



## Experimental and numerical investigation of effects of different cavity geometries on flow in a rectangular channel

Yücel Özmen<sup>1\*</sup>, Erhan Aksu<sup>2</sup>, Nurhan Gürsel Özmen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering, Karadeniz Technical University, Trabzon, 61080, Turkey

<sup>2</sup>Naval Architecture and Marine Engineering, Karadeniz Technical University, Trabzon, 61530, Turkey

### Highlights:

- The effect of changing in cavity geometry to the flow field
- Pressure distributions along the cavity surfaces
- Mean velocity and turbulence kinetic energy analysis in the cavities

### Keywords:

- Cavity flow
- Pressure coefficient
- Mean velocity
- Turbulence kinetic energy
- Turbulence modelling

### Article Info:

Research Article  
Received: 24.05.2019  
Accepted: 29.09.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.569773

### Correspondence:

Author: Yücel Özmen  
e-mail: yozmen@ktu.edu.tr  
phone: +90 462 377 3576

### Graphical/Tabular Abstract

Cavity flow is a fundamental problem in fluid mechanics. Flow over a cavity is a complex phenomenon due to there usually being strong pressure, velocity and 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. In this study, the effect of changing in cavity geometry to the flow field was investigated experimentally and numerically. In four different cavity geometries, triangular, trapezoid, rectangular and inverted trapezoid, pressure distributions along the cavity surfaces through the flow direction and mean velocity and turbulence kinetic energy distributions along the cavities were obtained.

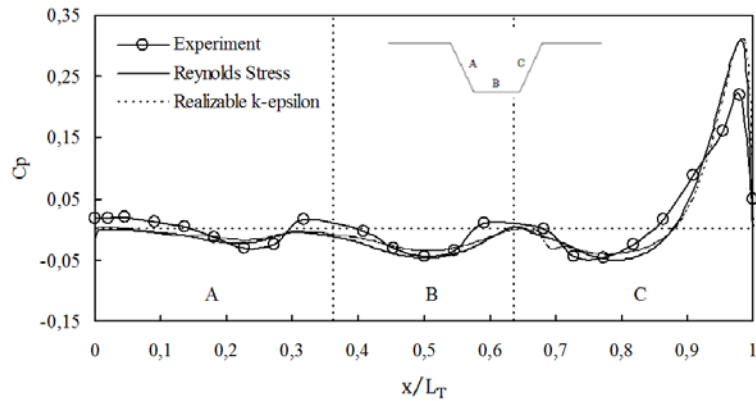


Figure A. Pressure coefficients in trapezoid cavity geometry

**Purpose:** The aim of the study is to investigate the effect of change in cavity geometry on flow field.

### Theory and Methods:

The effect of changing in cavity geometry to the flow field was investigated experimentally and numerically. In four different cavity geometries, triangular, trapezoid, rectangular and inverted trapezoid, pressure distributions along the cavity surfaces through the flow direction and mean velocity and turbulence kinetic energy distributions along the cavities were obtained. Realizable k- $\epsilon$  and Reynolds Stress turbulence models were used for time-independent three-dimensional numerical solutions.

### Results:

The results obtained for  $Re=100,000$  show that both pressure distributions and velocity distributions are affected from the cavity geometry. Flow separating from the front edge of the cavities forms reverse flow regions in the cavities. For triangular and trapezoidal geometries, the pressure coefficients along the cavity surfaces show a sinusoidal distribution. For rectangular and inverted trapezoidal geometries, the pressure coefficients at the center of the cavity bases have negative peak values. Turbulence kinetic energy increases between the free flow and the reverse flow regions.

### Conclusion:

It was concluded that Reynolds Stress turbulence model results are closer to the experimental data.



## Dikdörtgen bir kanaldaki farklı kavite geometrilerinin akışa etkilerinin deneysel ve sayısal incelenmesi

Yücel Özmen<sup>1\*</sup>, Erhan Aksu<sup>2</sup>, Nurhan Gürsel Özmen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 61080 Ortahisar Trabzon, Türkiye

<sup>2</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi İnşaat ve Gemi Makina Mühendisliği Bölümü, 61530 Sürmene, Trabzon, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Kavite geometrisindeki değişikliğin akış alanına etkisi
- Kavite yüzeyleri boyunca basınç dağılımları
- Kavite boşluklarında ortalama hız ve türbülans kinetik enerjisi analizi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 24.05.2019  
Kabul: 29.09.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.569773

### Anahtar Kelimeler:

Kavite akışı,  
basınç katsayısı,  
ortalama hız,  
türbülans kinetik enerjisi,  
türbülans modeli

### ÖZET

Bu çalışmada, kavite geometrisindeki değişikliğin akış alanına etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Üçgen, yamuk, dikdörtgen ve ters yamuk şeklinde dört farklı kavite geometrisinde, akış doğrultusunda kavite yüzeyleri boyunca basınç dağılımları ve kavite boşlukları boyunca ortalama hız ve türbülans kinetik enerjisi dağılımları elde edilmiştir.  $Re=100000$  için elde edilen sonuçlar hem basınç dağılımlarının hem de hız dağılımlarının kavite geometrisinden etkilendiğini göstermektedir. Kavitelelerin ön kenarından itibaren akış ayrılmakta ve kavite boşluklarında ters akış bölgeleri oluşmaktadır. Üçgen ve yamuk geometrilerde, kavite yüzeyleri boyunca basınç katsayıları sinüsoidal bir dağılım göstermektedir. Dikdörtgen ve ters yamuk geometrilerde ise, kavite tabanlarının orta bölümünde basınç katsayıları negatif pik değerler almaktadır. Kavitelelerde, serbest akış ile ters akış arasındaki bölgelerde türbülans kinetik enerjisi artmaktadır. Realizable  $k-\epsilon$  ve Reynolds Stress türbülans modelleri kullanılarak zaman bağımsız olarak üç boyutlu sayısal çözümlerin gerçekleştirildiği çalışmada, Reynolds Stress türbülans modeli ile elde edilen sonuçların deneysel verilere daha yakın olduğu görülmüştür.

## Experimental and numerical investigation of effects of different cavity geometries on flow in a rectangular channel

### H I G H L I G H T S

- The effect of changing in cavity geometry to the flow field
- Pressure distributions along the cavity surfaces
- Mean velocity and turbulence kinetic energy analysis in the cavities

### Article Info

Research Article  
Received: 24.05.2019  
Accepted: 29.09.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.569773

### Keywords:

Cavity flow,  
pressure coefficient,  
mean velocity,  
turbulence kinetic energy,  
turbulence modeling

### ABSTRACT

In this study, the effect of changing in cavity geometry to the flow field was investigated experimentally and numerically. In four different cavity geometries, triangular, trapezoid, rectangular and inverted trapezoid, pressure distributions along the cavity surfaces through the flow direction and mean velocity and turbulence kinetic energy distributions along the cavities were obtained. The results obtained for  $Re=100,000$  show that both pressure distributions and velocity distributions are affected from the cavity geometry. Flow separating from the front edge of the cavities forms reverse flow regions in the cavities. For triangular and trapezoidal geometries, the pressure coefficients along the cavity surfaces show a sinusoidal distribution. For rectangular and inverted trapezoidal geometries, the pressure coefficients at the center of the cavity bases have negative peak values. Turbulence kinetic energy increases between the free flow and the reverse flow regions. Realizable  $k-\epsilon$  and Reynolds Stress turbulence models were used for time-independent three-dimensional numerical solutions. It was observed that Reynolds Stress turbulence model results are closer to the experimental data.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kavite akışı akışkanların temel konularından biridir. Basit bir geometriye sahip olmalarına rağmen, akış ayrılması ve kayma tabakası gibi etkiler içermeleri nedeniyle oldukça karmaşık bir yapıya sahip olan kaviteler, belli akış şartları altında güçlü basınç, hız ve yoğunluk değişimlerine yol açabilmektedir. Güçlü akustik etkiler de içeren kavite akışları yüksek sürtünme kuvvetlerine, aşırı gürültü ve titreşim problemlerine sebep olabilmektedir. Bu nedenle, kavite akışları hem mühendislerin hem de bilim insanlarının ilgisini çekmektedir. Günümüzde uçakların iniş takımları, silah ve bomba yuvaları, gaz türbini kanalları, araçların camları, otomobillerin açılır tavanları, liman girişleri ve yüksek binalar etrafındaki yapılar gibi hem askeri hem de endüstriyel pek çok uygulamada kavitelere sıkça rastlanmaktadır. Mühendislik uygulamalarında kavite akışı ile yaygın olarak karşılaşılmaması nedeniyle bu konuda hem deneysel hem de sayısal pek çok araştırma gerçekleştirilmiştir. Kavite akışında akış hızına ve geometrik farklılıklara göre kategorik sınıflandırmalar yapılmaktadır. Serbest akıştaki Mach sayısına göre, sesaltı veya sesüstü, kavitenin geometrik şekline göre dörtgen veya dörtgen olmayan, uzunluk (L) - derinlik (H) oranına göre sığ ( $L/H > 1$ ) veya derin ( $L/H < 1$ ), kavite ön köşesinden ayrılan akışın kavite tabanında tutunup tutunmamasına göre kapalı veya açık ve uzunluk (L) - genişlik (W) oranına göre iki boyutlu ( $L/W < 1$ ) veya üç boyutlu ( $L/W > 1$ ) kavite şeklinde yapılan sınıflandırmalar bu akışların incelenmesinde belirleyici olmaktadır [1]. Kavite akışının doğası, Reynolds sayısına, yaklaşmakta olan akışın sınır tabaka özelliklerine (laminer/türbülanslı) ve kavitenin geometrik özelliklerine (uzunluk/derinlik oranı, uzunluk/genişlik oranı gibi) güçlü bir şekilde bağlıdır [2].

Literatürde kavite akışı ile ilgili çalışmaların önemli bir kısmı süpersonik kavite akışı üzerinedir. Endüstriyel ve çevresel uygulamalarda ortaya çıkan kavite akışlarına yönelik çalışmalar az sayıdadır. Mevcut çalışmalarda çoğunlukla kare veya dikdörtgen kavite geometrileri incelenmiştir. Lee ve Sung [3], türbülanslı aksel simetrik kavite akışını Laser Doppler Velocimetry (LDV) yöntemiyle deneysel olarak inceleyerek, Reynolds sayısının 73000 değeri için yüzey basıncı, ortalama hız ve türbülans dağılımlarını elde etmişlerdir. Chung [4], dikdörtgen geometriye sahip kaviteler üzerinden geçen türbülanslı akışta, kavite derinliği etkisini ortalama ve çalkantılı yüzey basıncı ölçümleriyle deneysel olarak incelemiştir. Grace vd. [5], dikdörtgen geometriye sahip bir sığ kavitedeki akış karakteristiklerini hem laminar hem de türbülanslı akış şartlarında deneysel olarak inceleyerek, kavite boşluğunda ortaya çıkan girdabın akış yönünde dikdörtgen boşluğun sağ bölümünde yerleştiğini belirtmişlerdir. Mesalhy vd. [6], dikdörtgen kavite üzerindeki türbülanslı akışı deneysel ve sayısal olarak inceleyerek uzunluk/derinlik oranı etkisini değerlendirdikleri çalışmada, uzunluk/derinlik oranının artmasıyla kavite boşluğunda birbirine göre ters yönde dönen iki girdabın oluştuğunu ifade etmişlerdir. Zdanski vd. [7],

değişik uzunluk-derinlik oranlarına sahip sığ dikdörtgen kaviteler üzerindeki laminar ve türbülanslı akışı  $k-\epsilon$  türbülans modeliyle iki boyutlu olarak çözerek, kavite içinde iki adet ters akış bölgesi oluştuğunu belirtmişlerdir. Wiswanathan vd. [8], aksel simetrik kavite akışını DES (Detached-Eddy Simulation) türbülans modeli ile inceledikleri çalışmalarında, kavite içinde ayrılmış akış bölgeleri oluştuğunu belirtmişlerdir. Suponitsky vd. [9], uzunluk/derinlik oranının 4 olduğu dikdörtgen kavite üzerindeki akışı LES (Large Eddy Simulation) türbülans modeli ile iki boyutlu çözerek kavitelere ortaya çıkan titreşim ve gürültü oluşum mekanizmasını incelemişlerdir. Lawson ve Barakos [10], yüksek hızlı türbülanslı kavite akışlarının sayısal simülasyonu konusunda bir literatür çalışması sunmuşlardır. Gupta ve Roy [11], Mach sayısının 0,1, 0,3 ve 0,5 değerleri için dikdörtgen bir kavite içerisindeki karışım tabakasından kaynaklanan akustik gürültüyü LES türbülans modeli ile sayısal olarak incelemişlerdir. Uygulamada kavite geometrileri dörtgen olmayan kaviteleri de içerecek şekilde geniş bir çeşitliliğe sahiptir. D'yachenko vd. [12], düşük uzunluk/derinlik oranına ve eğimli ön ve arka duvarlara sahip yamuk geometrisindeki kaviteler üzerindeki türbülanslı akışta, basınç dağılımlarını ve ısı transferi etkilerini deneysel incelemişlerdir. Özalp vd. [13], dikdörtgen, üçgen ve yarı-dairesel geometrilerdeki kaviteler üzerindeki laminar akış alanlarını PIV (Particle Image Velocimetry) yöntemi ile deneysel olarak incelemişlerdir. Düşük Re sayıları için su tüneline gerçekleştirdikleri ve akış yapısı üzerinde kavite tipi etkisini değerlendirdikleri çalışmada, türbülans şiddetinin kavite geometrisinden etkilendiğini belirtmişlerdir. Chang ve Cheng [14], yay şekilli kavite geometrilerinde laminar akışta akış ve ısı transferi karakteristiklerini akım fonksiyonu-vortisite denklemine çözümünden elde etmişlerdir. Yarı dairesel kavite üzerindeki iki boyutlu sıkıştırılmaz viskoz türbülanslı akış Glowinski vd. [15] tarafından sayısal olarak incelenmiştir. Ertürk ve Gökçöl [16], üçgen bir kavite içerisindeki sıkıştırılmaz laminar akışı yüksek Reynolds sayıları için sürekli rejimde iki boyutlu sayısal incelemiştir. Doa vd. [17], NACA 0015 kanadının uç kısmında bulunan dikdörtgen, üçgen ve yarı dairesel geometrilerdeki kaviteleri, Realizable  $k-\epsilon$  türbülans modeli ile zaman bağımlı olarak iki boyutlu çözerek kavite tipinin kanat arkasında oluşan iz bölgesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Zafer ve Coşgun [18], zaman bağımlı sıkıştırılmaz kavite akışının aeroakustik analizini düşük Reynolds ve Mach sayıları için farklı türbülans modelleri ile incelemişler ve sayısal sonuçları literatürde mevcut deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Literatürde mevcut çalışmalar dörtgen kavite geometrileri üzerine yoğunlaşmakta, alternatif kavite geometrilerine yönelik ve özellikle basınç dağılımlarının incelenmesini amaçlayan çalışmalar oldukça az sayıdadır. Bu durum, kavite geometrilerinin sistematik olarak değiştirildiği ve geometrideki bu değişimlerin akış alanına ve özellikle basınç dağılımlarına olan etkisini incelemeyi hedefleyen çalışmalara olan ihtiyacı ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, üçgen geometriden başlamak üzere kavitenin eğimli

duvarlarının yatayla yaptığı açının değişimi ile önce yamuk, sonra dörtgen ve son olarak ters yamuk geometrilerde ortaya çıkan kavite üzerindeki akış alanlarının deneysel ve sayısal incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, eğim açısının değiştirilmesiyle çeşitlendirilen kavite geometrilerinde, orta eksen boyunca yüzey basıncı ve hız dağılımlarındaki değişimler deneysel ve sayısal olarak elde edilip, geometrik değişikliğin akış alanı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

## 2. DENEYSEL METOD (EXPERIMENTAL METHOD)

Çalışmanın deneysel kısmında, farklı kavite geometrilerinin takılabildiği Şekil 1'de şematik olarak verilen deney düzeneği kullanılarak yüzey basıncı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 20°C sıcaklıkta, 1,21 kg/m<sup>3</sup> yoğunluk ve 1,82x10<sup>-5</sup> kg/ms dinamik viskozite değerlerine sahip atmosfer basıncındaki hava kullanılmıştır. Kavite düzeneğinde, fanın oluşturduğu basınçlı hava genişleme odasını geçtikten sonra düzgün hale gelerek dikdörtgen kesitli kapalı akış kanalına yönelmektedir. Daha sonra üçgen, yamuk, dikdörtgen ve ters yamuk şeklinde 4 farklı geometrideki kavite üzerinden geçen akış, kapalı kanal boyunca ilerledikten sonra ortama boşalmaktadır. Kavite geometrileri 5 mm et kalınlığına sahip pleksiglas malzeme ile oluşturulmuştur. Her bir kavite geometrisine akış doğrultusunda orta eksen boyunca 10 mm aralıklarla basınç prizleri yerleştirilmiştir. Basınç prizlerinin sayıları sırasıyla, üçgen kavite için 38, yamuk kavite için 41, dikdörtgen kavite için 44 ve ters yamuk kavite için 53 şeklindedir. Yüzey basıncı ölçümleri, Şekil 1'de görülen sistemle gerçekleştirilmiştir. Ölçme sisteminde, TSI IFA-100 System Intelligent Flow Analyzer cihazının Sinyal Şartlandırıcı modülü, basınç algılayıcı (Pressure Transducer), A/D dönüştürücü, veri analizi yapan bir paket program ve

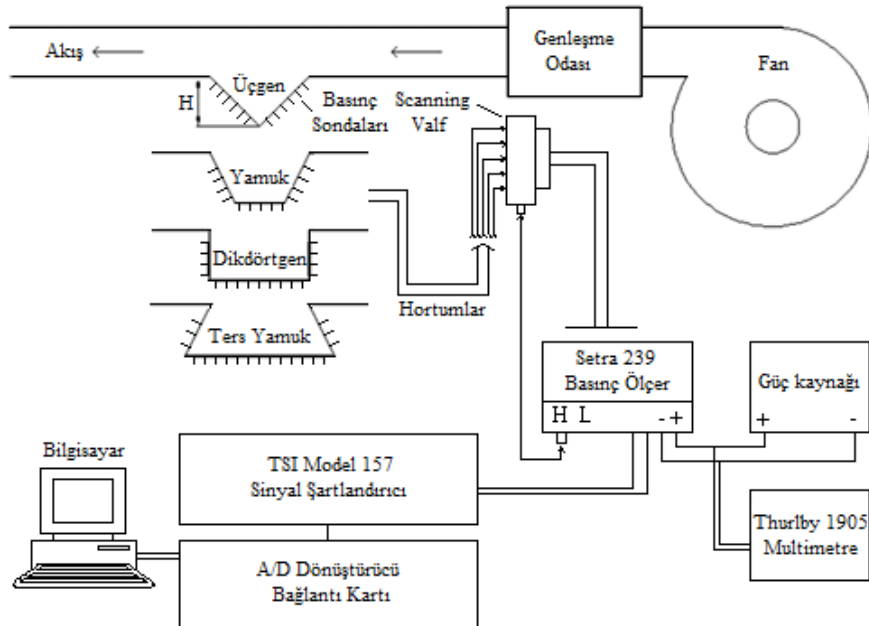
bilgisayar bulunmaktadır. Basınç sinyalleri, %0,14 hassasiyetli SETRA 239 Model Basınç Ölçer (Pressure Transducer) ile alınmış ve IFA 100 ThermalPro paket programı ile kaydedilmiştir. Tüm sinyaller 300 Hz de filtrelenerek, örnekleme oranı 1000 Hz ve ölçüm süresi 8 s olarak seçilmiştir. Kavite yüzeyleri üzerinde açılmış çok sayıda basınç prizinin basınç algılayıcısına bağlantısı, scanning valf ile sağlanmıştır. Yüzey basınç ölçümlerindeki belirsizlik  $\pm\%3,6$  civarındadır. Deneysel sonuçlar bu belirsizlik aralığında tekrarlanabilirlik göstermiştir. Şekil 2'de sırasıyla, üçgen, yamuk, dikdörtgen ve ters yamuk şeklinde 4 farklı kavite geometrisine ait boyut bilgileri görülmektedir. Kapalı akış kanalı, 600 mm uzunluğa, 60 mm yüksekliğe ve 120 mm genişliğe sahiptir. Kanalın alt kısmına aynı uzunluğa (L=120 mm) ve derinliğe (H=60 mm) sahip 4 farklı kavite haznesi eklenmiştir. Kavite haznesindeki geometrik değişiklik, hazne yan duvarlarının yatayla yaptığı açının artmasıyla oluşmaktadır. Çalışma kapsamındaki tüm kavite hazne geometrilerinde uzunluk/derinlik (L/H) oranı 2 olarak gerçekleştirilmiştir. Dikdörtgen kanal girişindeki serbest akım hızı TSI IFA-100 kızgın tel anemometre sistemi ile belirlenmiştir. Serbest akım hızı değeri 25 m/s olarak gerçekleştirilmiştir. Türbülans şiddeti serbest akım bölgesinde yaklaşık %2 değerinden kanal tabanı yakınında %6 ya kadar çıkmaktadır. Kavite yüksekliğine bağlı Reynolds sayısı 100000 değerindedir.

## 3. TEORİK METOD (THEORETICAL METHOD)

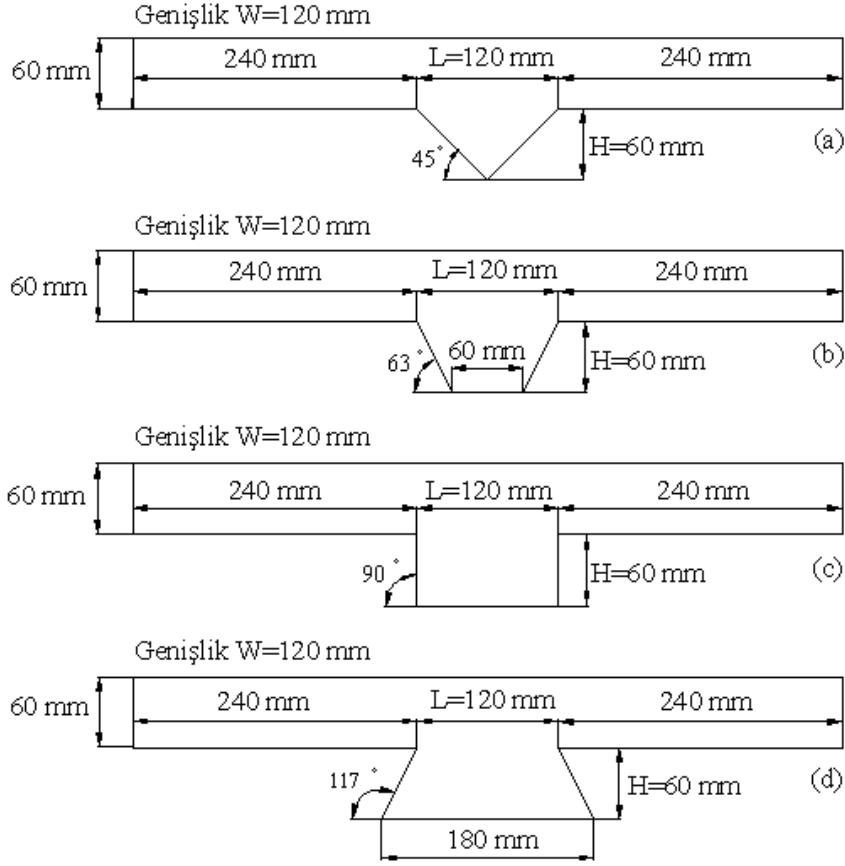
Sıkıştırılmaz bir akışkanın üç boyutlu sürekli hareketi kartezyen koordinatlarda,

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

şeklinde Eş. 1 ile süreklilik denklemi ve



Şekil 1. Deney düzeneği ve basınç ölçme sistemi (Experimental setup and pressure measurement system)



**Şekil 2.** Farklı kavite geometrilerine ait boyutlar (Dimensions of different cavity geometries)  
a) Üçgen (Triangular) b) Yamuk (Trapezoid) c) Dikdörtgen (Rectangular) d) Ters yamuk (Inverted trapezoid)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

şeklinde Eş. 2 ile Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemi olarak ifade edilmektedir. RANS denkleminde yer alan  $(-\rho \overline{u_i u_j})$  terimi Reynolds gerilmesi olarak adlandırılmakta ve Eş. 3 ile tanımlanmaktadır.

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

Sayısal çalışma kapsamında, Realizable k-ε ve Reynolds Stress türbülans modelleri ile akış alanlarının sürekli rejimde üç boyutlu çözümleri gerçekleştirilmiştir. Realizable k-ε türbülans modeli, türbülanslı akışın fiziği ile ilgili normal gerilmeler üzerindeki bazı matematiksel sınırlamaları aşmaya yönelik bir yaklaşım getirmektedir. k ve ε için modellenmiş transport denklemleri aşağıdaki şekilde sırasıyla Eş. 4 ve Eş. 5 olarak verilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (5)$$

Bu denklemlerde,  $G_k$ , ortalama hız gradyenti nedeniyle türbülanslı kinetik enerji üretimini,  $G_b$ , kaldırma kuvveti nedeniyle türbülanslı kinetik enerji üretimini ve  $Y_M$ , yutulmuş türbülanslı ısı enerjisi ile ilgili çalkantı oranını ifade etmektedir.  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$  türbülanslı Prandtl sayıları olup,  $S_k$  ve  $S_\varepsilon$  ise kaynak terimleridir. Türbülans viskozitesi aşağıda Eş. 6 olarak tanımlanmıştır.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

Model sabitleri  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ,  $C_2 = 1,9$ ,  $\sigma_k = 1,0$  ve  $\sigma_\varepsilon = 1,2$  şeklindedir.  $C_\mu$ , bu model için sabit değerdir.

Reynolds Stress türbülans modeli Reynolds gerilmelerinin modellenmesinde farklı bir yaklaşım sunmaktadır. Reynolds gerilme tensöründeki her bir terim için ayrı transport eşitlikler kullanılmaktadır. Reynolds Stress transport denklemi kapalı formda Eş. 7 ile verilmektedir.

$$C_{ij} = -D_{T,ij} + D_{L,ij} - P_{ij} - G_{ij} \quad (7)$$

Burada  $C_{ij}$ , konveksiyon,  $D_{T,ij}$ , türbülanslı difüzyon,  $D_{L,ij}$ , moleküler difüzyon,  $P_{ij}$ , gerilme üretimi ve  $G_{ij}$ , kaldırma üretimi terimlerini ifade etmektedir. Her bir terimi temsil eden eşitliklerin yerine yazılmasıyla Reynolds Stress transport denklemi açık formda Eş. 8 ile elde edilmiştir.

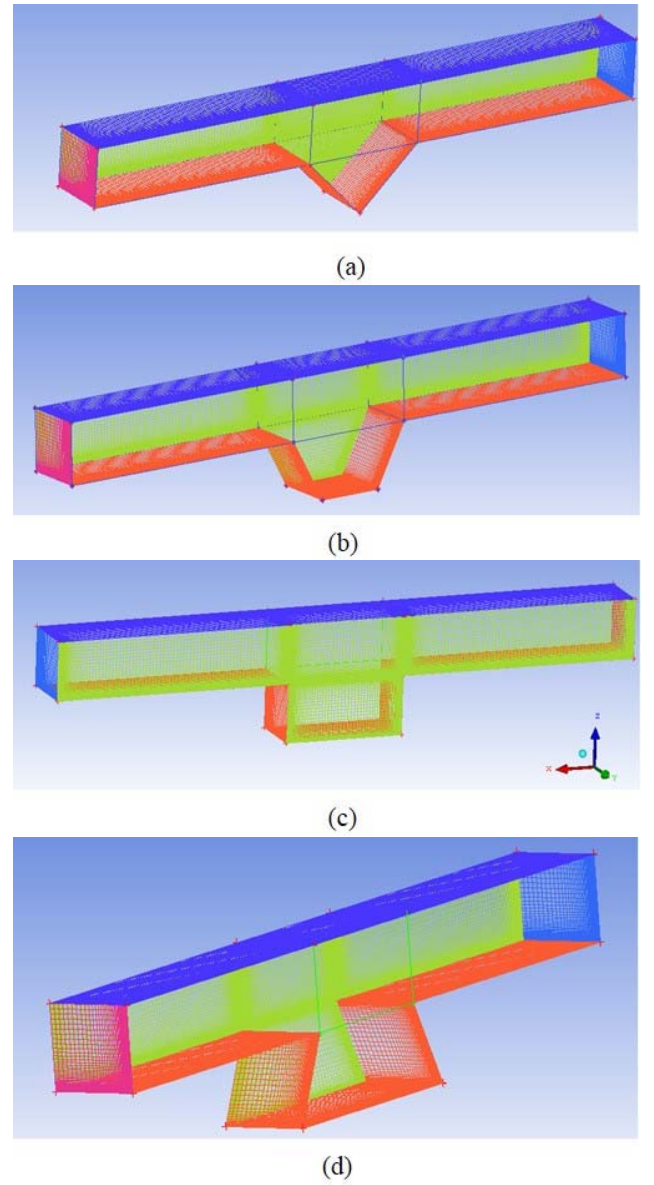
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho U_k \overline{u_i' u_j'}) &= - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \overline{\rho u_i' u_j' u_k'} + \overline{p (\delta_{jk} u_i' + \delta_{ik} u_j')} \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \mu \frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u_i' u_j'} \right) - \rho \left( \overline{u_i' u_k'} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right) \\ &- \rho \beta (g_i \overline{u_j' \theta} + g_j \overline{u_i' \theta}) \end{aligned} \quad (8)$$

Sonlu hacim yaklaşımını esas alan FLUENT yazılımı kullanılarak, akış alanının üç boyutlu sayısal çözümleri elde edilmiştir. Akış alanları için sınır şartları, girişte hız giriş koşulu (VELOCITY INLET), çıkışta basınç çıkış koşulu (PRESSURE OUTLET) ve duvarlarda ise duvar sınır koşulu (WALL) şeklinde kullanılmıştır. Duvar yaklaşımı olarak, daha kısa sürede yakınsama sağlaması nedeniyle iyileştirilmiş duvar yaklaşımı (Enhanced Wall Treatment) kullanılmıştır. İteratif çözücü olarak literatürde yaygın olarak kullanılan SIMPLEC algoritması esas alınmıştır. Çözümlerde daha hassas sonuçlar verdiği için, değişkenlerin ağ noktaları arasındaki değişimine yönelik Second Order Upwind yaklaşımı kullanılmıştır. Çözüm alanlarındaki ağ yapıları, Şekil 3'de görüldüğü gibi, katı yüzeylere yakın bölgelerde yoğunluğu artan bir düzende oluşturulmuştur. Hexahedral ağ yapısının kullanıldığı akış alanlarında ağdan bağımsız çözümler elde edebilmek için farklı sayıdaki ağ yapıları ile denemeler yapılmıştır. Bu şekilde oluşturulan ağ düzeni ile hesap alanında ağdan bağımsız çözümlerin sağlandığı yaklaşık 1,8 milyon ağ kullanılmıştır. Katı yüzeyler boyunca ilk ağ noktası için  $y^+ < 2$  olmaktadır. Normalize edilmemiş artıkların  $10^{-6}$ 'dan küçük olması koşulu, çözüm yakınsama kriteri olarak belirlenmiştir.

### 3.1. Sayısal Çözümün Doğrulanması (Validation of Numerical Solution)

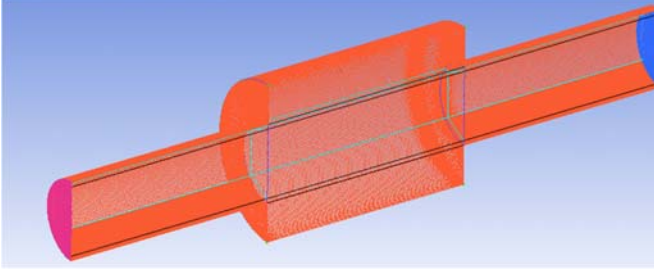
Sayısal çözümün doğruluğunu test etmek amacıyla; Lee ve Sung [3] tarafından gerçekleştirilmiş deneysel çalışmada kullanılan ve ani genişleyip daralan boru sisteminden oluşan uzunluğu  $L=300$  mm, derinliği  $H=55$  mm olan sığ kavite ( $L/H=5,45$ ) için Realizable k- $\epsilon$  ve Reynolds Stress türbülans modelleri ile sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Akışkanın hava olduğu durumda gerçekleştirilen sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlar, deneysel çalışmadaki mevcut verilerle kavite tabanı boyunca boyutsuz basınç katsayısı ( $C_p$ ) değişimi ve genişlemiş boru bölümü boyunca farklı konumlarda ortalama hız ve türbülans kinetik enerjisi profilleri şeklinde karşılaştırılmıştır. 110 mm çapındaki bir borunun 300 mm uzunluk boyunca 220 mm çapa ani genişleyip tekrar daraldığı ve  $L/H=5,45$  oranında dikdörtgen bir sığ kavitenin olduğu geometriye ait ağ yapısı Şekil 4'de görülmektedir. Kavite tabanı boyunca, iki farklı türbülans modeli ile hesaplanmış ve Lee ve Sung [3] tarafından ölçülmüş basınç dağılımları boyutsuz basınç katsayısı ( $C_p$ ) olarak Şekil 5'de verilmiştir. Kavite tabanı başından itibaren

yaklaşık aynı negatif değerlerden oluşan basınç katsayısı değerleri, kavite tabanının sonunda pozitif pik değerler almaktadır. Her iki türbülans modeli ile hesaplanmış basınç katsayısı değerlerinin deneysel verilerle uyumlu olduğu, Reynolds Stress türbülans modelinin basınç katsayılarını deneysel verilere daha yakın hesapladığı görülmektedir. Şekil 6'da kavite boşluğu boyunca farklı istasyonlarda çizilmiş ortalama hız ve türbülans kinetik enerjisi profilleri görülmektedir. Ortalama hız profilleri x doğrultusunda farklı istasyonlarda yerel hız bileşenlerinin ortalama değerlerinden oluşmaktadır. Realizable k- $\epsilon$  ve Reynolds Stress türbülans modelleri ile hesaplanmış profiller deneysel sonuçlarla genel olarak uyumlu olmakta, bu uyum ortalama hız profillerinde daha yüksek düzeyde gerçekleşmektedir.



**Şekil 3.** Farklı kavite geometrilerine ait ağ yapıları (Mesh arrangement of different cavity geometries)  
a) Üçgen (Triangular) b) Yamuk (Trapezoid) c) Dikdörtgen (Rectangular) d) Ters yamuk (Inverted trapezoid)

Basınç dağılımlarındaki duruma benzer şekilde yine Reynolds Stress türbülans modeli ile elde edilmiş sonuçlar deneysel verilere daha yakın olmaktadır. Kullanılan türbülans modellerinin deneysel sonuçlar karşısındaki hassasiyetinin değerlendirildiği bu ön çalışma sonucunda, kavite akışına yönelik hem basınç dağılımlarının hem de ortalama hız ve türbülans kinetik enerjisi dağılımlarının belirlenmesinde Realizable k-ε ve Reynolds Stress türbülans modellerinin yeterli olduğu, Reynolds Stress türbülans modeli ile hesaplanan sonuçların deneysel verilerle daha uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 4. Genişleyip daralan boru sistemine ait ağ yapısı (Mesh arrangement of axisymmetric cavity geometry)

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

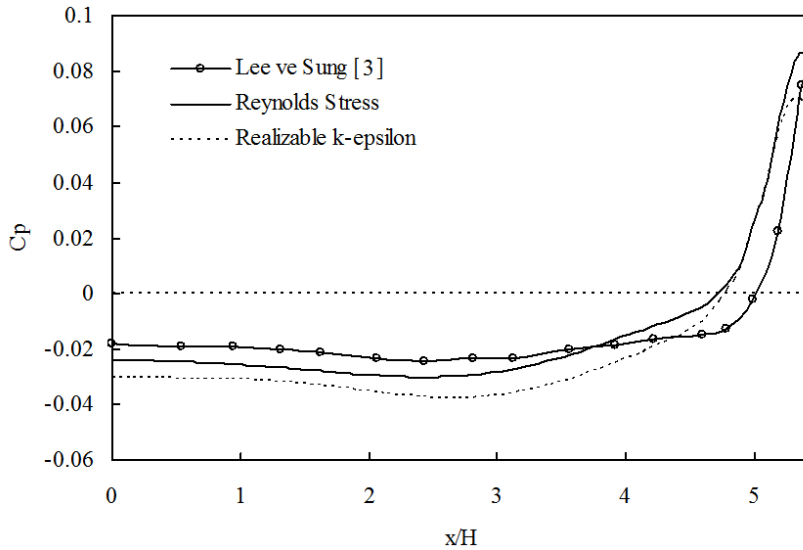
Bu çalışmada, kavite geometrisindeki değişikliğin akış alanına etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmanın deneysel kısmı, farklı kavite geometrileri üzerinde yüzey basınçlarının ölçülmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. H kavite derinliğine göre tanımlanmış Reynolds sayısının 100000 değeri için, üçgen, yamuk, dikdörtgen ve ters yamuk geometrileri üzerinde akış doğrultusunda orta eksen boyunca yüzey basıncı ölçümleri yapılmıştır. ΔP, yüzey basıncı ve ortam basıncı arasındaki fark olmak üzere ölçüm sonuçları Eş. 9 ile tanımlanan basınç katsayısı cinsinden verilmiştir.

$$C_p = \frac{\Delta P}{\rho U_0^2 / 2} \quad (9)$$

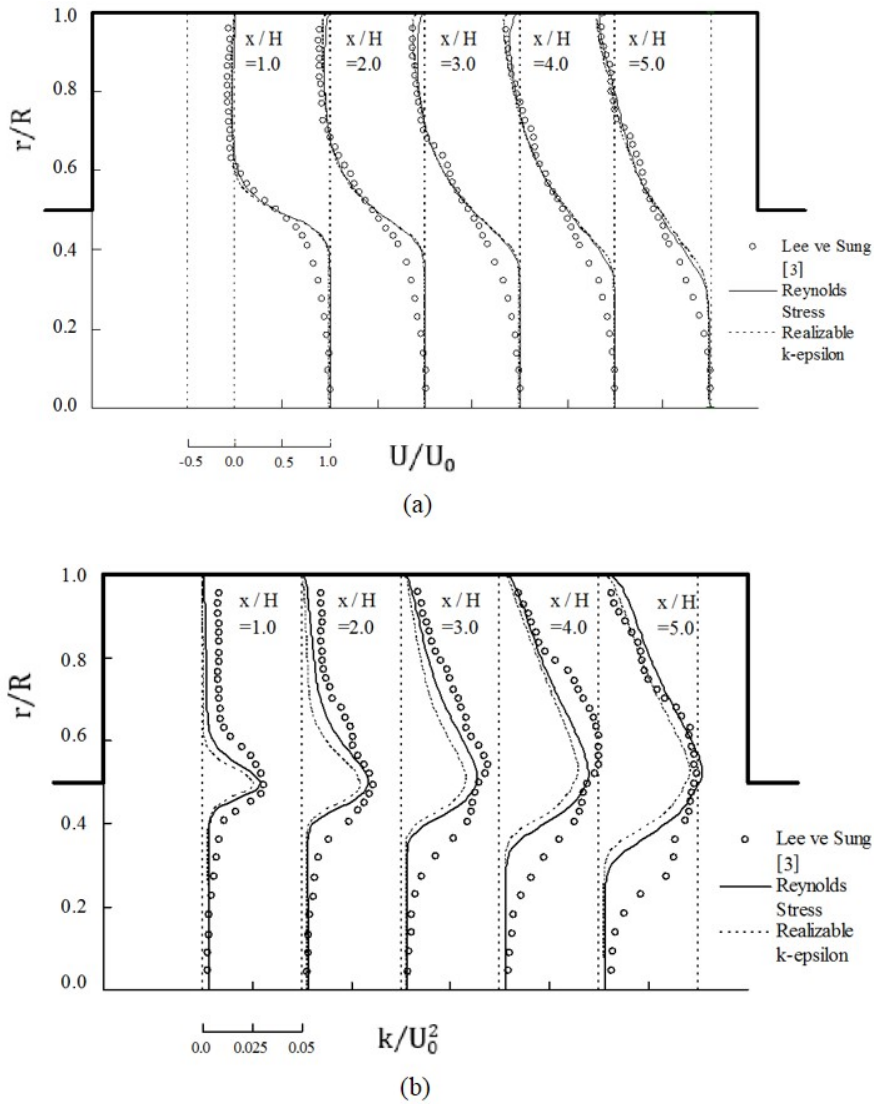
Burada  $U_0$ , kapalı kanal girişindeki serbest akış hızını,  $\rho$  ise akışkan yoğunluğunu göstermektedir. Yüzey boyunca uzaklık (x) akış doğrultusunda toplam duvar uzunluğu ( $L_T$ ) ile boyutsuz yapılmıştır. Çalışmanın sayısal kısmında ise, üçgen, yamuk, dikdörtgen ve ters yamuk geometriye sahip kavite içindeki akış alanları Realizable k-ε ve Reynolds Stress türbülans modelleri kullanılarak zaman bağımsız olarak üç boyutlu çözülmüştür. Sayısal sonuçlar, kaviteler içinde akış çizgileri, akış doğrultusunda kavite yüzeyleri boyunca basınç dağılımları ve kavite boşlukları boyunca farklı istasyonlarda elde edilmiş ortalama hız ve türbülans kinetik enerjisi profilleri şeklinde değerlendirilmiştir.

##### 4.1. Akım Çizgileri (Flow Lines)

Sayısal çalışmadan elde edilmiş, üçgen, yamuk, dikdörtgen ve ters yamuk kaviteler içindeki akış yapıları, akım çizgisi formunda Şekil 7'de verilmiştir. Üçgen ve dikdörtgen geometrideki kaviteler için Özalp vd. [13] tarafından PIV ile elde edilmiş akım çizgilerinin de karşılaştırmalı olarak verildiği görüntülerde, geometriye bağlı olarak kaviteler içinde girdap yapılarının oluştuğu görülmektedir. Üçgen kavite için her iki türbülans modeli ile elde edilmiş akım çizgileri de deneysel görüntüyle benzerlik göstermektedir (Şekil 7a - Şekil 7c). Yamuk kavite için Realizable k-ε ve Reynolds Stress türbülans modelleri ile elde edilen akım çizgileri arasında farklılık oluşmaktadır. (Şekil 7 d - Şekil 7e). Üçgen kavitede olduğu gibi, dikdörtgen kavite akışında da sayısal ve deneysel olarak elde edilmiş akım çizgileri arasında benzerlik söz konusu olmaktadır (Şekil 7 f - Şekil h). Ters yamuk kavitede Reynolds Stress türbülans modeli ile elde edilmiş akım çizgileri birbirine göre ters yönde dönen bir girdap çiftini gösterirken, Realizable k-ε türbülans modeli ile elde edilmiş akım çizgileri tek girdap göstermektedir (Şekil 7i - Şekil 7j). Hem üçgen hem de



Şekil 5. Kavite tabanı boyunca basınç katsayısı dağılımı (Distribution of pressure coefficient along cavity base)



**Şekil 6.** Kavite tabanı boyunca ortalama hız ve türbülans kinetik enerji profilleri (Mean velocity and turbulence kinetic energy profiles along cavity base) (a) Ortalama hız (Mean velocity) (b) Türbülans kinetik enerji (Turbulence kinetic energy)

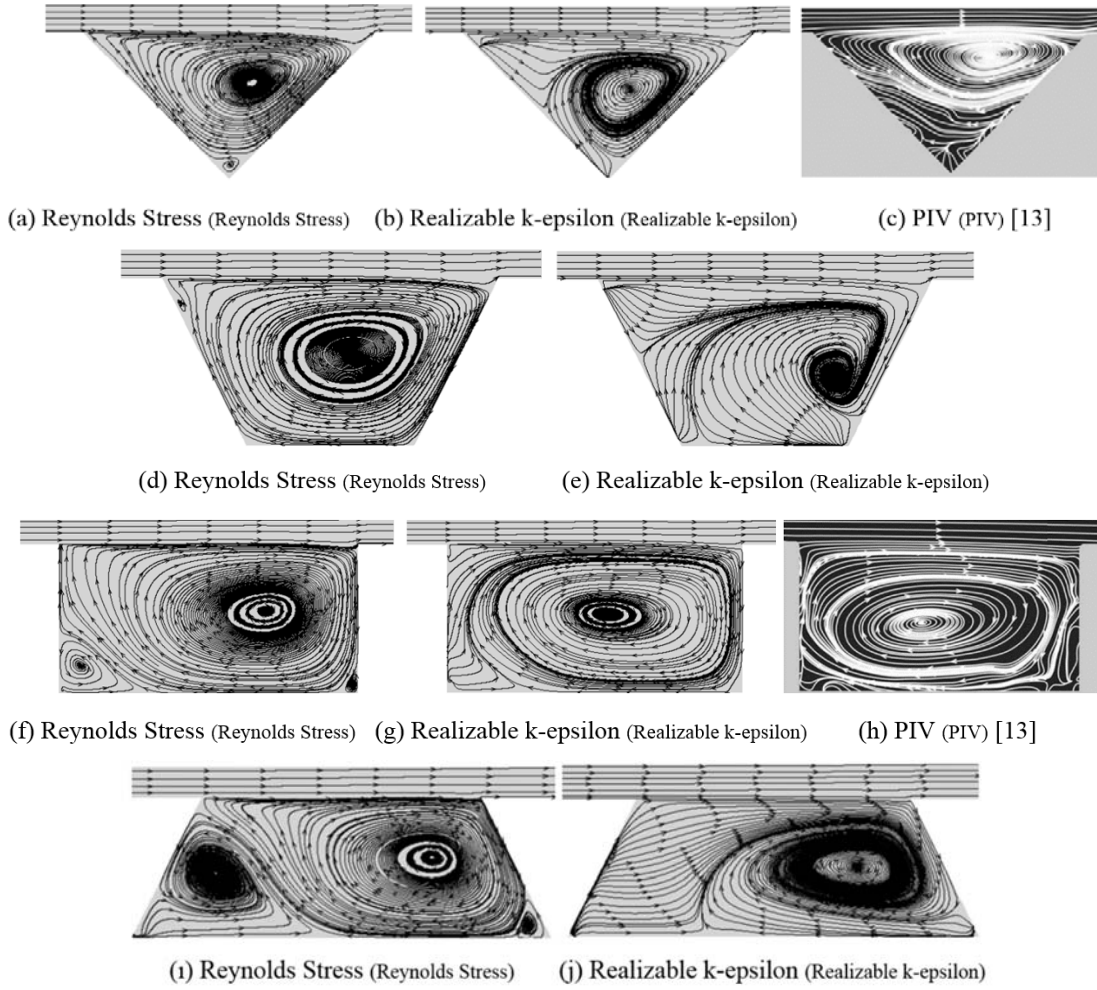
dikdörtgen kavite için deneysel sonuçla olan karşılaştırma, Reynolds Stress türbülans modeli ile elde edilen akış yapısının deneysel görüntüyle daha uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır.

#### 4.2. Basınç Katsayıları (Pressure Coefficients)

Üçgen, yamuk, dikdörtgen ve ters yamuk kavitelere akış doğrultusunda orta eksen boyunca deneysel ve sayısal olarak elde edilmiş basınç dağılımları basınç katsayısı şeklinde sırasıyla Şekil 8a - Şekil d' de verilmektedir. Üçgen kavitede, A yüzeyinde küçük ölçekli pozitif piklerin bulunduğu sinüsoidal bir yapı oluşmakta ve basınç katsayısı sıfır civarında dalgalanmaktadır. B yüzeyinin orta kısmında negatif pik, üst ucu yakınında ise basınç artışı nedeniyle büyük ölçekli pozitif pik oluşmakta ve tam uç noktada basınç katsayısı sıfır değerine azalmaktadır. A ve B yüzeylerinin birleşim noktasında basınç katsayısı sıfır olmaktadır (Şekil

8a). Yamuk kavitede, A, B ve C yüzeylerinde sinüsoidal bir basınç dağılımı ortaya çıkmaktadır. Küçük ölçekli pozitif ve negatif pik basınçlardan oluşan bu dağılım, C yüzeyinin üst ucuna doğru basınç artışı ile pozitif bir pik oluşturmakta ve C yüzeyinin uç noktasında tekrar azalmaktadır. Negatif piklerin yüzeylerin orta kısmında, pozitif piklerin ise yüzeylerin birleşim noktalarında olduğu görülmektedir. Yamuk kavite yüzeylerindeki basınç dağılımı üçgen kavite için elde edilen basınç dağılımına benzerlik göstermektedir (Şekil 8b). Dikdörtgen kavitede, A yüzeyinde basınç katsayılarının hemen hemen sıfır olduğu, B yüzeyinin orta kısmında negatif pik basıncın olduğu, C yüzeyinde ise itme etkisi nedeniyle pozitif basınçların olduğu görülmektedir. B ve C yüzeylerinin birleşim noktasında ve C yüzeyinin üst uç noktası yakınında pozitif pik basınçlar oluşmaktadır. (Şekil 8c). Ters yamuk kavitede, A yüzeyinde basınç katsayılarının sıfır civarında olduğu görülmektedir. B yüzeyinin orta bölümünde negatif pik değerler alan basınç





**Şekil 7.** Farklı kavite geometrilerinde akım çizgileri (Flow lines of different cavity geometries)  
 (a)-(b)-(c) Üçgen (Triangular), (d)-(e) Yamuk (Trapezoid), (f)-(g)-(h) Dikdörtgen (Rectangular),  
 (i)-(j) Ters yamuk (Inverted trapezoid)

katsayıları, B ve C yüzeylerinin birleşim noktasında pozitif pik değerler oluşturmaktadır. C yüzeyinde azalan basınç katsayıları, yüzeyin uç kısmında küçük ölçekli ikincil bir pozitif pik oluşturmaktadır. Ters yamuk kavite yüzeylerindeki basınç dağılımı dikdörtgen kavite için elde edilen basınç dağılımına benzerlik göstermektedir (Şekil 8d). Hem Realizable k- $\epsilon$  hem de Reynolds Stress türbülans modeli ile elde edilen basınç dağılımlarının deneysel verilerle uyumlu olduğu, ancak Reynolds Stress türbülans modelinin basınç katsayılarını deneysel sonuçlara biraz daha yakın hesapladığı görülmektedir. Basınç dağılımları kavite geometrisinden etkilenmektedir. Üçgen ve yamuk geometrilerdeki kavitelere ait basınç dağılımları ile dikdörtgen ve ters yamuk geometrilerdeki kavitelere ait basınç dağılımları kendi aralarında benzerlik göstermektedir. Kavite yüzeylerinde oluşan negatif pik basınçlar, kavite boşluklarında oluşan ters akış bölgelerinden etkilenmektedir.

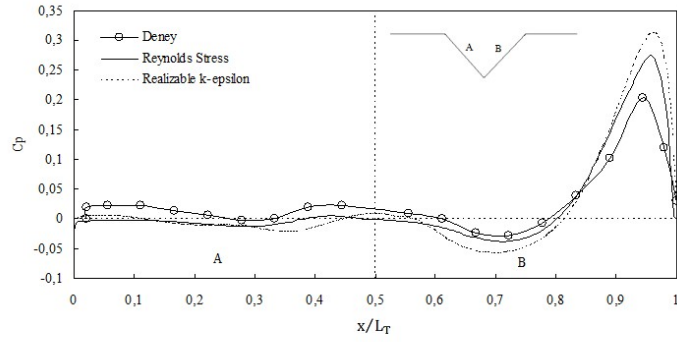
#### 4.3. Ortalama Hız Profilleri (Mean Velocity Profiles)

Şekil 9a-d sırasıyla üçgen, yamuk, dikdörtgen ve ters yamuk geometrideki kavite boşlukları boyunca akış doğrultusunda

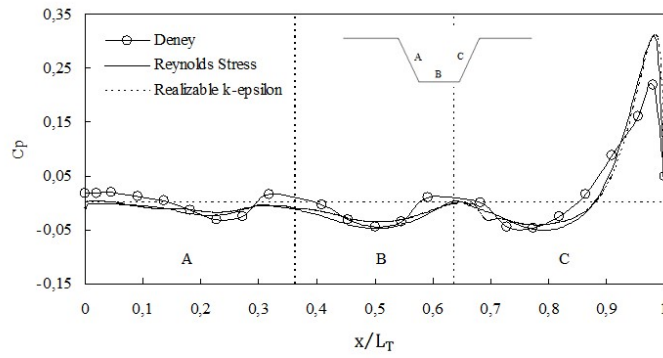
farklı istasyonlarda Realizable k- $\epsilon$  ve Reynolds Stress türbülans modelleri ile hesaplanmış ortalama hız profillerini göstermektedir. Kavite ön kenarından itibaren akış ayrılmaktadır. Kavite boşluklarındaki hız profillerinde negatif değerlerin olması, bu boşluklarda ters akış bölgelerinin oluştuğunu göstermektedir. Bu durumu akış çizgilerinin oluşturduğu girdap yapıları desteklemektedir. Akış doğrultusuna ters yöndeki hızların maksimum değerleri kavite boşluklarının orta istasyonlarında taban yüzeylerine yakın bölgelerde oluşmaktadır. Kavite boşluklarının üst sınırından itibaren ortalama hızlar serbest akış hızı düzeyindedir. Hem Realizable k- $\epsilon$  hem de Reynolds Stress türbülans modeli ortalama hız profillerini benzer hesaplamaktadır.

#### 4.4. Türbülans Kinetik Enerji Profilleri (Turbulence Kinetic Energy Profiles)

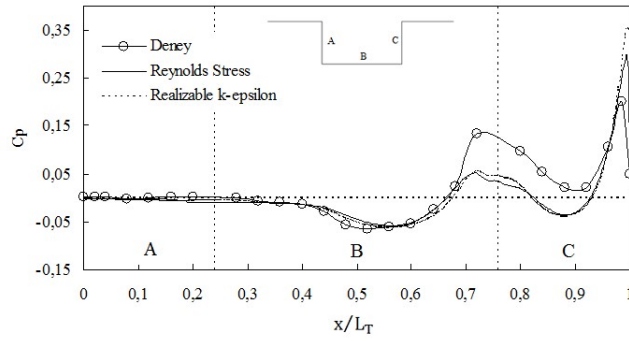
Kavite boşlukları boyunca akış doğrultusunda farklı istasyonlarda Realizable k- $\epsilon$  ve Reynolds Stress türbülans modelleri ile hesaplanmış türbülans kinetik enerjisi profilleri sırasıyla üçgen, yamuk, dikdörtgen ve ters yamuk için Şekil 10a - Şekil 10d'de verilmiştir.



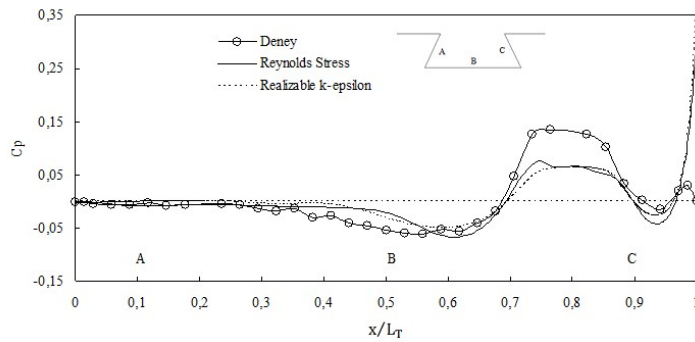
(a)



(b)

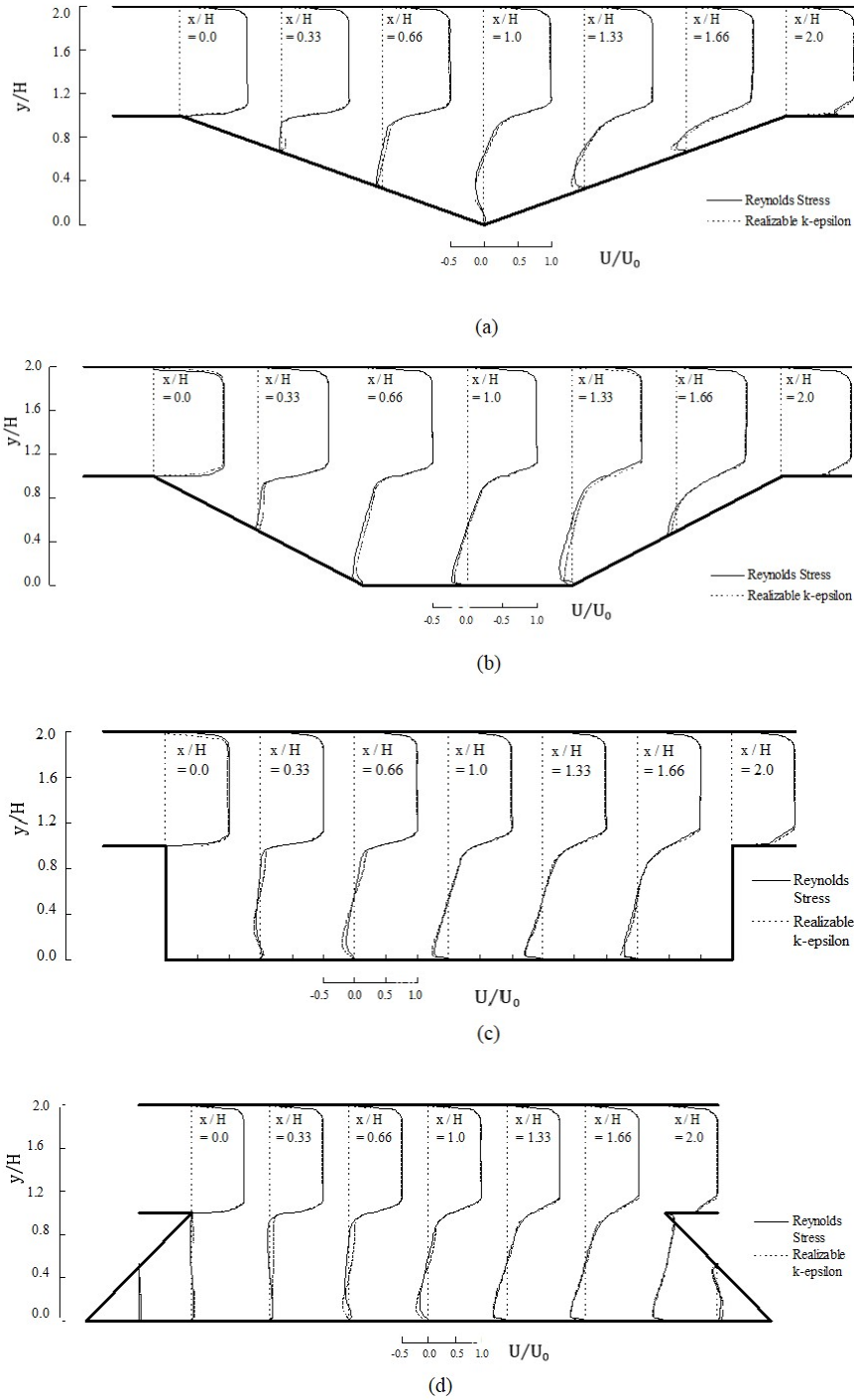


(c)



(d)

**Şekil 8.** Farklı kavite geometrilerinde basınç katsayıları (Pressure coefficients in different cavity geometries)  
a) Üçgen (Triangular) b) Yamuk (Trapezoid) c) Dikdörtgen (Rectangular) d) Ters yamuk (Inverted trapezoid)



**Şekil 9.** Farklı kavite geometrilerinde ortalama hız profilleri (Mean velocity profiles in different cavity geometries)

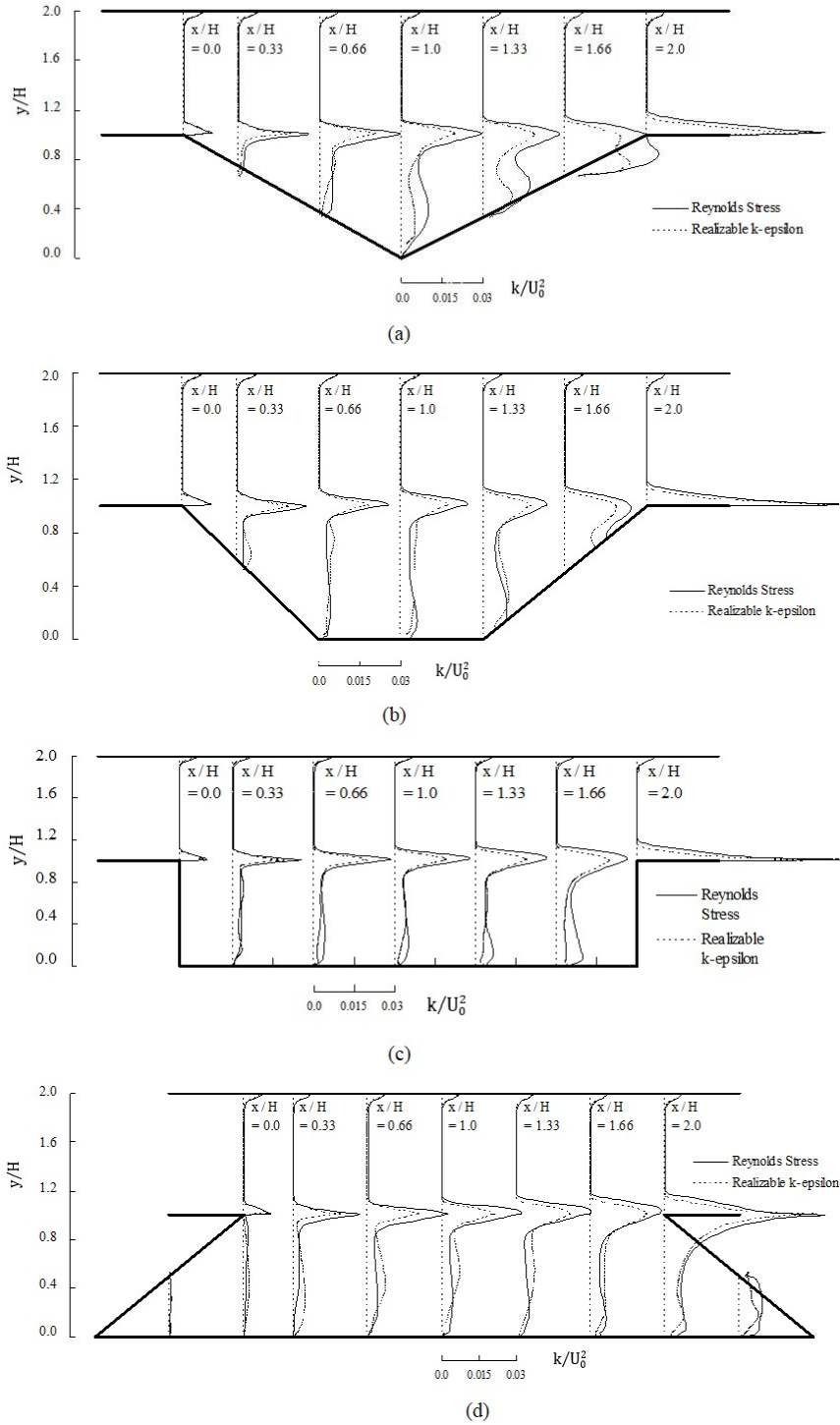
a) Üçgen (Triangular) b) Yamuk (Trapezoid) c) Dikdörtgen (Rectangular) d) Ters yamuk (Inverted trapezoid)

İncelenen tüm kavitelere serbest akış ile kavite boşluklarında oluşmuş ters akışlar arasındaki tampon bölgelerde türbülans kinetik enerjisi değerlerinde artış olmaktadır. Türbülans şiddetindeki bu artışlar, akış doğrultusunda ilerleyen istasyonlarda daha kritik olup, boşlukların bitimindeki istasyonlarda daha yüksek değerlerine ulaşmaktadır. Realizable k-ε ve Reynolds Stress türbülans modelleri ile hesaplanmış türbülans kinetik enerjisi profilleri

arasında fark oluşmakta, Reynolds Stress türbülans modeli özellikle maksimum türbülans kinetik enerjisini daha büyük değerlerde hesaplamaktadır.

## 5. SİMGELER (SYMBOLS)

$C_{ij}$  : Konveksiyon  
 $C_p$  : Basınç katsayısı [ $\Delta P / (\rho U_0^2/2)$ ]



**Şekil 10.** Farklı kavite geometrilerinde türbülans kinetik enerji profilleri (Turbulence kinetic energy profiles in different cavity geometries) a) Üçgen (Triangular) b) Yamuk (Trapezoid) c) Dikdörtgen (Rectangular) d) Ters yamuk (Inverted trapezoid)

$C_{1\epsilon}, C_2, C_\mu$ : Model sabitleri	$L$ : Kavite uzunluğu [m]
$D_{T,ij}$ : Türbülanslı difüzyon	$L_T$ : Kavite yüzeylerinin toplam uzunluğu [m]
$D_{L,ij}$ : Moleküler difüzyon	$k$ : Türbülans kinetik enerjisi [ $m^2/s^2$ ]
$G_{ij}$ : Kaldırma üretimi	$\Delta P$ : Atmosferik basınç ve yüzey basıncı arasındaki fark [ $N/m^2$ ]
$G_k, G_b$ : Türbülanslı kinetik enerji üretimi	$P$ : Basınç [ $N/m^2$ ]
$H$ : Kavite derinliği [m]	

$P_{ij}$	: Gerilme üretimi
Re	: Reynolds sayısı [ $U_0H/\nu$ ]
$S_k, S_e$	: Kaynak terimi
$U_0$	: Serbest akış hızı [m/s]
u, v, w	: x, y, z doğrultularında hız bileşenleri [m/s]
u $\tau$	: Kayma hızı [m/s]
x	: Kavite uzunluğu boyunca uzaklık [m]
y	: Kavite derinliği boyunca uzaklık [m]
$y^+$	: Boyutsuz mesafe [ $y^+=y\nu_\tau/v$ ]
$Y_M$	: Çalkantı oranı
W	: Kavite genişliği [m]
z	: Kavite genişliği boyunca uzaklık [m]
$\nu$	: Kinematik viskozite [ $m^2/s$ ]
$\rho$	: Havanın yoğunluğu [ $kg/m^3$ ]
$\epsilon$	: Türbülans yutulma oranı [ $m^2/s^3$ ]
$\mu$	: Viskozite
$\mu_t$	: Türbülanslı viskozite
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$	: Prandtl sayısı

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, kavite geometrisindeki değişikliğin akış alanına etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Geometriye bağlı olarak kavite içinde girdap yapıları oluşmaktadır. Basınç dağılımları kavite geometrisinden etkilenmektedir. Üçgen ve yamuk geometrilerde, kavite yüzeyleri boyunca basınç katsayıları sinüsoidal bir dağılım göstermektedir. Dikdörtgen ve ters yamuk geometrilerde, kavite tabanlarının orta bölümünde basınç katsayıları negatif pik değerler almaktadır. Üçgen ve yamuk geometrilerdeki kavitelere ait basınç dağılımları ile dikdörtgen ve ters yamuk geometrilerdeki kavitelere ait basınç dağılımları kendi aralarında benzerlik göstermektedir. Kavite ön kenarından itibaren akış ayrılmakta ve kavite boşluklarında ters akış bölgeleri oluşmaktadır. Oluşan ters akış bölgelerinin geometrik formu, kavite yüzeylerinde oluşan negatif pik basınçları etkilemektedir. Kavite boşluklarındaki hız profillerinde negatif değerler yer almaktadır. Hız profillerindeki negatif değerler, bu boşluklarda ters akış bölgelerinin oluştuğunu göstermektedir. Bu durumu akış çizgilerinin oluşturduğu girdap yapıları desteklemektedir. Akış doğrultusuna ters yöndeki hızların maksimum değerleri kavite boşluklarının orta istasyonlarında taban yüzeylerine yakın bölgelerde oluşmaktadır. Kavite boşluklarının üst sınırından itibaren ortalama hızlar serbest akış hızı düzeyindedir. Kavite serbest akış ile kavite boşluklarında oluşan ters akışlar arasındaki tampon bölgelerde türbülans kinetik enerjisi değerlerinde artış olmaktadır. Türbülans şiddetindeki bu artışlar, akış doğrultusunda ilerleyen istasyonlarda daha kritik olup, boşlukların bitimindeki istasyonlarda en yüksek değerlerine ulaşmaktadır. Hem Realizable k- $\epsilon$  hem de Reynolds Stress türbülans modeli ile elde edilen sayısal sonuçlar deneysel verilerle uyumlu olmakta, Reynolds Stress türbülans modeli ile elde edilen sonuçlar deneysel verilere biraz daha yakın olmaktadır. Üçgen, yamuk, dikdörtgen ve ters yamuk geometrilerde ait akış alanlarından elde edilen sonuçların bir arada değerlendirilmesi, geometrideki radikal değişikliklerin

basınç ve hız dağılımları üzerindeki etkilerini belirlemek açısından literatüre katkı sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Özsoy E., Aslan A.R., Üç boyutlu bir kavite üzerindeki sıkıştırılmaz akışın sayısal bir yöntemle analizi, itüdergisi/d, 10 (3), 149-159, 2011.
2. Rockwell D., Naudascher E., Review self sustaining oscillations of flow past cavities, Journal of Fluid Mechanics, 100, 152-165, 1978.
3. Lee D.H., Sung H.J., Experimental study of turbulent axisymmetric cavity flow, Experiments in Fluids, 17, 272-281, 1994.
4. Chung K.M., Three dimensional effect on transonic rectangular cavity flows, Experiments in Fluids, 30, 531-536, 2001.
5. Grace S.M., Dewar W.G., Wroblewski D.E., Experimental investigation of the flow characteristics within a shallow wall cavity for both laminar and turbulent upstream boundary layers, Exp. Fluids, 36, 791-804, 2004.
6. Mesalhy O.M., Abdel Aziz S.S., El-Sayed M.M., Flow and heat transfer over shallow cavities, International Journal of Thermal Science, 49, 514-521, 2010.
7. Zdanski P.S.B., Ortega M.A., Fico Jr N.G.C.R., On the flow over cavities of large aspect ratio: A physical analysis, Int. Commun. Heat Mass Transfer, 33, 458-466, 2006.
8. Wiswanathan A.K., Squires K.D., Forsyth J.R., Detached eddy simulation of the flow over an axisymmetric cavity, 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno-NV, United States, 06-09 January, 2003.
9. Suponitsky V., Avital E., Gaster M., On three dimensionality and control of incompressible cavity flow, Physics of Fluids, 17, 104103, 2005.
10. Lawson S.J., Barakos G.N., Review of numerical simulations for high speed turbulent cavity flows, Progress in Aerospace Sciences, 47, 186-216, 2011.
11. Gupta A., Roy S., Noise control of cavity flows for subsonic flows, 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech, 1525, 2015.
12. D'yachenko A.Y., Terekhov V.I., Yarygina N.I., Vortex formation and heat transfer in turbulent flow past a transverse cavity with inclined frontal and rear walls, International Journal of Heat and Mass Transfer, 51, 3275-3286, 2008.
13. Özalp C., Pınarbaşı A., Şahin B., Experimental measurement of flow past cavities of different shapes, Experimental Thermal and Fluid Science, 34, 505-515, 2010.
14. Chang M.H., Cheng C.H., Predictions of lid-driven flow and heat convection in an arc-shape cavity, Int. Commun. Heat Mass Transfer, 26, 829-838, 1999.
15. Glowinski R., Guidoboni G., Pan T.W., Wall driven incompressible viscous flow in a two dimensional semi circular cavity, J. Comput. Phys., 216, 76-91, 2006.

16. Erturk E., Gokcol O., Fine grid numerical solutions of triangular cavity flow, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 38, 97-105, 2007.
17. Doa T., Chen L., Tua J., Numerical study of turbulent trailing edge flows with base cavity effects using URANS, *Journal of Fluids and Structures*, 26, 1155–1173, 2010.
18. Zafer B., Coşgun F., Aeroacoustics investigation of unsteady incompressible cavity flow, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (3), 665–675, 2016.