavite üzerindeki üç boyutlu kavite akışı çalışılmış, özellikle kavite akışı içerisinde yer alan dönen büyük yapıların davranışları, bunların ayrılmış kayma tabakası üzerindeki etkileri, yine bu yapıların duvar ile yaptıkları etkileşimler incelenmiştir.

Bu çalışmada sunulan inceleme sonuçlarının kavite nedeni ile bir yapıya uygulanacak kuvvetlerin belirlenmesi dolayısıyla da tasarım amaçlı olarak kullanılabilmesine inanılmaktadır. Buna ek olarak, bu çalışmadaki doğrulanmış analiz yöntemi gelecek araştırmacıların ileride benzer analizleri değişik kavite için yüksek güvenilirlikte yapabilmelerine, kavite geometrisini minimum sürtünme, gürültü ve titreşim için optimize etmelerine yardımcı olacaktır.

Sayısal çalışmanın detayları

Bu çalışmada, üç boyutlu, dikdörtgensel bir kavite üzerindeki sıkıştırılmaz, laminer bir akış sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada sonlu hacimler metodu ve Large Eddy Simülasyonu (LES) yaklaşımı kullanılarak, Navier Stokes denklemleri, zamana bağlı, üç boyutlu ve sıkıştırılmaz bir akış için çözülmüştür. Bu çalışma-

nın validasyonu için Özsoy ve diğerlerinin (2005) ses altı hava tüneline Parçacık İzleme Yöntemi (Particle Image Velocimetry) kullanarak yaptıkları deneysel çalışma kullanılmıştır. Özsoy'un çalışmasında uzunluğunun derinliğine (L/h) oranı 4 olan (sığ kavite, Komerath vd., 1987) ve uzunluğunun genişliğine oranı 0.26 olan (2 boyutlu kavite, Komerath vd., 1987) 2 boyutlu dikdörtgen bir kavite üzerindeki sıkıştırılmaz laminar bir akım incelenmiştir. Bu çalışmada ele alınan problemin çözümü için ise ticari bir yazılım olan Fluent 6.3 kullanılmıştır. Hesaplamalarda hem zamanda hem de uzayda ikinci mertebe doğrulukta çözüm yaptırılmıştır.

Hesaplama alanı

Bu çalışmada ele alınan bir kanal içerisindeki kavite akışına ait hesaplama alanı Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu şekilden de görüleceği üzere kavitenin uzunluğunun derinliğine oranı 4 ve kavite derinliğinin genişliğine oranı ise 0.8'dir.

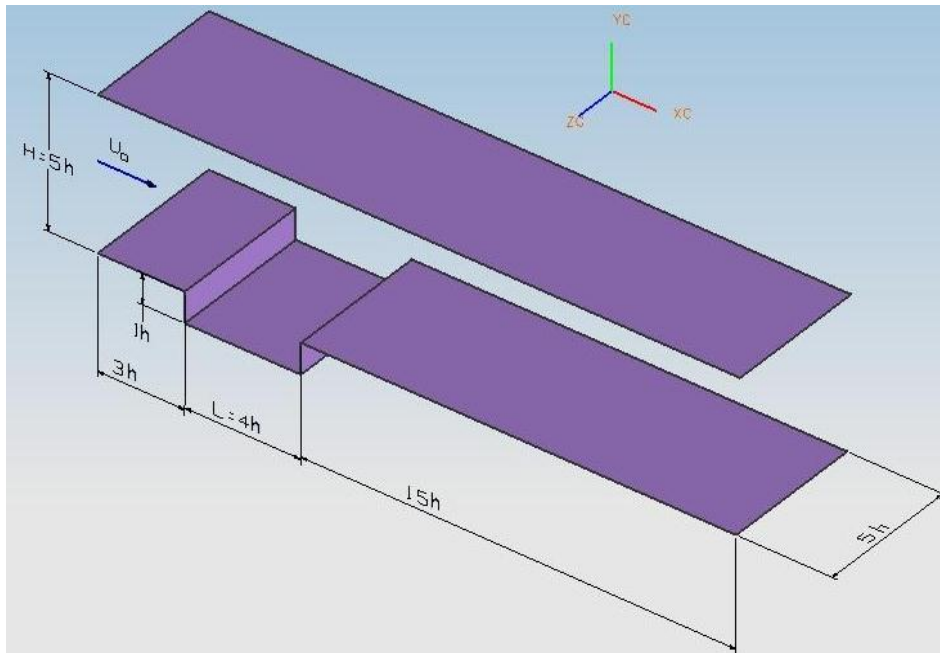
Hesaplama alanı, kavitenin ilk duvarından üç basamak uzunluğu kadar önde başlamakta ve kavitenin arka duvarından itibaren de 15 basamak boyu uzunluğuna kadar devam etmektedir. Bu sayısal çalışmada 3 ana durum ele alınmıştır. Durum 1 ve Durum 2, sayısal çalışmanın validasyonunu yapabilmek için, Özsoy ve diğerleri-

nin (2005) deneysel çalışmasında kullandığı fiziksel konfigürasyona ve akış koşullarına uygun olarak iki farklı Reynolds sayısı (Reh) için ele alınmıştır. Kanal içerisindeki serbest akım hızı ve kavitenin basamak boyu gözönüne alınarak hesaplanan bu Re sayıları 4000 ve 13000'dir. Durum 3'te ise üç boyutlu bir kavite üzerindeki akımın üç boyutlu etkisi ve duvar etkisi çalışılmıştır. Her üç durumda da hesaplama alanı aynı olmasına rağmen, kullanılan sayısal ağ ve sınır koşulları farklıdır.

Sınır koşulları

Her üç durumda da hesaplama alanının girişinde (-3h), deneysel çalışmada olduğu gibi Blasius Hız Profili verilmiştir. Çıkışta, akımın 15 basamak sonra tam gelişmiş olduğu düşünülerek Fluent yazılımındaki Outflow sınır koşulu kullanılmıştır. Durum 1 ve 2'de deneysel çalışmanın literatüre göre 2 boyutlu kabul edilmesi gözönünde bulundurularak z yönünde periyodik sınır koşulu uygulanmıştır. Durum 3'te ise 3 boyutlu kavite akışını inceleyebilmek amacıyla z-yönünde duvar kullanılmıştır.

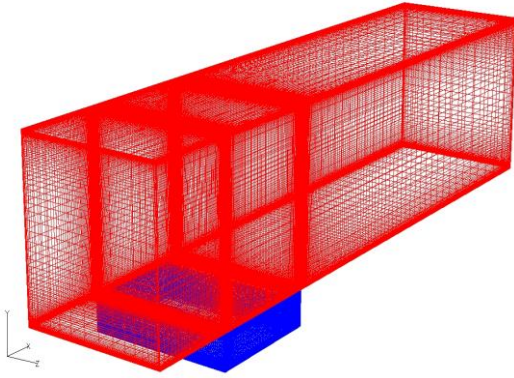
Tüm durumlar için duvarlarda kaymama koşulu uygulanmış ve duvar fonksiyonu kullanılmamıştır.



Şekil 1. Hesaplama alanı

Sayısal ağ

Tüm durumlar için (Durum1, 2 ve 3), 2 bloktan oluşan, yapısal ve uniform olmayan bir grid yapısı kullanılmıştır. (Şekil 2) Bloklardan biri kavite içerisindeki akışı temsil ederken diğeri kanal içerisindeki akışı temsil etmektedir. Farklı 2 blok yapısı ile çalışmaktaki amaç, çözümün daha çabuk yakınsaması için, kavite içerisindeki ve kanal içerisindeki akışı farklı koşullarda başlatılmaktır; başlangıçta kavite içerisindeki akış sıfır hız ile başlatılmışken, kanal kısmı girişte verilen hız profili ile başlatılmıştır.



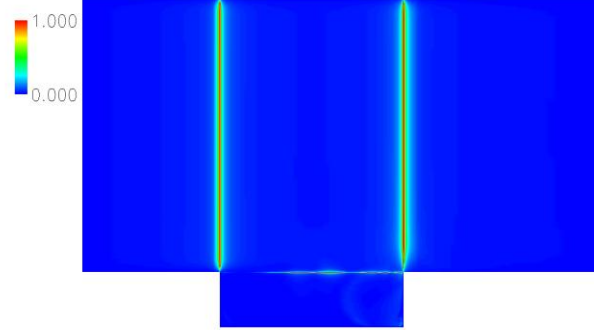
Şekil 2. Hesaplama alanı

Toplam mesh büyüklüğü, Durum 1 için 1.6 milyon, Durum 2 için 2.4 milyon ve Durum 3 için 2.9 milyona yakındır. Grid'in yoğunluğu, çözünürlüğü artırmak için, türbülanslı yapıların sıkça görülebileceği ve kayma tabakası gibi hızlı değişimlerin yaşandığı bölgelerde (duvarlara yakın yerler, kavitenin ön ve arka duvarı gibi) artırılmıştır. Durum 1 ve 2 de z-yönünde periyodik sınır koşulu uygulandığı için bu yönde uniform bir grid uygulanmışken, Durum 3'te z yönünde de grid duvarlara doğru sıklaştırılmıştır.

Zaman adımı ve istatistiksel yaklaşım

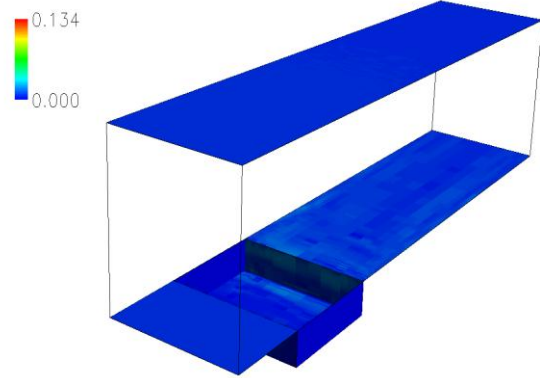
LES çalışmalarında, zamana bağlı türbülanslı yapıların yeteri kadar hassasiyette çözülebilmesi için boyutsuz CFL (Courant-Fredrichs-Levy) sayısının 1 civarında olması gerektiği belirtilmiştir. (Choi ve Moin, 1994) Bu çalışmada kullanılan zaman adımı CFL sayısının 1'i geçmeyeceği şekilde seçilmiştir. (Durum 1 ve 3 için zaman adımı 1×10^{-5} , Durum 3 için ise zaman adımı 1×10^{-6} 'dir. Şekil 3'te Durum 1 için CFL

sayısı dağılımı gösterilmektedir; CFL sayısı kavite ön ve arka duvarı civarında 1'e yakın, bu bölgelerin dışındaki her yerde ise 1'den küçüktür.



Şekil 3. CFL dağılımı, Durum 1

Tüm bu ayarlamalar, tüm üç durum için de duvardan ilk grid noktasına olan boyutsuz uzaklık olarak tanımlanan y^+ değerinin akım alanı içerisinde her yerde 1'den küçük olduğu bir değer vermiştir (Şekil 4).



Şekil 4. y^+ dağılımı

Validasyon sonuçları

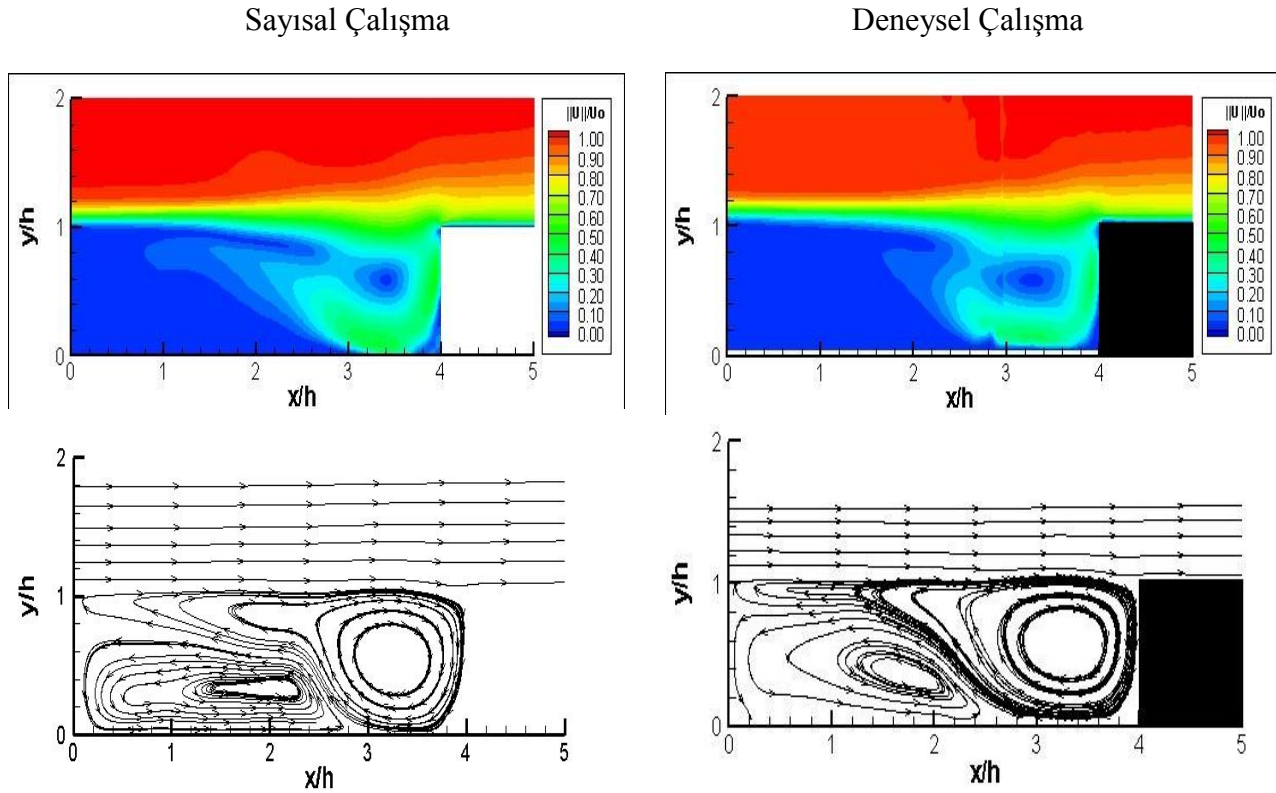
Bu çalışmada kullanılan yöntemin validasyonu için, Özsoy ve arkadaşlarının, düşük Re sayılarında ($Re_h=4000$ ve 13000) iki boyutlu, dik-dörtgenel bir kavite üzerindeki sıkıştırılmaz, laminar bir akım için yaptıkları çalışma kullanılmıştır. Ancak bütünlüğün korunması adına bu makalede sadece örnek olarak $Re_h=4000$ için bulunan sonuçlar sadece ortalama hız ve akım çizgileri cinsinden verilmiştir. Daha fazla bilgi için Özsoy'un (2009) doktora tezine bakılabilir.

Sonuçlar hem sayısal çalışma hem de deneysel çalışma için kavite orta düzleminde karşılaştırılmışlardır. Tüm sonuçlar boyutsuz halde verilmiştir ve resimlerde akım soldan sağa doğru akmaktadır.

Ortalama hız ve akım çizgileri

Şekil 5’de $Re_h = 4000$ için ortalama hız alanları ve bunlara ait akım çizgileri hem sayısal çalışma için hem de deneysel çalışma için verilmektedir. Sayısal çözüme bakıldığında, deneysel çalışmada olduğu gibi, kavite akışının 2 ana dönen yapı (recirculating bubble) ile temsil edildiği görülmektedir. İnceleme sonuçlarına göre ön duvardaki ayrılmadan hemen sonra meydana gelen kayma tabakası, kavite içerisinde derecesel olarak genişlemekte ve daha sonra da kavitenin arka duvarı ile etkileşime girmektedir. Böylece kavitenin içerisine giren akış kavitenin arka duvarı boyunca hareket etmekte ve kavitenin arka duvarı civarında konumlanan dönen ana yapıyı şekillendirmektedir. Dönen ikincil yapı ise hemen ön duvarın arkasındadır. Ana dönel yapı saat yönünde dönerken ikincil yapı buna ters

yönde hareket etmektedir. Yapılan çalışmanın bu ilk nitel karşılaştırması yapılırken sözkonusu dönen yapıların büyüklüğünün ve yerleşimlerinin karşılaştırılması oldukça büyük önem taşımaktadır. Sayısal ve deneysel çalışma karşılaştırıldığında dönel yapıların yerleşimlerinin ve büyüklüklerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir; ana bubble’ın merkezi $x/h=3.5$ ve $y/h=0.5$ de, ikincil bubble’ın merkezi e yaklaşık olarak $x/h=1.8$ ve $y/h=0.3$ ’dedir. Hatta sayısal çalışma deneysel çalışmada görülen ana dönel yapının kavite ön duvarına kadar uzanan şeklini çok iyi bir şekilde yakalamıştır. Diğer önemli bir sonuçta, deneysel çalışmada olduğu gibi, ayrılmış akımın kavite alt duvarında veya arka duvarında hiçbir şekilde bir daha yüzeye yapışmadığı sonucudur. Bu haliyle, deneysel çalışmada olduğu gibi, sayısal çalışmada da ele alınan kavite, Sarohia’nın (1977) yaptığı sınıflandırmaya göre ‘açık tipli kavite’ olarak bulunmuştur. İki dönel yapının birbirinden ayrılma noktası her iki çalışma için de $x/h=3$ civarındadır. Sonuç olarak sayısal çalışmalarla deneysel çalışmalar arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür.

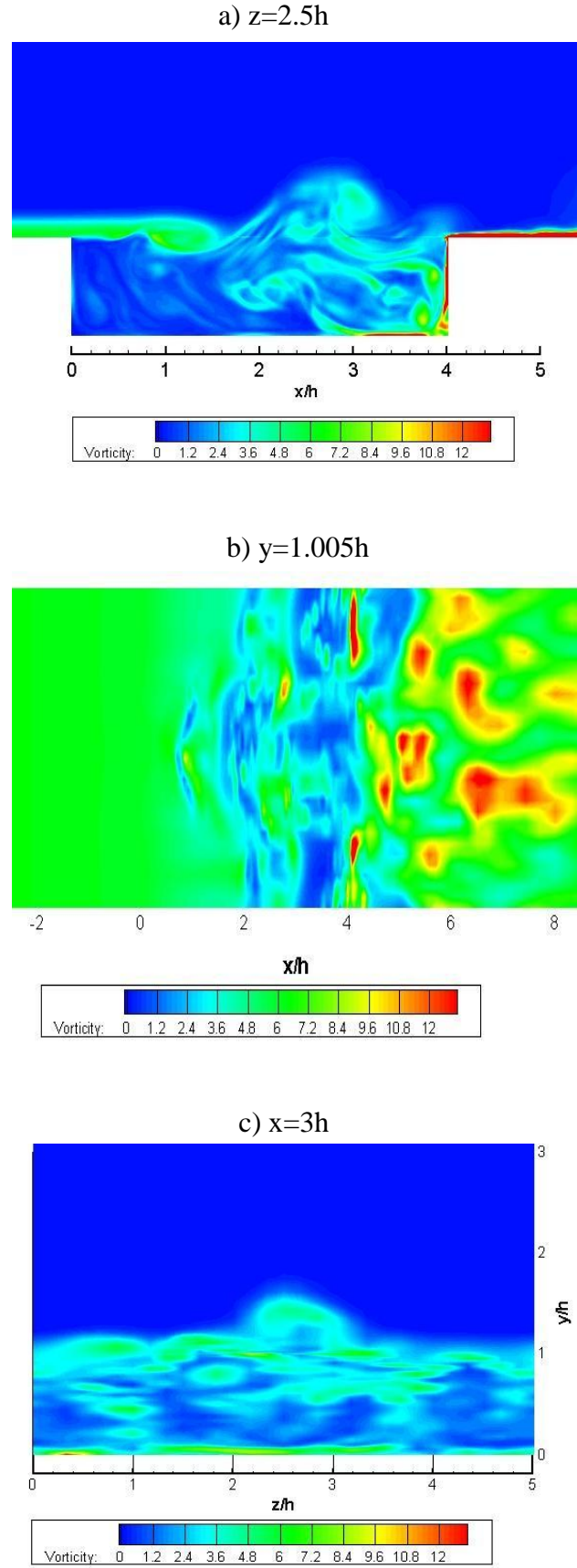


Şekil 5. Ortalama akış ve akım çizgileri karşılaştırması, $Re_h=4000$ için

2 boyutlu kavite üzerindeki akımın 3 boyutluluk etkisi

Şekil 6'da, 2 boyutlu kavite simülasyonlarında elde edilen anlık bir çevrinti (vortisite) alanı farklı düzlemlerde verilmiştir.

Anlık çevrinti alanına X-Y düzleminde (Şekil 6-a) bakıldığında, yüksek seviyedeki çevrinti üretiminin akım üstü bölgedeki ayrılmadan kaynaklandığı görülmektedir. Yüksek düzeyde çevrinti alanı oluşmasının bir diğer nedeni ise arka duvarın varlığıdır. Büyük türbülanslı yapıların Kelvin-Helmothz (K-H) kararsızlıkları nedeniyle kavite hücum kenarı civarında oluşmaya başlayıp, kavite firar kenarı gelişmelerini etkileyene kadar, büyüyerek kavite içerisinde taşındıkları görülmektedir. Bu durum çevrinti parçacıklarının kavite içerisine zamana bağlı bir şekilde enjekte edilmelerine neden olmaktadır. Sonuç olarak söz konusu çevrinti parçacıklarının firar kenarı ile etkileşimlerinden dolayı bu bölgede güçlü çalkantılar oluşmaktadır. Yine bu düzlemden görüleceği üzere, göreceli olarak büyük olan çevrili yapıların kanalın akımüstü bölgesinden firar kenarı civarında kavite içerisine doğru yönlendirildiği ve arka duvar ile burada konuşlanan ana bubble'ın varlığı nedeniyle de tekrardan akımüstü bölgeye taşındığı görülmektedir. Bu durum kavite içerisindeki akışın oldukça türbülanslı olmasına neden olmaktadır. Şekil 6-b'de ise aynı anlık çevrinti alanına X-Z düzleminde bakılmaktadır. Bu düzlemde, kavitenin varlığının hissedilmeye başlanmasıyla birlikte, akımüstü bölgeden taşınan ana yapıların üç boyutluluk etkilerinin, özellikle kavitenin ilk çeyreğinden itibaren, arttığı görülmektedir. Daha sonra ise arka duvarın varlığıyla da bu 3 boyutluluk etkisinin özellikle z yönünde yoğunlaştığı ve akışın daha karmaşık bir hal aldığı fark edilmektedir. Son olarak Şekil 6-c'de ise bu anlık çevrinti alanına Y-Z düzleminde $x/h=3$ istasyonundan bakılmaktadır. Bu istasyonda ayrılmış kayma tabakasının z yönünde oldukça fazla bozuntuya uğradığı görülmektedir. Bu bölgede kavite içerisindeki akış, kavitenin arka duvarından kavite içerisine giren çevrili yapıların bu bölgede konuşlanmış ana dönел yapının güçlü etkisiyle tekrardan ayrılmış kayma tabakası içerisine doğru yönlendikleri bölge olması nedeniyle oldukça türbülanslıdır.



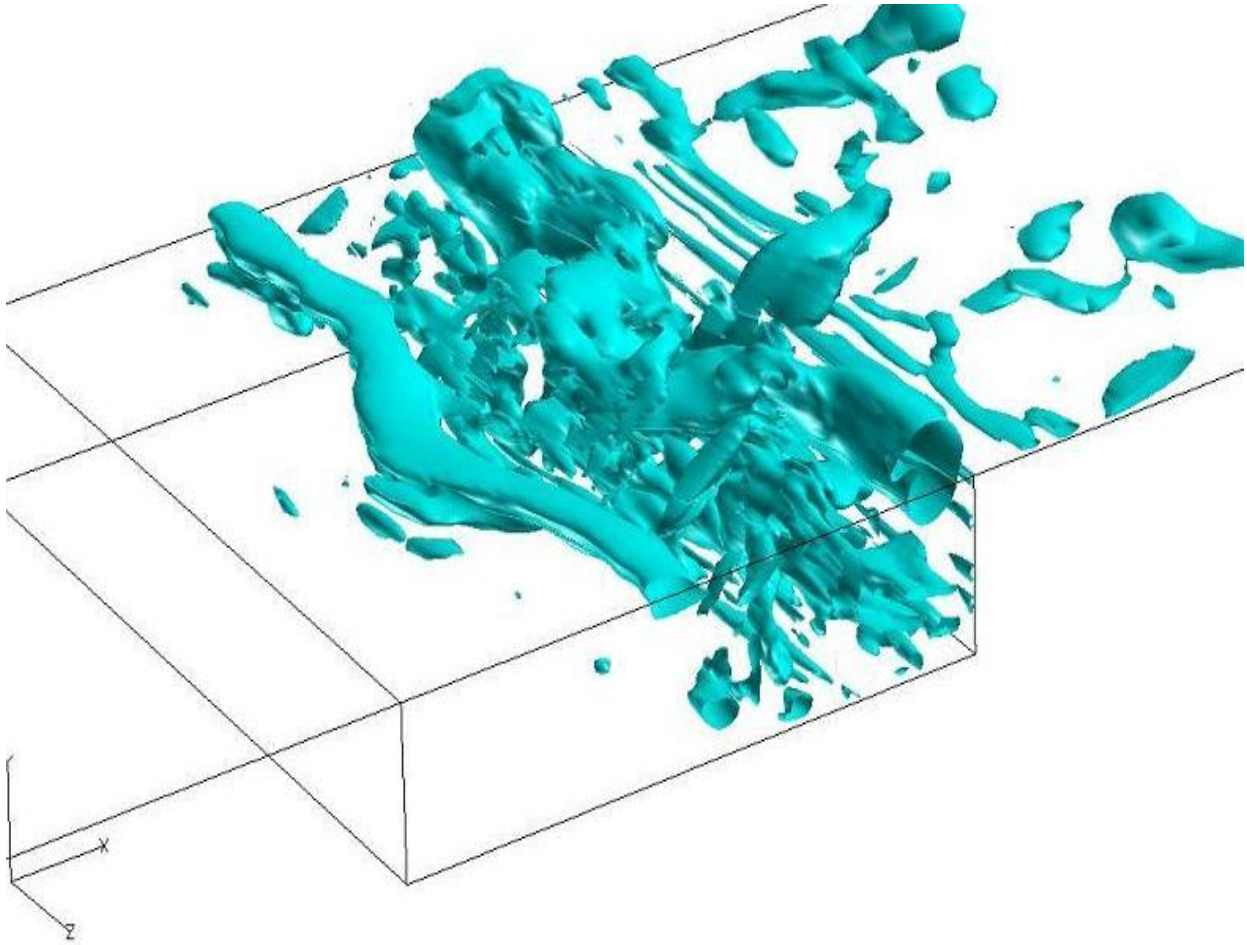
Şekil 6. Farklı düzlemlerdeki anlık çevrinti alanı

Şekil 7’de ise Q kriterine göre belirlenmiş anlık vortical yapılar sunulmaktadır. Bu şekilden görüleceği üzere Z yönünde hizalanmış vorteksler kanal ve kavitenin akımsız etkileşim bölgesinde oluşmuş ve kavitenin firar kenarıyla etkileşene kadar kavite içerisindeki yollarına devam etmişlerdir.

Yine bu şekilden vortekslerin yayınmasının kavitenin ikinci yarısında başladığı görülmektedir. Kavitenin arka duvarının varlığı ise, aynı zamanda, bu yayınmaya başlayan z yönündeki vortekslerin gerinmelerini önemli bir ölçüde artırmakta ve bu durum da 3 boyutlu yapıların daha yoğun bir şekilde görünmesine neden olmaktadır. Z yönünde hizalanmış vorteksler ile firar kenarı arasındaki bu önemli etkileşim daha önce Rockwell ve Knisely (1979) tarafından da fark edilmiştir. Onların çalışmasında, kavite içerisinde ilerleyen bir vorteksin kavite arka duvarına yaklaştığında, bu bahsedilen etkileşim dolayı-

sıyla, pekçok ihtimal dahilinde yoluna devam edeceği belirtilmiştir; vorteks ya firar kenarı ile etkileşince kısmen veya tamamen kırılacak (clipping), ya kavitenin içerisine doğru yönlendirilecek veyahut da kavitenin arka duvarının üstünden kanal içerisine doğru kaçabilecektir. Şekil 7’ye bakıldığında Z yönünde hizalanmış vorteks’in arka duvarın köşesine geldiğinde ciddi bir şekilde deforme olduğu durum görülmektedir.

Büyük bir ihtimalle bir sonraki anda vorteksin merkezi iki ana parçaya bölünecek ve bir parçası kavitenin içine doğru yönelecekken diğer parçası ise kanalın alt duvarına oldukça yakın bir şekilde akım yönünde ilerleyecektir. İki boyutlu kavite akışındaki bu önemli üç boyutluluk etkisi benzer şekilde Pereira ve Sousa (1995) ve Chang ve diğerleri (2006) tarafından da gözlemlenmiştir.

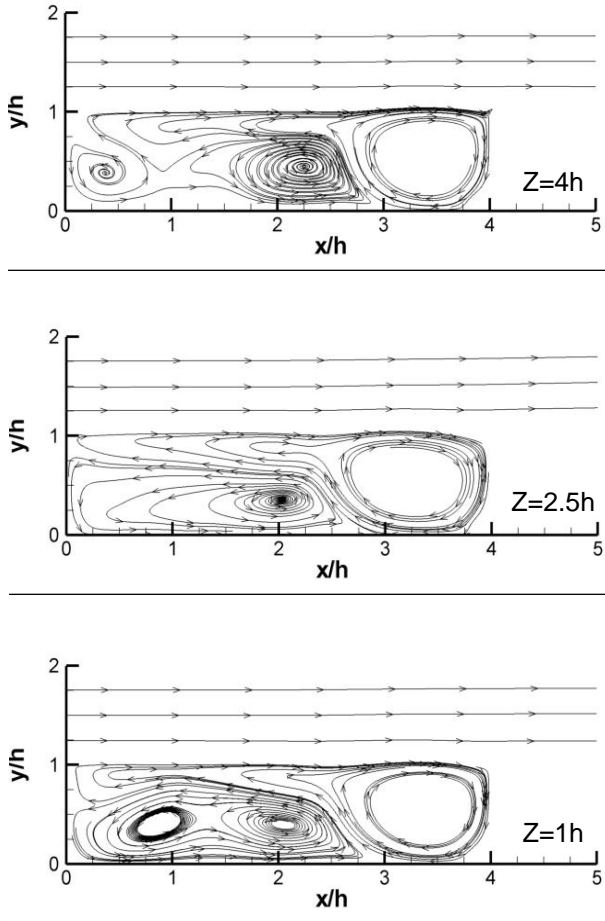


Şekil 7. Q kriterine göre çıkartılmış vorteks alanı

3 boyutlu kavite akışının analizi

Ortalama akışın akım çizgileri

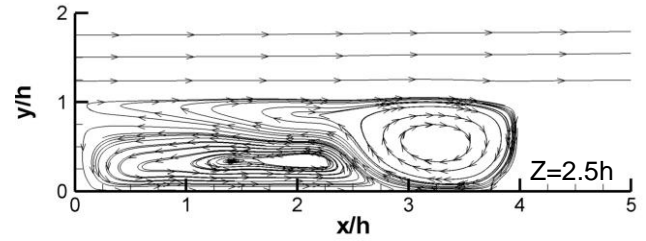
Şekil 8'de ortalama akışa ait akım çizgileri, 3 boyutlu (3B) kavite akışı için, farklı Z istasyonlarında verilmektedir. Karşılaştırma yapabilmek amacıyla Şekil 9'da ise 2 boyutlu (2B) sayısal çözümlerden elde edilen ortalama akışa ait akım çizgileri kavite orta düzleminde (simetri düzlemi, $Z=2.5h$) sunulmuştur. Her iki çözüme bakıldığında, sadece bu orta düzlemde sonuçların birbirine çok benzediği; akım çizgilerinin tüm kaviteyi dolduran ve birbirine ters yönde dönen 2 dönel yapıyı oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 8. Ortalama akışa ait akım çizgileri, 3B

Ana dönel yapının dışarıdaki akışın kavite içerisine enjekte edilmesiyle oluştuğu görülmektedir. Bu hareket kavitenin arka duvarında oluşan kayma tabakası osilasyonları ile başlamış ve Faure ve diğerlerinin (2006) çalışmasındaki benzer olarak sanki bir jet akışı gibi kavite içine

yönlendirilmiştir. Bu ana dönel yapının akışkanın yukarı akım bölgesi ile etkileşiminden ise ters yönde dönen ikincil ana yapı oluşmuştur. Daha sonra açıklanacağı üzere zamana oldukça bağlı olan bu ikincil yapının boyutu ana yapı ile kavitenin ön duvarı arasında sınırlandırılmıştır. Bu iki dönel yapının birbirine ters yöndeki hareketi ise, aralarında, kavitenin ön duvarı ve kayma tabakası arasında sınırlanmış ve bastırılmış (indüklenmiş) bir akış oluşturmaktadır. Bu bastırılmış ve sınırlandırılmış akış aslında z yönü haricinde gelişecek hiçbir yer bulamamaktadır ve bu z yönündeki harekette enine (transverse) akış ile sonuçlanmaktadır. Yine bu şekile bakarak 2B ve 3B'lu çözümlerde, kavite orta düzlemindeki ana ve ikincil dönel yapıların büyüklükleri, yerleşimleri, merkezlerinin konumları ve hatta ana dönel yapının kavite ön duvarına doğru yaptığı uzantıların birbiri ile oldukça benzer özellikler taşıdığı görülmektedir.

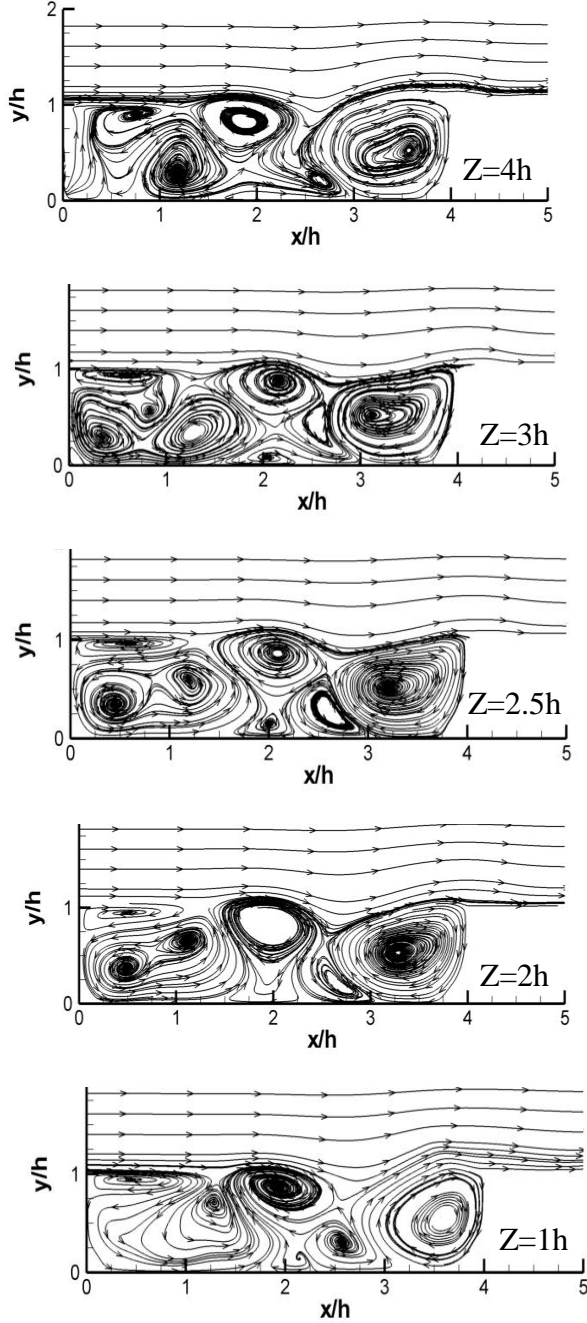


Şekil 9. Ortalama akışa ait akım çizgileri, 2B, kavite orta düzleminde

Ancak bu düzlemin dışına çıktığında ortalama akışın 3B'lu durum için oldukça değiştiği görülmektedir; özellikle ikincil dönel yapı pozisyonunu ve büyüklüğünü kaybetmekte dolayısıyla da kavite içerisindeki dönel yapıların sayısı ön duvarın hemen altında oluşan üçüncül dönel yapı ile üçe çıkmaktadır. Tüm bu hareketlerden, değişimlerin duvar etkisi nedeniyle yaşandığı ve akımın kesinlikle 3 boyutluluk etkisinin duvarlara doğru gidildikçe daha çok hissedildiği kanısına varılabilir. Sonuç olarak, kavite orta düzleminde, kayma tabakasının gelişimi ve bunun kavite arka duvarı ile etkileşimi genel olarak 2B'lu bir karakter sergilese de, duvarlara doğru gidildikçe akış kararlılığını kaybedip, 3 boyutlu- luğu artmaktadır.

Anlık akış alanları, $T=172.5$

Şekil 10, $T=172.5$ ($T=t*U/h$) anı için, X-Y düzleminde, farklı z istasyonlarındaki anlık bir akış alanını göstermektedir.



Şekil 10. Farklı X-Y düzlemlerindeki anlık bir akış alanı

Bu şekle bakıldığında, tüm istasyonlarda, kavite içerisinde farklı olgunluğa sahip pek çok dönel yapının olduğu görülmektedir; kavitenin arka

duvarından hemen önce konuşlanmış ana dönel yapı, akım üstü bölgesindeki ikincil dönel yapı, kavitenin orta-aşağı bölgesinde bulunan üçüncül dönel yapılar ve K-H kararsızlıkları nedeniyle kayma tabası içerisinde oluşan K-H vorteksi. Yine bu şekilden, bu farklı olgunluktaki dönel yapıların, aynı enstantane an için bile farklı z istasyonlarında birbirinden farklı bir yapı sergiledikleri aşıkardır. Sadece ana dönel yapının lokasyonunu ve büyüklüğünü koruyabildiği kavite içerisinde, ikincil ve üçüncül vortekslerin özellikle duvarlara doğru gidildikçe davranışlarının büyüklükleri ve yerleşimleri cinsinden önemli bir ölçüde değiştiği görülmektedir. Bu tür bir davranış, yine dikdörtgenel, açık tipli bir kavite için Yao (2004) tarafından gözlemlenmiştir. Tüm bu akış yapıları, kavite içerisindeki akışın zamana bağlı ve güçlü 3B'luluk etkilerinin yaşandığı oldukça karmaşık bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

Bu makalede bütünlüğün korunması amacıyla 2B'lu ve 3B'lu simülasyonlardan elde edilen tüm sonuçlar, elde edilen tüm bulgular ve her iki çözümünde karşılaştırılması sunulmamıştır. Detaylar için Özsoy'un doktora tezine bakılmalıdır.

Sonuçlar

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 2B'lu ve 3B'lu dikdörtgenel, sıg kavite üzerindeki 3B'lu, sıkıştırılamaz akışın incelenmesi için Large Eddy Simülasyonunu kullanarak bir model oluşturulmuştur ve bu modelin doğruluğu Özsoy'un düşük Re sayılarında ($Re_h=4000$ ve 13000) 2B'lu (2005) kavite üzerine yaptığı deneysel çalışma ile sağlanmıştır. Bu doğrulama süreci bu çalışmada sunulan diğer incelemeler için güven oluşturmuştur.
- İki farklı Re sayısı için yapılan doğrulama sürecinden sonra, Özsoy'un (2005) yapmış olduğu deneysel çalışmada, kullanılan deneysel yöntem nedeniyle gözlemlenemeyen, 2B'lu kavite üzerindeki akışın 3B'lu yapısı ve 3B'luluk etkisi incelenmiştir. Bu çalışma bir kez daha, kavite içerisindeki akışın, içerdikleri akım ayrılması, vorteks üretimi, vor-

teks yayınması ve duvar-vorteks etkileşimi gibi nedenlerden dolayı, 2B'lu kavitelere dahi, 3B'lu bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir.

- 2B'lu kavite incelendikten sonra bu defa 3B'lu kavite akışı $Re_h=4000$ için incelenmiştir. Zamana göre ortalaması alınmış akış parametreleri kavitenin içerisindeki akış karakteristiğinin özellikle yan duvarlar nedeniyle önemli bir ölçüde değiştiğini göstermiştir. Anlık akım alanları gözönüne alındığında ise akımın oldukça zamana bağlı ve güçlü 3B'luluk etkilerine sahip olduğu gözlemlenmiştir; akım alanı gerek zaman ortalaması alınmış değerlerde gerekse de anlık değerlerde farklı düzlemlerde farklı özellikler sergilemektedir.
- 3B'lu ve 2B'lu sonuçlar karşılaştırıldığında ise ortalama akış özelliklerinin kavite orta düzleminde neredeyse aynı olduğu ancak bu orta düzlemden uzaklaştıkça 3B'lu ve 2B'lu sonuçların oldukça farklılaştığı görülmektedir. Ancak yine bu orta düzlemde ortalama akış büyüklükleri hem 3B'lu hem de 2B'lu analizler için benzer iken akışın türbülanslı yapısının bu orta düzlemde dahi birbirinden ayrıldığı saptanmıştır.

Kaynaklar

Chang, K., Constantinescu, G., Park, S., (2006). Analysis of the flow and mass transfer processes for the incompressible flow past an open cavity with a laminar and a fully turbulent incoming bo-

undary layer, *Journal of Fluid Mechanics*, **561**, 113-145.

Choi, H., & Moin, P. (1994). Effects of the Computational Time Step on Numerical Solutions of Turbulent Flow, *Journal of Computational Physics*, **133**, 1-4.

Faure, T., Adrianos, P., Lusseyran, F., Pastur, L. (2006). Visualizations of the flow inside an open cavity at medium Reynolds numbers, *Experiments in Fluids*, 169-184.

Komerath, N.M., Ahuja, K.K. and Chambers, F.W., (1987). Predictions and Measurement of Flows over Cavities: A Survey, *AIAA Paper 87-0166*.

Özsoy E., Rambaud R., Stitou A., Riethmuller M.L., (2005). Vortex characteristics in laminar cavity flow at very low Mach number, *Experiments in Fluids*, **38**, 133-145.

Pereira J.C.F., Sousa J.M.M., (1995). Experimental and Numerical Investigation of Flow Oscillations in a Rectangular Cavity, *Transaction of the ASME*, **117**, 68-73.

Rockwell, D., Knisely, C., (1979). The organized nature of flow impingement upon a corner, *Journal of Fluid Mechanics*, **93**, 413.

Rockwell, D., Naudascher, E. (1978). Review—self-sustaining oscillations of flow past cavities, *Journal of Fluid Mechanics*, **100**, 152-165.

Sarohia, V., (1977). Experimental Investigation of Oscillations in Flows Over Shallow Cavities, *AIAA Journal* 15 No.7.

Yao, H., Cooper, R.K., Raghunathan, S., (2004). Numerical Simulation of Incompressible Laminar Flow Over Three-Dimensional Rectangular Cavities, *Journal of Fluids Engineering* November, **126**, 919.