

**SÜPERSONİK KAVİTELERDEKİ AKIŞIN SAYISAL ANALİZİ**

**ÜLKÜ ECE AYLI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2012**

**ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

---

Prof. Dr. Ünver Kaynak  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

---

Prof. Dr. Ünver Kaynak  
Anabilim Dalı Başkanı

Ülkü Ece Aylı tarafından hazırlanan SÜPERSONİK KAVİTELERDEKİ AKIŞIN SAYISAL ANALİZİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

---

Doç. Dr. Selin ARADAĞ  
Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Sıtkı Uslu

Üye : Doç. Dr. Selin ARADAĞ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ekin BİNGÖL (Atılım Üni.)

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ülkü Ece AYLI

<b>Üniversitesi</b>	<b>: TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi</b>
<b>Enstitüsü</b>	<b>: Fen Bilimleri</b>
<b>Anabilim Dalı</b>	<b>: Makine Mühendisliği</b>
<b>Tez Danışmanı</b>	<b>: Doç. Dr. Selin ARADAĞ</b>
<b>Tez Türü ve Tarihi</b>	<b>: Yüksek Lisans – Haziran 2012</b>

**Ülkü Ece AYLİ**

## **SÜPERSONİK KAVİTELERDEKİ AKIŞIN SAYISAL ANALİZİ**

### **ÖZET**

Bu çalışmada uçakların mühimmat depolayan bölümlerini temsil eden süpersonik açık kaviteleredeki türbülanslı ve zamana bağlı değişen akışın davranışını, karmaşık yapısını açıklamak ve ortaya koymak amaçlanmıştır. Kavite çevresindeki yüksek hızlar akış alanında birçok karmaşık yapı oluşturmaktadır ve bu da havacılık uygulamalarında önemli bir sorunu doğurmaktadır. Bu doğrultuda literatürde kavite akış fiziğinin anlaşılması amacı ile gerçekleştirilen birçok deneysel ve sayısal çalışma bulunmaktadır.

Tez kapsamında iki boyutlu ve üç boyutlu akış simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Zamana-bağlı sıkıştırılabilir Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (URANS) denklemleri süpersonik kavite akışı için çözülmüştür. Sayısal parametrelerin ve kavite uzunluk/derinlik oranının akış üzerine etkileri incelenmiştir. HAD (Hesaplama Akışkanlar Dinamiği) analizlerinin sonuçları literatürde aynı parametrelerde gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışma ile ses basınç seviyeleri (SPL) ve basınç kat sayısı dağılımı cinsinden kıyaslanmıştır.

Süpersonik kavite akışının doğası ve fiziği araştırılmıştır. İki boyutlu ve üç boyutlu analiz sonuçları karşılaştırılmış ve üç boyut etkilerinin ihmal edilmemesi gerektiği saptanmıştır. Kavite üzerinde yüksek hızlı akışlar, karmaşık, zamana bağlı değişen zor bir akış alanı yaratmaktadır. Bu karmaşık akış içinde basınç dalgalanmaları ve rezonans oluşumu vardır. Kavite uzunluğu kavite akışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olup, akışın yapısında değişikliklere neden olabilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Süpersonik Akış, Hesaplama Akışkanlar Dinamiği, Kavite

**University** : TOBB Economics and Technology University  
**Institute** : Institute of Natural and Applied Sciences  
**Science Programme** : Mechanical Engineering  
**Supervisor** : Associate Professor Dr. Selin ARADAĞ  
**Degree Awarded and Date** : M.Sc. – June 2012

**Ülkü Ece AYLI**

## **NUMERICAL ANALYSIS OF SUPERSONIC CAVITY FLOW**

### **ABSTRACT**

In this research, internal carriage of stores which is modeled by supersonic rectangular cavity is studied according to explain turbulent, unsteady and complex flow field in the cavity region. High speed flows over open cavities can produce complex unsteady flow fields that are important practical concern in aerospace applications. Therefore to understand the nature of the supersonic flow over an open cavity numerous numerical and experimental studies are performed.

In this study, two and three dimensional simulations are performed. Unsteady, compressible and time dependent Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS) equations are solved for supersonic cavity flow. The effects of numerical parameters and cavity length to depth ratio effects are investigated. The results of the CFD analyses are compared by using the experimental values which are obtained from the experiment with the same flow parameters, for sound pressure levels (SPL) and pressure coefficient distribution given in literature.

Supersonic cavity flow physics and flow nature is analyzed. Two dimensional and three dimensional simulation results are compared with each other and it is stated that three dimensional effects cannot be neglected. High speed flow over the cavity creates complex, unsteady and difficult flow field. In this complex flow field, pressure fluctuations and resonance takes place. Cavity length has an important effect on the cavity flow.

**Keywords:** Supersonic Flow, Computational Fluid Dynamics, Cavity

## TEŞEKKÜR

Akademisyenlik yolunda attığım bu ilk adımda desteğini hiç eksik etmeyen, hoşgörü ve sabır ile beni yönlendiren, tecrübelerinden ve derin bilgi birikiminden yararlandığım, örnek aldığım değerli hocam Doç. Dr. Selin ARADAĞ'a teşekkür ederim. Tezimi değerlendiren, bu çalışmaya katkıda bulan jüri üyeleri Sayın Yrd. Doç. Dr. Sıtkı Uslu'ya, Yrd. Doç. Dr. Ekin BİNGÖL'e teşekkür ederim.

“Sesüstü Kavitelerde Lazer Enerjisi Yardımıyla Akış Modellemesi Ve Kontrolü” başlıklı 110M539 no'lu TÜBİTAK projesinin bir parçası olan bu çalışmaya maddi destek veren TÜBİTAK'a ve bana burs veren TOBB ETÜ'ye teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmam boyunca yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen İbrahim YILMAZ'a, Haydar BATTALOĞLU'na ve Çiğdem USTA'ya teşekkür ederim. Lisans ve yüksek lisans hayatım boyunca yardımlarını ve desteğini hep hissettiğim Fatih AKTÜRK'e teşekkür ederim.

Sevgili annem Prof. Dr. Meltem ÜLKER AYLI ve babam Prof. Dr. Deniz AYLI'ya beni cesaretlendirdikleri, bilim insanı olmanın kıymetini ve değerini fark ettirdikleri ve hep yanımda oldukları için teşekkür ediyorum ve bu tezi ÜLKER ve AYLI ailelerine adıyorum.

## İÇİNDEKİLER

TEZ BİLDİRİMİ.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
KISALTMALAR.....	xvii
SEMBOL LİSTESİ.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kavite Akışının Sınıflandırılması.....	3
1.1.1. Kavite Geometrisine Bağlı Sınıflandırma.....	3
1.1.2. Kavite Akışına Bağlı Sınıflandırma.....	3
1.1.3. Mach Sayısına ve W/D Oranına Bağlı Sınıflandırma.....	6
1.2. ROSSITER MEKANİZMASI.....	8
1.3. ROSSITER MODLARI.....	9
1.4. ROSSITER FORMÜLASYONU.....	10
1.5. LİTERATÜR TARAMASI.....	12
1.5.1. Sayısal Çalışmalar.....	13

1.5.2.	Deneysel Çalışmalar.....	17
1.6.	Tezin Amacı .....	20
1.7.	Tez Planı.....	21
2.	SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ.....	23
2.1.	TÜRBÜLANS .....	23
2.1.1.	Türbülansın Genel Özellikleri.....	24
2.1.2.	Türbülansın Matematiksel İfadesi.....	26
2.2.	TÜRBÜLANSIN MODELLENMESİ VE SAYISAL YAKLAŞIMLAR .....	28
2.2.1.	RANS Yöntemi .....	29
2.2.2.	DES Yöntemi .....	36
2.3.	SAYISAL YÖNTEMLER.....	37
2.3.1.	Yoğunluk Tabanlı Algoritma .....	37
2.3.2.	Kontrol Hacim Yaklaşımı ve Ayırıklaştırma .....	39
2.3.3.	Zamanda İlerleme Algoritması .....	44
2.4.	SINIR ŞARTLARI .....	45
2.4.1.	Pressure Far Field Sınır Koşulu .....	45
2.4.2.	Simetri Sınır Koşulu.....	46
2.4.3.	Duvar Sınır Koşulu .....	46
2.5.	HAD ANALİZİ ÖZELLİKLERİ VE AKIŞ KOŞULLARI .....	47
2.6.	ARD İŞLEME YÖNTEMLERİ .....	50



2.6.1.	Ses Basınç Seviyesi ve Ortalama Basınç Kat Sayısı Hesaplanması ....	50
2.6.2.	Hızlı Fourier Dönüşümü .....	51
2.7.	Hesaplama Kaynakları.....	52
3.	İKİ BOYUTLU AKIŞ SİMÜLASYONLARI VE SAYISAL PARAMETRELERİN AKIŞ ÇÖZÜMLEMESİ ÜZERİNE ETKİLERİ .....	54
3.1.	Ağ Yapısı Çalışması.....	55
3.2.	Zaman Adımı Çalışması.....	64
3.3.	Türbülans Modelinin Akışa Etkileri.....	65
3.4.	İki Boyutlu Süpersonik Kavite Simülasyonu .....	70
3.5.	Aynı Parametrelerdeki Üç Farklı Sayısal Çalışmanın Kıyaslanması .....	75
4.	KAVİTE UZUNLUK/DERİNLİK ORANININ AKIŞ FİZİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİ.....	80
5.	ÜÇ BOYUTLU AKIŞ SİMÜLASYONLARI VE İKİ BOYUTLU SİMÜLASYON SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI.....	97
5.1.	Akış Konfigürasyonu.....	97
5.2.	Sayısal Parametrelerin Akış Üzerine Etkileri.....	98
5.2.1.	Simülasyon Süresinin Yakınsama Üzerine Etkisi.....	98
5.2.2.	Türbülans Modellerinin Akış Üzerine Etkileri .....	99
5.3.	Üç Boyutlu Akış Yapısı.....	102
5.4.	İki Boyutlu ve Üç Boyutlu Simülasyon Sonuçlarının Kıyaslanması .....	111
6.	SONUÇLAR VE YORUMLAR.....	119
6.1.	Sonuçların Yorumlanması.....	119

6.2. Gelecek alışmalar için neriler .....	122
KAYNAKLAR .....	123
ÖZGEÇMİŞ .....	127

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Deneysel çalışma koşulları	48
Çizelge 2.2. Analiz süreleri	52
Çizelge 3.1. Kullanılan ağ yapıları ile ilgili bilgiler	55
Çizelge 3.2. İlk mod için frekans değerleri kıyaslaması	62
Çizelge 3.3. İlk 3 mod için frekans değerleri	67
Çizelge 4.1. Farklı L/D oranına sahip kavite geometrik özellikleri	78
Çizelge 4.2. İlk 3 mod için frekans değerleri	81
Çizelge 4.3. İlk 3 mod için Strouhal sayıları	85
Çizelge 5.1. İlk 3 mod için frekans değerleri	98
Çizelge 5.2. İlk 3 mod için frekans değerleri	111

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 1.1.	(a)F-102 Delta Dagger hava aracının mühimmat taşıma bölümü (b) Boeing X-45 UCAV hava aracının mühimmat bırakması	2
Şekil 1.2.	Kapalı kavite akışı (a) sesaltı hızlar için (b) sesüstü hızlar için	4
Şekil 1.3.	Açık kavite akışı (a) sesaltı hızlar için (b) sesüstü hızlar için	6
Şekil 1.4.	Mach sayısına bağlı kavite akış rejimi sınırları semboller: yuvarlak: açık kavite akışı, kare: geçiş bölgesi akışı, dörtgen: kapalı kavite akışı (a) $W/D= 1$ (b) $W/D=4$ (c) $W/D= 8$ d) $W/D= 16$	7
Şekil 1.5.	Rossiter mekanizmasının şematik gösterimi	8
Şekil 1.6.	2.3 Mach sayısı ve 5.6 L/D oranındaki kavite akışının spektrumu	9
Şekil 1.7.	Farklı Mach sayıları için TSR2 bomba boşluğu rezonans frekans değerleri analizi	11
Şekil 1.8.	T1 ve T2 anında Mach sayısı konturları	16
Şekil 1.9.	Kavite akışı kesme tabakasının schlieren görüntüsü	18
Şekil 1.10.	Kavite akışı dinamikleri	20
Şekil 2.1.	Yoğunluk tabanlı çözüm metodu	38
Şekil 2.2.	Skaler taşınım denklemi ayrıklaştırılmasının kontrol hacmine uygulanması	39
Şekil 2.3	Zamana bağlı iteratif çözüm algoritması	44
Şekil 2.4.	(a) Geometri 1 için sınır şartlarının akış alanı üzerinde gösterimi b) geometri 2 için sınır şartlarının akış alanı üzerinde gösterimi	46
Şekil 2.5.	Hız-duvardan mesafe grafiği	48
Şekil 3.1.	Hazırlanan ağ yapıları	56

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 3.2.	Kavite alt duvarı SPL seviyeleri kıyaslaması	57
Şekil 3.3.	Kavite alt duvarı SPL seviyeleri kıyaslaması (ağ yapısı 1 için)	57
Şekil 3.4.	Kavite bölgesindeki akış karakteristikleri	58
Şekil 3.5.	Hız konturları üzerine akım çizgileri (a) ağ yapısı 1 (b) ağ yapısı 2 (c) ağ yapısı 3 (d) ağ yapısı 4 (e) ağ yapısı 5 (f) ağ yapısı 6 ( $t= 0.0128$ s)	61
Şekil 3.6.	Kavite arka duvarı basınç salınımları grafiği	63
Şekil 3.7.	Basınç-zaman grafiği	64
Şekil 3.8.	Bir periyotluk zaman için hız konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri (k- $\epsilon$ türbülans modeli)	65
Şekil 3.9.	Bir periyotluk zaman için hız konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri (k- $\omega$ türbülans modeli)	66
Şekil 3.10.	Farklı türbülans modelleri için güç frekans grafikleri	67
Şekil 3.11.	Kavite alt duvarı SPL seviyeleri	68
Şekil 3.12.	Basınç-zaman grafiği	69
Şekil 3.13.	Basınç konturları üzerine çizdirilmiş akım çizgileri	70
Şekil 3.14	Mach Sayısı Konturları	71
Şekil 3.15.	Kavite alt duvarı SPL-konum grafiği	72
Şekil 3.16.	Kavite arka ve ön duvar SPL-konum grafiği	72
Şekil 3.17.	Kavite ön duvar için $C_p$ - konum grafiği	74
Şekil 3.18.	Kavite alt duvar için $C_p$ - konum grafiği	74
Şekil 3.19.	Kavite alt duvar için SPL- konum grafiği	75

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 3.20	Kavite ön ve arka duvar için SPL-konum grafiği	76
Şekil 4.1.	LD5 kavite akışı için akış karakteristikleri	79
Şekil 4.2.	Basınç- zaman grafiği (a)LD1 (b)LD3 (c)LD5 (d)LD7 (e)LD10 (arka duvar $y=0.6$ konumu verileri kullanılmıştır)	80
Şekil 4.3.	Farklı L/D oranları için güç frekans grafikleri (arka duvar $y=0.6$ konumu verileri kullanılmıştır)	83
Şekil 4.4.	LD1 için hız konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri	86
Şekil 4.5.	LD3 için hız konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri	87
Şekil 4.6.	LD5 için hız konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri	88
Şekil 4.7.	LD7 için hız konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri	89
Şekil 4.8.	LD10 için hız konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri	90
Şekil 4.9.	Kavite alt duvarı SPL- konum grafiği	91
Şekil 4.10.	Kavite arka duvarı SPL – konum grafiği	92
Şekil 4.11.	Kavite ön duvarı SPL-konum grafiği	93
Şekil 4.12.	LD10 ile deneysel çalışma ( $L/D=9.9$ ) arası SPL değerleri kıyaslaması	93
Şekil 5.1.	Ağ Yapısının 3D ve 2D görünüşleri	96
Şekil 5.2.	Kavite alt duvarı SPL Seviyeleri kıyaslaması	97
Şekil 5.3.	Kavite alt duvarı SPL seviyeleri kıyaslaması	98
Şekil 5.4.	Kavite ön ve arka duvarı SPL seviyeleri kıyaslaması	98

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 5.5	Basınç- zaman grafiği (merkez düzlemden $y/D=0.6$ konumundan alınan veriler kullanılmıştır)	100
Şekil 5.6	$t=0.0121$ anı için $p/p_\infty$ konturları	101
Şekil 5.7.	Güç-frekans grafikleri (merkez düzlemden $y/D=0.6$ konumundan alınan veriler kullanılmıştır)	102
Şekil 5.8.	Üç boyutlu akış için kinetik enerji konturları	103
Şekil 5.9.	Üç boyutlu çalışma için basınç konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri	104
Şekil 5.10.	Üç boyutlu çalışma için hız konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri	105
Şekil 5.11.	$t=0.0121$ anı için hız konturları üzerine çizdirilmiş akım çizgileri	106
Şekil 5.12.	$t=0.0123$ anı için akıa dik yöndeki kinetik enerji konturları	107
Şekil 5.13.	Basınç konturu üzerine çizdirilmiş akım şeritlerinin önden görünüşü	108
Şekil 5.14.	Basınç konturu üzerine çizdirilmiş akım şeritlerinin üstten görünüşü	109
Şekil 5.15.	Basınç salınımları kıyaslaması	110
Şekil 5.16.	Kavite alt duvarı için SPL kıyaslaması	111
Şekil 5.17.	Kavite ön ve arka duvarı için SPL kıyaslaması	111
Şekil 5.18.	Güç-frekans grafiği	112

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 5.19.	İki boyutlu çalışma için basınç konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri	114
Şekil 5.20.	İki boyutlu çalışma için hız konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri	115



## KISALTMALAR

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
2D	İki boyutlu
3D	Üç boyutlu
DES	Ayrık girdap benzeşim yöntemi (Detached Eddy Simulation)
DNS	Direk sayısal simülasyon (Direct Numerical Simulation)
FFT	Hızlı fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform)
HAD	Hesaplama akışkanlar dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
LES	Büyük ölçekli benzeşim yöntemi (Large Eddy Simulation)
PANS	Kısmi ortalama Navier-Stokes (Partially Averaged Navier-Stokes)
RANS	Reynolds ortalama Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes)
S-A	Spalart-Allmaras
SPL	Ses basınç seviyeleri (Sound Pressure Level)
URANS	Düzensiz Reynolds ortalama Navier-Stokes (Unsteady Reynolds Avaraged Navier-Stokes)

## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$C_p$	Basınç katsayısı
$D$	Kavite derinliği
$Db$	Desibel
$F$	Kuvvet
$f$	Frekans
$f_1, f_2, f_3, f_4$	Rossiter frekansları
$Hz$	Hertz
$k$	Türbülans kinetik enerjisi
$K$	Rossiter formülasyonu deneysel sabiti
$L$	Kavite uzunluğu
$M$	Mach sayısı
$m$	Mod
$P$	Basınç
$Pa$	Pascal
$Re$	Reynolds sayısı
$St$	Strouhal sayısı
$t$	Zaman
$t_r$	Rossiter periyodu
$U_\infty$	Serbest ortam hızı
$u, v, w$	Hızın x, y, z yönündeki bileşenleri
$W$	Kavite genişliği
$\rho$	Yoğunluk
$\delta$	Sınır tabakası kalınlığı
$\Delta t$	Zaman adımı büyüklüğü
$\mu$	Dinamik viskozite
$\mu_t$	Türbülans dinamik viskozitesi
$\alpha$	Rossiter formülasyonu deneysel sabiti
$\omega$	Türbülans yitim hızı

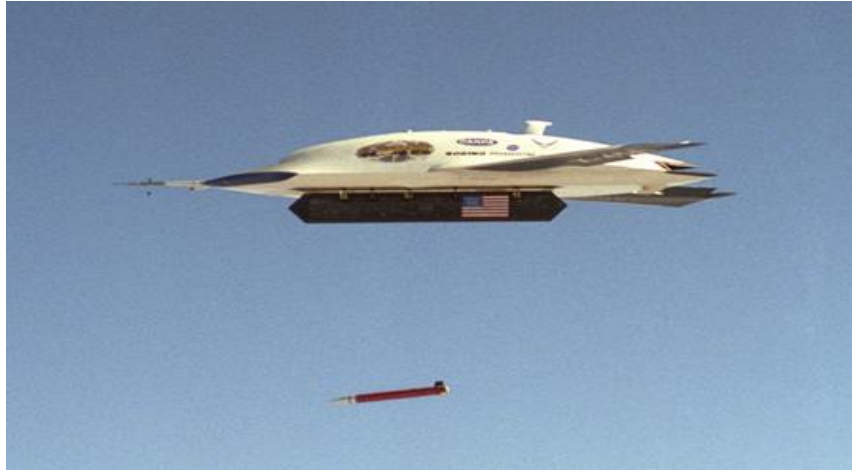
<b>İndisler</b>	<b>Açıklama</b>
L/D	Kavite uzunluk/derinlik oranı
L/W	Kavite uzunluk/genişlik oranı
W/D	Kavite genişlik/derinlik oranı
L/ $\theta$	Kavite uzunluk/sınır tabakası momentum kalınlığı oranı

## 1. GİRİŞ

Akustik; katı, sıvı ve gaz ortamlarda dalga yayılımını inceleyen bilim dalıdır. Havaya bağlı olarak oluşan ses üretimi, aeroakustik olarak adlandırılmaktadır. Aerodinamik gürültü, akışın düzensiz yapısından, akışın zamana bağlı olarak değişmesinden, yüzey üzerinde hava akışı ile oluşan aerodinamik kuvvetlerden kaynaklanabilir. Günlük hayatımızda aerodinamik gürültü, egzoz borularında, elektrikli süpürgelerde, havalandırma sistemlerinde, fanlarda karşımıza çıkmaktadır. Aerodinamik gürültü yalnızca günlük hayatı etkileyen bir olgu değil mühendislik alanında da önemli bir konudur. Hava araçlarında füze bombardıman alanlarında, hava aracı tekerleklerinde, araba camlarında, oto açılır kapanır tavanlarında aerodinamik gürültü oluşmaktadır. Bu örneklerdeki aerodinamik gürültü ve akış alanları kendi kendine oluşan salınımlara neden olmakta ve bu salınımlar ise yapısal kusurları doğurmaktadır. Bu aeroakustik olguyu anlamak ve çözümlenmek ile oluşan gürültüyü azaltmak, yolcu rahatlığını arttırmak mümkün olacaktır. Dolayısıyla kavite akışının anlaşılması ve kontrol tekniklerinin oluşturulması hem deneysel hem nümerik olarak ilgi çeken bir konudur [1].

Bu çalışmada, mühimmat depolama alanları ve mühimmat atan bölümler gibi havacılık uygulamalarında yaygın olan kaviteler üzerine çalışılmıştır. Kavite çevresindeki yüksek hız değerleri akış alanında birçok karmaşık yapı oluşturmakta ve buda havacılık uygulamalarında önemli bir sorunu doğurmaktadır. Bu karmaşık akış içinde türbülanslı akış için tipik bir durum olan küçük ölçekli basınç dalgalanmaları, frekans ve büyüklüğü bazı parametrelere bağlı değişen rezonans oluşumlarını içermektedir. Rezonansa sebep olan akustik modlar ve basınç dalgalanmaları hava aracının yapısına zarar verebilmekte ve mühimmatın hedefe ulaşabilme olasılığını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Şekil 1.1' de mühimmat taşıma alanları ve Boeing X-45 UCAV hava aracının mühimmatın tutulduğu alan kapağını açarak mühimmatın aşağı bırakılması gösterilmiştir. Mühimmatın uçak içerisinde taşınması, uçağın radara yakalanma riskini indirgemekte ve aerodinamik yükü, sürüklenme kuvvetini ve aerodinamik ısınmayı azaltmaktadır. Bu sayede, uçağın manevra kabiliyeti artmakta ve uçak daha uzun süre havada kalabilmektedir.

Bu nedenlerden ötürü karmaşık akış özelliklerine sahip kaviteler, savaş uçaklarının mühimmat atan bölümlerinde kendilerine vazgeçilmez bir uygulama alanı yaratmaktadır. Bu doğrultuda kavite fiziğinin anlaşılması ve oluşan basınç dalgalanmalarının önlenmesi için birçok deneysel ve numerik çalışma yapılmaktadır[2].



Şekil 1.1. (a)F-102 Delta Dagger hava aracının mühimmat taşıma bölümü [3]

(b) Boeing X-45 UCAV hava aracının mühimmat bırakması [4]

## **1.1. Kavite Akışının Sınıflandırılması**

Kavite akışı karmaşıklığından dolayı literatürde farklı şekillerde sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma türlerinden bazıları kavite geometrisine, akış özelliklerine ve Mach sayısına bağlı sınıflandırmalardır [2].

### **1.1.1. Kavite Geometrisine Bağlı Sınıflandırma**

#### **1.1.1.1. Kavite Akışının L/D Oranına Bağlı Sınıflandırılması**

Kaviteler ilk olarak sadece geometrilerine bağlı olarak derin veya sığ kaviteler olarak sınıflandırılmıştır. L/D oranının 1'den küçük olduğu kaviteler derin, büyük olduğu kaviteler ise sığ kaviteleri temsil etmektedir. Derin kavitelerde en çok iki sirkülasyon bölgesi gözlemlenmekte, sığ kavitelerde ise daha güçlü oluşumlar meydana gelmektedir [2].

#### **1.1.1.2. Kavite Akışının L/W Oranına Bağlı Sınıflandırılması**

Tracy ve diğerleri [5], subsonik ve transonik hızlarda gerçekleştirdikleri çalışmalarında kavite derinliğini sabit tutmuş ve kavite genişliğini değiştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, kavite derinliğine bağlı olarak basınç dağılımı değişim göstermekte ve kavite akışı değişmektedir. Block [6]'un çalışmasına göre L/W oranının 1'den küçük olduğu durumlar, iki boyutlu, L/W değerinin 1'den büyük olduğu durumlarda ise üç boyutlu akustik alan elde edilmektedir.

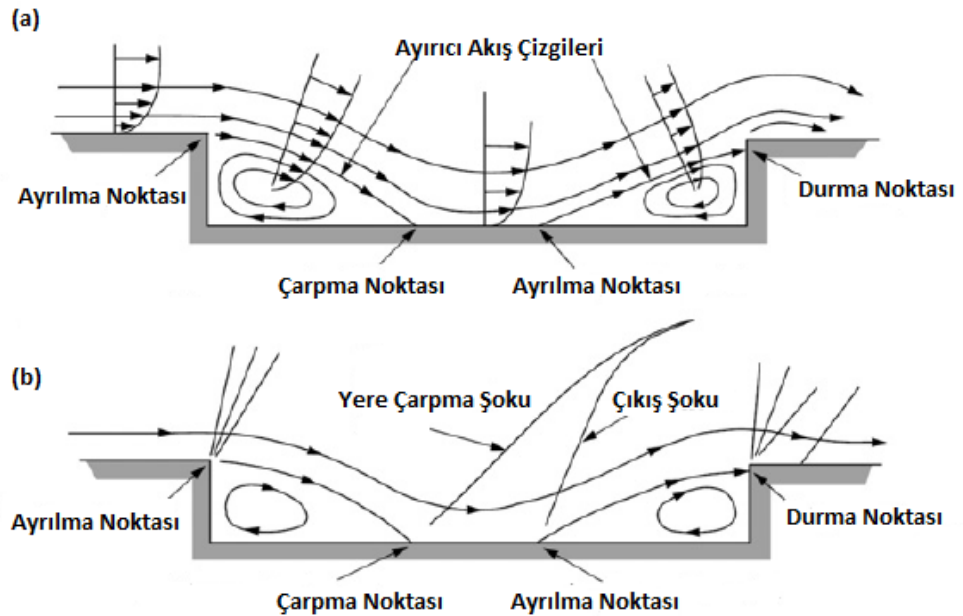
### **1.1.2. Kavite Akışına Bağlı Sınıflandırma**

Kavite akışı geometrik özelliklere ve serbest ortam akış hızına bağlı olarak farklı şekillerde sınıflandırılmıştır. Serbest ortam Mach sayısına bağlı olarak sesaltı ve sesüstü olarak ikiye ayrılmaktadır. Kavite bölgesindeki statik basınç dağılımlarının

deneysel çalışmalar ile irdelenmesinin ardından kavite akışı kapalı kavite akışı, açık kavite akışı ve geçiş bölgesi kavite akışı olmak üzere üç kategoriye ayrılmıştır.

### 1.1.2.1. Kapalı Kavite ve Geçiş Bölgesi Kavite Akışı

Kapalı kavite akışı sığ kavitelere meydana gelen akış türüdür. Sesüstü hızlarda kapalı kavite akışında  $L/D$  oranı 13'ten büyük veya eşittir. Kapalı kavite akışında serbest akış ile gelen sınır tabakası kavite giriş köşesinde ayrılır; ancak kaviteyi aşabilecek yeterli enerjiye sahip olmadığından kavite yerine çarpar, daha sonra kavite yerinden tekrar ayrılır ve kavite arka köşesinde durma noktası yaratarak tekrar birleşir. Kesme tabakası kavite iç bölgesinde iki akış alanı ve kavite üzerinde bir serbest akış alanı yaratmaktadır. Şekil 1. 2' de sesaltı ve sesüstü durumlar için kapalı kavite akışı çizilmiştir. Sesüstü hızlarda kavite de çarpmaya ve ayrılmaya bağlı olarak şok oluşumu gözlemlenmiştir[2,7].



Şekil 1. 2. Kapalı kavite akışı (a) sesaltı hızlar için (b) sesüstü hızlar için [7]

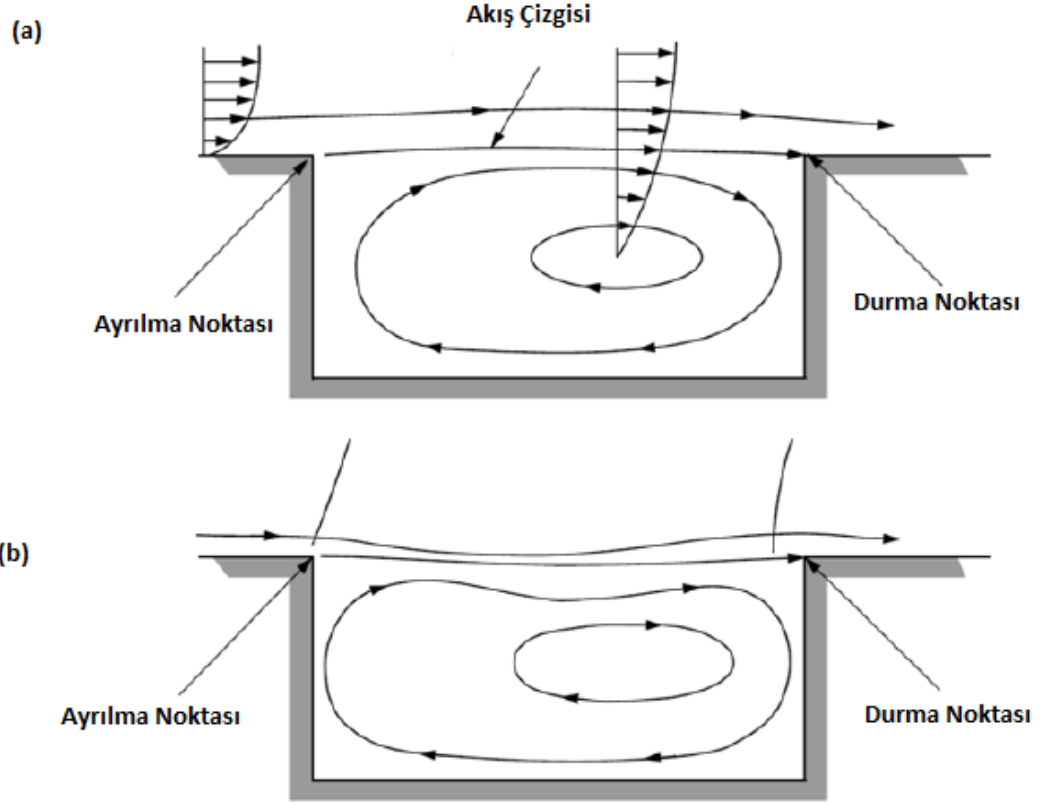
Geçiş bölgesi akışı açık ve kapalı kavite akış bölgeleri arasında kalan  $L/D$  değerleri için oluşur.  $10 < L/D < 13$  aralığı geçiş bölgesi akışıdır. Akış,  $L/D$  oranı düştükçe

kapalı kavite özelliklerinden açık kavite özellikleri taşımaya başlar. Kapalı kavite aralığında olan L/D oranı düşmeye başladığında kesme tabakasının yere çarpmasıyla ve yerden ayrılmasıyla oluşan şoklar birbirlerine yaklaşır, L/D oranının daha da düşmesi bu iki şokun birleşmesine ve tek bir şok oluşturmaya neden olur. L/D oranının açık kavite değerlerine doğru daha da yaklaşması ise kavite arka duvarı basınç değerlerinde artış yaratır [2,7].

#### **1.1.2.2. Açık Kavite Akışı**

Açık kavite akışı derin kavitelerde meydana gelmektedir ve sesüstü hızlarda  $L/D < 10$  olan kavite geometrilerinde oluşmaktadır. Kavite giriş duvarı köşesinde serbest akış ile gelen sınır tabakası kavite giriş köşesinde ayrılır ve kavite arka duvar köşesinde tekrar birleşir. Böylece kesme tabakası, kavite içi akışı ve kavite dışı akışı iki ayrı bölgeye ayırır. Kavite giriş köşesi ve kavite çıkış köşesi arası basınç farkı kavite bölgesinde sirkülasyon bölgesi yaratır. Şekil 1.3' te açık kavite akışı şematik olarak gösterilmiştir. Süpersonik akışlarda kavite giriş ve çıkış noktasında kesme tabakasının serbest akış şartlarına adapte olabilmesi için eğik şoklar meydana gelir [2]. L/D oranının 2'den küçükken kavite bölgesinde tek girdap yapısı gözlemlenmektedir. L/D değerinin artışı kavite bölgesi girdap sayısında da değişime neden olmaktadır [1].



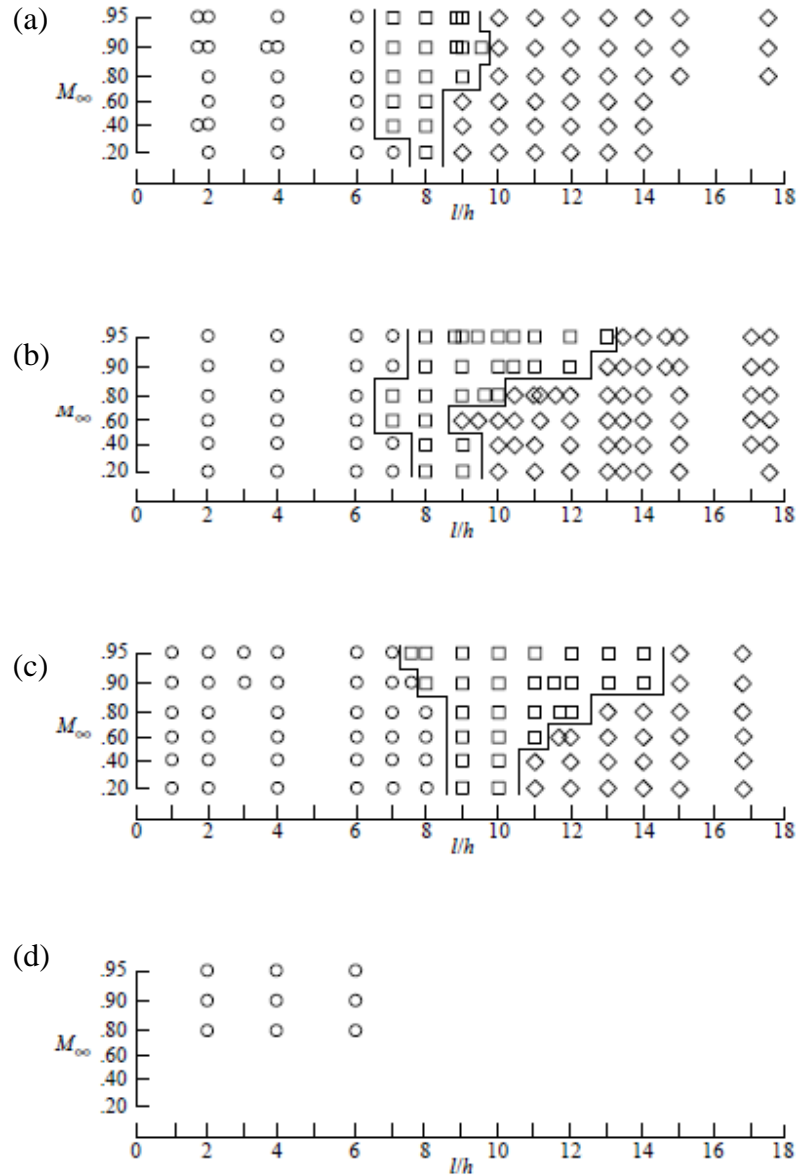


Şekil 1. 3. Açık Kavite Akışı (a) sesaltı hızlar için (b) sesüstü hızlar için [7]

### 1.1.3. Mach Sayısına ve W/D Oranına Bağlı Sınıflandırma

Tracy ve diğerleri [5] tarafından gerçekleştirilen çalışmanın amaçlarından bir tanesi subsonik ve transonik hızlar için açık kavite ve kapalı kavite geçiş değerlerini tespit etmektir. Bu amaç doğrultusunda değişen serbest ortam Mach sayısı ve L/D oranları için 4 farklı W/D konfigürasyonunda deneyler yapılmış ve Şekil 1.4' de verilen diyagram oluşturulmuştur. Bu diyagrama göre kavite akışı sadece L/D oranına bağlı olarak değil kavite genişliğine ve Mach sayısına bağlı olarak da değişim göstermektedir. Açık kavite ve geçiş bölgesi arası L/D sınırı Mach sayısından ve W/D oranından bağımsız sayılabilir olarak yorumlanmaktadır (L/D=7, 8 arası). Geçiş bölgesi ile kapalı kavite bölgesi arası L/D sınırınının W/D oranının ve Mach sayısının artışı ile beraber arttığı gözlemlenmektedir (L/D=9, 14 arası). Süpersonik hızlarda ise geçiş değerleri genelde 1.1.2 başlığında verildiği şekildedir. Süpersonik hızlarda, L/D oranının kritik olduğu değerlerin tayini kavite uzunluğunun azalması ile kapalı kavite

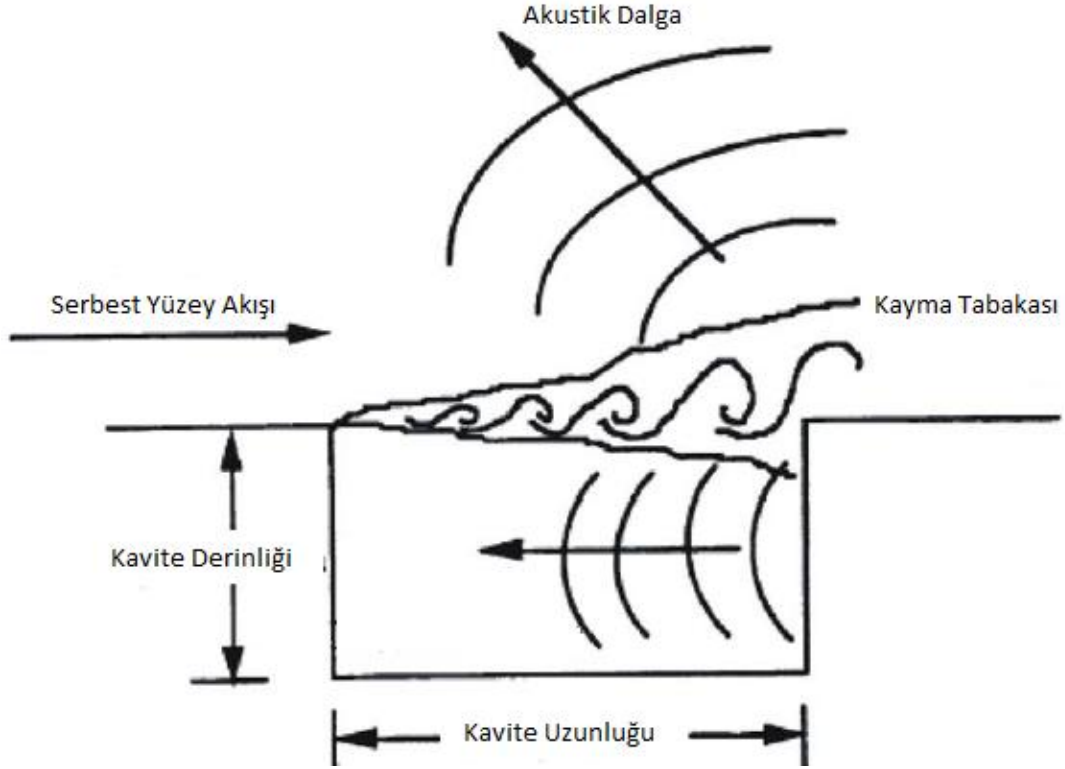
akışında oluşan yere çarpma ve çıkış şoklarının kaybolarak yerlerini genişleme, sıkışma dalgalarına bırakması ile yapılmıştır. Bu durum kapalı geçiş akışı olarak isimlendirilmiştir. Açık geçiş akışı ve açık kavite akışı  $L/D$  değerleri ise kavite bölgesinde ayrılma ve durma noktasında şok oluşumları ayrıca kesme tabakası hareketi dikkate alınarak belirlenmiştir.



Şekil 1. 4. Mach sayısına bağlı kavite akış rejimi sınırları  
Semboller: yuvarlak: açık kavite akışı, kare: geçiş bölgesi akışı, dörtgen: kapalı kavite akışı (a)  $W/D=1$  (b)  $W/D=4$  (c)  $W/D=8$  d)  $W/D=16$  [5].

## 1.2. ROSSITER MEKANİZMASI

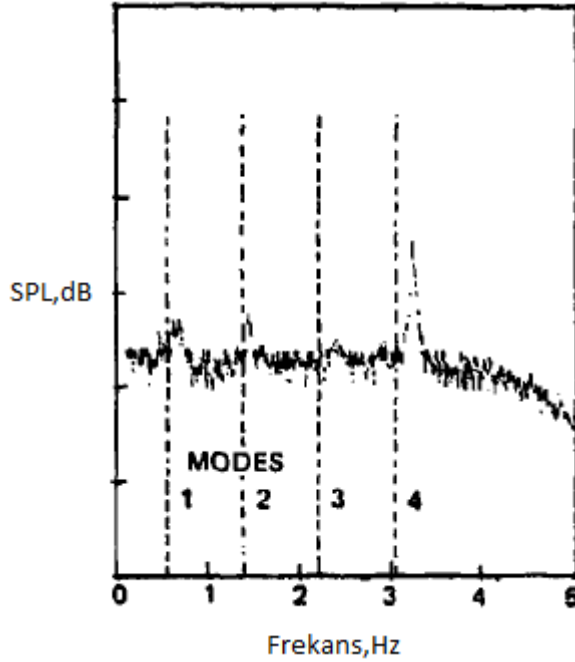
Kavite çalışmalarının öncülerinden olan Rossiter [8-11], deneysel çalışmaları sonucunda kavite de oluşan akışı dört ana basamakta irdemiştir. İlk olarak, girdaplar kavite ön köşesinde oluşur ve kavite arka duvar köşesinde kadar ilerler. İkinci basamakta ön duvarda oluşan girdaplar arka duvar köşesine çarparak akustik dalgaları oluşturur. Üçüncü basamakta bu akustik dalgalar ikiye ayrılır ve kavite dışına yayılan kısım akustik alanı oluştururken kavite içerisine yayılan girdap yapıları ise basınç dalgalarını oluşturur. Son basamakta kavite içerisine yayılan basınç dalgaları kavite ön duvarına çarpar ve yeni girdap oluşumunu tetikler. Böylece geri besleme mekanizması akustik dalgalar ve girdaplar tarafından oluşturulmuş olur. Bu mekanizma Şekil 1.5’ de şematik olarak gösterilmiştir [12].



Şekil 1.5. Rossiter mekanizmasının şematik gösterimi [12]

### 1.3. ROSSITER MODLARI

Açık kavitelerde ( $L/D < 10$ ), kesme tabakası kavite boyunu aşabilecek ve kesme tabakasını oluşturacak yeterli enerjiye sahiptir. Oluşan kesme tabakasının kavite arka duvarına çarpması ile birlikte kavite içerisine ve kavite dışına yayılan akustik dalgalar oluşur. Bu akustik dalgalar kavite bölgesindeki kararsız oluşumları tetikler ve geri besleme mekanizmasını oluşturur. Kavite de oluşan bu akustik alan; geniş bantlı gürültü ve dar bantlı (Rossiter modları) tonlar olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Geniş bantlı gürültü, serbest akıştan, türbülans salınımlarından ve kesme tabakasından kaynaklanmaktadır. Rossiter modları [8] olarak adlandırılan tonlar ise akıştaki bazı özel etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. Bu etkileşimlerden bazıları girdap-girdap, duvar-girdap, girdap-kesme tabakası, şok-kesme tabakası ve kesme tabakası-duvar etkileşimleridir. Şekil 1.6' da açık kavite akışı için elde edilmiş akustik spektrum verilmiştir. Şekildeki tepe noktaları akıştaki mod değerlerini temsil etmektedir. Bu modların (Rossiter modları) yani çoklu tonların oluşum frekansları tahmininde Rossiter'in geliştirdiği Rossiter formülasyonu kullanılmaktadır [13].



Şekil 1.6. 2.3 Mach sayısı ve 5.6 L/D oranındaki kavite akışının spektrumu [14]

#### 1.4. ROSSITER FORMÜLASYONU

Rossiter [8-11], birçok deneysel çalışmanın ardından periyodik basınç salınımlarının oluştuğu frekans değerlerinin serbest ortam akış hızı ile doğru ve kavite uzunluğu ile ters orantılı olduğunu öne sürerek yani aşağıda verilen Strouhal sayısını önermiştir.

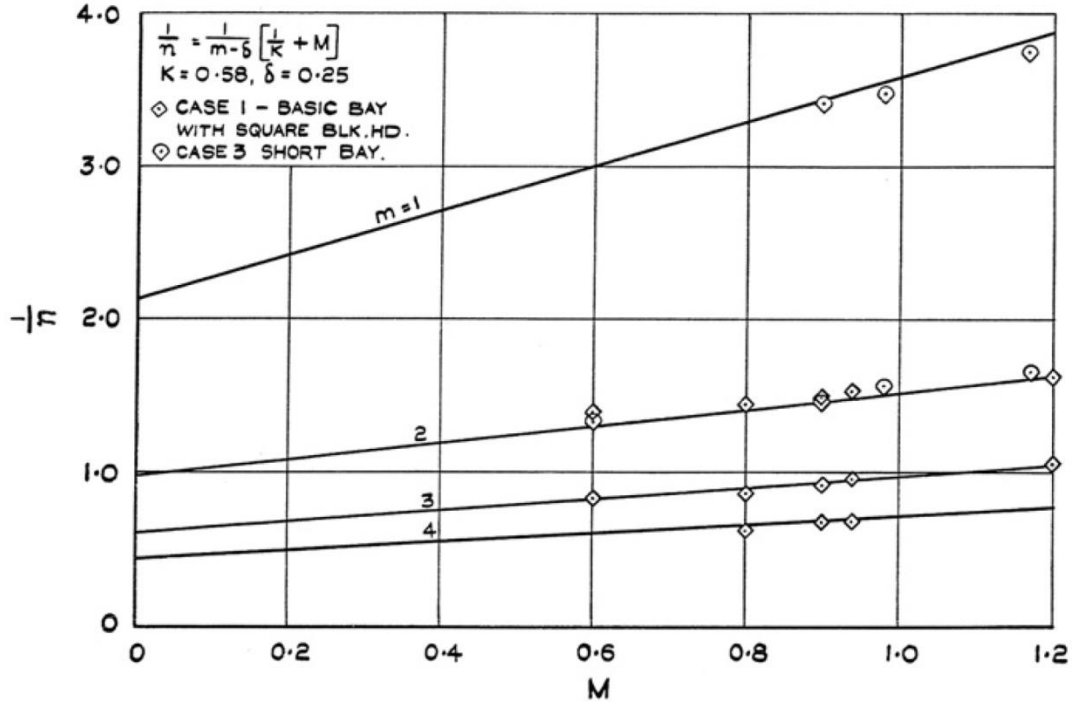
$$St = \frac{fL}{V} = \frac{\text{Hızdaki yerel değişimden dolayı oluşan kuvvet}}{\text{Taşınım nedeniyle oluşan kuvvet}} \quad (1.1)$$

Mach sayısına bağlı 1/Strouhal sayısı (1/n) grafiği ilk dört rezonans frekans değeri için Şekil 1.7'de verildiği gibi elde edilmiş ve aşağıdaki formülasyona ulaşılmıştır [10].

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{m - \delta} \left[ \frac{1}{K} + M \right] \quad (1.2)$$

1.2 no'lu formülasyonda m, mod sayısını ifade etmektedir.  $\delta$  ve K ise deneysel sabitlerdir.  $\delta$  değeri L/D değerinin bir fonksiyonudur ve oluşan girdapların arka köşeye çarpması ile akustik dalgaların oluşumu arasındaki faz farkından kaynaklanmaktadır. K değeri Mach sayısının bir fonksiyonudur ve kesme tabakasındaki girdapların yayılım hızının serbest ortam akış hızına oranıdır. 1/n yani Strouhal sayısı ise boyutsuzlaştırılmış bir değer olup kavite rezonans frekans değerlerinin belirlenmesinde kullanılır [13]. 1.2 no'lu denklem basınç salınımlarının periyoduna bağlı olarak ifade edildiğinde aşağıdaki hali almaktadır. Denklemden a, ses hızını ifade etmektedir.

$$T = \frac{1}{m - \delta} \left[ \frac{L}{KV} + \frac{L}{a} \right] \quad (1.3)$$



Şekil 1.7. Farklı Mach sayıları için TSR2 bomba boşluğu rezonans frekans değerleri analizi [10]

1.2. numaralı Rossiter formülasyonu modifiye edilmiş ve m. mod değeri için frekans formülasyonu aşağıdaki haline gelmiştir.

$$f_m = \frac{u_\infty}{L} \left[ \frac{m - \alpha}{M_\infty + 1/K} \right] \quad (1.4)$$

Bu formülasyona  $u_\infty$ , serbest ortam akış hızı, L kavite uzunluğu, m mod sayısı,  $M_\infty$  serbest ortam Mach sayısı değeridir. Rossiter [8, 9, 10, 11], bu formülasyonu 0.4 ve 1.4 Mach sayısı aralığında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda elde etmiştir.

Bu formülasyon Heller ve Bliss [15] tarafından modifiye edilmiş, tüm Mach sayılarında kullanılabilir hale getirilmiş ve denklem 1.5' te verilen şekline ulaşmıştır.

$$St = \frac{fL}{U_\infty} = \left[ \frac{m - \alpha}{M_\infty (1 + [(\gamma - 1) / 2] M_\infty^2)^{-1/2} + 1 / K} \right] \quad (1.5)$$

Formülasyonda  $m$ ,  $m$ . moddaki frekans,  $M_\infty$  serbest ortam Mach sayısıdır. Modlar Rossiter'in modifiye edilmiş denklemi ile tahmin edilse de salınımlı basınç genliklerinin tahmini için analitik bir formülasyon bulunmamaktadır [2].

## 1.5. LİTERATÜR TARAMASI

Tez kapsamındaki literatür taramasının en önemli amacı kavite akışı ile ilgili yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan kavite akış fiziğini irdelemek ve kullanılan parametreler ile kullanılan metotların anlaşılmasıdır. Hava araçlarında mühimmat taşıma alanları, bu mühimmatı güvenli şekilde taşıma ve sapmalardan arındırarak hedefe ulaştırma yolları uzun süredir ilgi çeken bir konudur [2]. Araştırmacılar, hem deneysel hem sayısal olarak dikkörtgen kavitelerdeki akış alanı üzerine birçok çalışma yapmışlardır. Kavite üzerine deneysel çalışmalar, hava tünellerinden elde edilen deneysel sonuçlar ve uçuş testleri temellidir. Konu ile ilgili sayısal çalışmalar ise deneysel çalışmaların ardından 20. yüzyılın ortalarında başlamış olup hesaplamalı akışkanlar dinamiği üzerine kuruludur. Günümüz teknolojisinde hava tüneli ile yapılan deneysel veriler HAD simülasyon sonuçlarını doğrulamakta kullanılmaktadır. Böylece deneysel çalışmaların yüksek maliyetlerinden kurtulmak ve yüksek doğrulukta sonuçlar elde etmek HAD simülasyonları ile mümkün hale gelmektedir. Hem deneysel hem sayısal çalışmalarda çoğunlukla ortalama basınç dağılımları ve bir kısmında ses basınç seviyeleri (SPL) irdelenmiştir. Çalışmaların önemli bir bölümü askeri hava araçlarının çalışma hızlarını kapsayan sesüstü hızlarda gerçekleştirilmiştir.

### 1.5.1. Sayısal Çalışmalar

Bu tip akışları çözebilecek en ucuz ve en hızlı nümerik yöntem Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) metodudur; bu nedenle birçok mühendislik probleminde RANS metodu kullanılmaktadır. RANS denklemleri türbülanslı akış analizlerinde, türbülans modelleri yardımıyla çözülen Navier-Stokes denklemleridir. Bu denklemlerde, akış özellikleri zaman-ortalama ve zamana bağlı değişen kısım olmak üzere iki bileşene ayrılmaktadır. Literatürde RANS metodu kullanılarak gerçekleştirilen birçok kavite çalışması mevcuttur [16-22].

Shieh ve Morris [16], sayısal çalışmalarında; iki boyutlu ve üç boyutlu kavite akışını düzensiz Reynolds ortalama Navier-Stokes (URANS) metodu ile Spalart-Allmaras (S-A) modeli kullanarak çözümlenmiştir. Çalışmada kavite uzunluğunun kavite derinliğine oranı 4.4, kavite genişliğinin kavite derinliğine oranı 1 olarak belirlenmiştir. Mach sayısı 0.6 ve Reynolds sayısı 200.000 olan çalışmada tüm parametreler Plentovich [17] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma ile aynı tutulmuştur. İki boyutlu simülasyonun vortisite konturları; bir periyotluk zaman dilimi için çizdirilmiş ve kesme tabakası içerisinde girdap oluştuğu, oluşan girdabın kavite boyunca ilerledikçe boyutunun giderek büyüdüğü, kavite ortasına ulaştığında ise girdabın kavite boyunu geçtiği gözlemlenmiştir. Girdap kavite arka duvarına ulaştığında ise gelen akış tarafından sıkıştırılmış, kavite dışına atılmıştır ve yeni girdap oluşumu kavite giriş köşesinde başlamıştır. Üç boyutlu çalışmada ise oluşan girdaplar iki boyutludaki girdaplara oranla oldukça zayıftır ve büyüme hızı iki boyutludaki kadar güçlü değildir.

Shih v.d [18],  $k-\epsilon$  türbülans modelini 1.5 Mach sayısına sahip 5.07 L/D oranındaki açık kavite akışını çözümlenmede kullanmıştır. İki boyutlu düz bir plaka üzerindeki akış nümerik olarak çözümlenmiş ve kavite girişine giriş koşulu olarak verilmiştir. Kaufman vd.'nin [14] deneysel çalışması ile aynı parametreler kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre kesme tabakası, akışı son derece karmaşık bir hale getirmekte ve kesme tabakası üzerinde kavite bölgesine kütle giriş çıkışı olmaktadır. Kesme tabakası kavite ön duvarında kavite dışına doğru eğilmekte ve kaviteden



dışarı kütle atılmaktadır. Kesme tabakası arka duvar ile birleştiğinde ise kavite bölgesine kütle girmekte ve basınç dalgası oluşmaktadır. Oluşan basınç dalgası kavite ön duvarına ulaştığında ve çarptığında ise daha güçlü bir kütle çıkışı meydana gelmektedir.

Ashcroft ve Zhang [19], sıkıştırılabilir Navier-Stokes denklemlerini  $k-\omega$  türbülans modeli kullanarak subsonik hızlardaki kavite akışı için çözümlenmiştir. Ashcraft ve Zhang sayısal çalışmalarını Ahuja ve Mendoza'nın [12] deneysel çalışması ile kıyaslamışlardır. Çalışmada  $L/D$  oranı 1.5 ve 3.75 değerindedir. Mach sayısı 0.26 ile 0.53 arasında değişmektedir. Rossiter modları deneysel değerlerle uyum içerisinde bulunmuştur. SPL değerleri ise 5 dB kadar daha fazla hesaplanmıştır. Ortalama basınç kat sayıları grafiği konuma bağlı olarak çizdirilmiş ve bu grafiğe göre kavite girişinde basınç düşüşü meydana gelmiş, kavite çıkışında ise basınç değerlerinde ciddi bir artış gözlemlenmiştir.

Rizzetta [20], üç boyutlu ve zamanla değişen RANS simülasyonlarını Mach sayısı 1.5 olan sesüstü kavite akışı için gerçekleştirmiş, ortalama statik basınç ve SPL açısından deneylerle oldukça uyumlu sonuçlar elde etmiştir.

Zhang ve Edwards [21], RANS denklemlerini  $k-\omega$  türbülans modeli kullanarak 1.5 ve 2.5 Mach sayısında  $L/D$  oranları 1, 3, 5 olan süpersonik kavite akışının simülasyonu için çözümlenmişlerdir. Çalışmaya göre  $L/D$  oranı 1 olan kavite akışı daha düzenli iken  $L/D$  oranı 3 değerinin üstüne çıkınca akışın yapısı değişmekte, salınım frekansları artmakta, düzensiz osilasyonlar meydana gelmektedir.

Literatürde RANS ile yapılan çalışmaların yanı sıra ayrık girdap benzeşim yöntemi (DES) metodu ile yapılan çalışmalar da mevcuttur. Yüksek ölçekte türbülans içeren akışlar için hibrid bir metot olan DES metodu, RANS ve büyük ölçekli benzeşim (LES) modelinin bir arada kullanılması temeline oturmaktadır. Bu yöntem Spalart ve diğerleri [22] tarafından kullanılmaya başlanmıştır. RANS metodu duvara yakın yerlerin çözümlenmesinde, LES ise kalan akış alanının çözümlenmesinde kullanılmaktadır. Bu hibrid metot sayesinde LES metodundan daha düşük maliyetler

ile LES çözümlenmesi yapmak mümkün hale gelmekte ayrıca RANS metodu ile tam olarak yakalanamayan karmaşık akış yapısı daha doğru çözümlenebilmektedir [13]. Peng [23], RANS ve DES modellerini 0.85 Mach sayısındaki kavite akışı için karşılaştırmıştır. Çalışmada L/D oranı 5'tir ve yapısal bir ağ yapısı ile çalışılmıştır. Analiz, akışın düzenli ve periyodik hale gelmesi, nümerik hatalardan arınması için 3000 zaman adımı koşturulmuş ve 2300 zaman adımı RANS metodu için, 2800 zaman adımı DES metodu için analiz devam ettirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre her iki metot ile de ilk mod yakalanamamıştır, ikinci ve üçüncü mod ise her iki yöntemde de yaklaşık olarak aynı değerdedir. Dördüncü mod ise DES ile daha iyi tahmin edilmiştir. Her iki metot ile de SPL değerleri deneysel SPL değerlerinden 5 dB civarında daha fazla çıkmıştır. DES metodu ile daha yüksek ortalama basınç katsayısı hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucuna göre, DES daha iyi ağ yapılarında daha iyi sonuçlar vermektedir.

Basu vd [24], DES ve PANS yöntemlerini üç boyutlu subsonik kavite probleminin çözümlemesinde kullanmıştır. Her iki metotta da k- $\epsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. Mach sayısı 0.128 değerindedir. Driver vd'nin [25] deneysel çalışması ile kıyaslanan sonuçlara göre her iki metot ile de akışın yapısı gözlemlenebilmektedir.

Hamed vd [26], açık kavitede süpersonik akışı modellemek için DES metodunu kullanmıştır. L/D oranı 5, Mach sayısı 1.19 değerindedir. Basınç salınımları kaotik ve arka duvarda ön duvara oranla daha yüksek ölçülmüştür. SPL seviyeleri arka duvarda en yüksek değerlerine ulaşmıştır. Reynolds sayısının artması ile beraber SPL seviyeleri de artış göstermiştir.

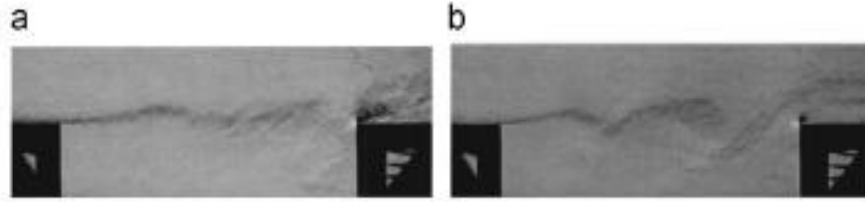
Barakos vd [27], DES yöntemi ile 0.85 Mach sayısındaki L/D=5 açık kavite akışını modellemişlerdir. Çalışmada, LES ve RANS metotlarının birleşimi olan DES modelinin performansının geometriye ve ağ yapısı yoğunluğuna bağlı olduğundan bahsedilmiştir.

Beş milyon eleman içeren ağ yapısı iki milyon eleman içeren ağ yapısına göre deneysel değerler [28] ile daha uyumlu sonuçlar vermiştir. Sayısal çalışma Rossiter

modları ve deneysel çalışma frekans değerleri büyük oranda uyum içerisindedir. SPL seviyeleri deneysel çalışma değerlerinden daha yüksek olarak hesaplanmıştır.

LES metodu, RANS yönteminden daha gelişmiş bir yöntem olup literatürde LES yöntemi ile gerçekleştirilen kavite simülasyonları da mevcuttur. LES yöntemi büyük ölçekteki akış olaylarını çözümlerken küçük ölçekteki olayları modellemektedir.

Rizetta ve Visbal [29], LES yöntemi ile süpersonik kavite akışını çözümlenmiştir. Çalışmada Mach sayısı 1.19, L/D oranı 5'tir. Kullanılan ağ yapısı 20 milyon nokta barındırmakta ve duvar fonksiyonlarına ihtiyaç kalmamaktadır. Kavite girişinde büyük ölçekli girdaplar oluşmakta ve oluşan bu girdaplar kavite arkasına aktarılmaktadır (Şekil 1.8). Deneysel değer ile karşılaştırılan SPL seviyeleri ve Rossiter frekansları, deneysel değerler içe uyum içerisindedir.



Şekil 1.8. T1 ve T2 anında Mach sayısı konturları [29]

Direk sayısal simülasyon (DNS) yöntemi en pahalı yöntem olup, Navier-Stokes denklemlerini hiç bir türbülans modeli kullanmadan çözümlenmekte, yani akıştaki her ölçekteki olay çözümlenmektedir. Ancak akıştaki her ölçekteki olayın çözümlenebilmesi için sıkı bir ağ yapısı ve küçük zaman adımı ile çalışılmalıdır [13,30]. Türbülans çözümlenmesinde DNS yöntemi son derece güçlü bir araç olup çözümlenmede günümüzde var olan en güçlü bilgisayarları gerektirir dolayısıyla var olan imkânlar bazında kavite akışı problemine DNS uygulamaları oldukça az sayıdadır.

Hamed ve diğerleri [31] transonik hızlardaki kavite akışı için DNS yöntemini kullanmışlardır. Mach sayısının 0.9 olduğu akışı ve 1.1 olduğu akışı karşılaştırmışlar, Mach sayısının artmasına bağlı olarak kavite içerisinde oluşan girdabın boyunun

büyüdüğünü tespit etmişlerdir. Mach sayısının artışı basınç salınımlarını da yaklaşık olarak iki katına çıkarmıştır. 1.Mod için frekans değerleri Rossiter formülasyonu ile %6 farklılık göstermektedir.

Bres ve Colonius [32], üç boyutlu açık kavite akışını çözümlemede DNS yöntemini kullanmış, kavite salınımlarını tetikleyen mekanizmayı araştırmış ve akım çizgilerini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar Rossiter mekanizmasını doğrulamaktadır.

### **1.5.2. Deneysel Çalışmalar**

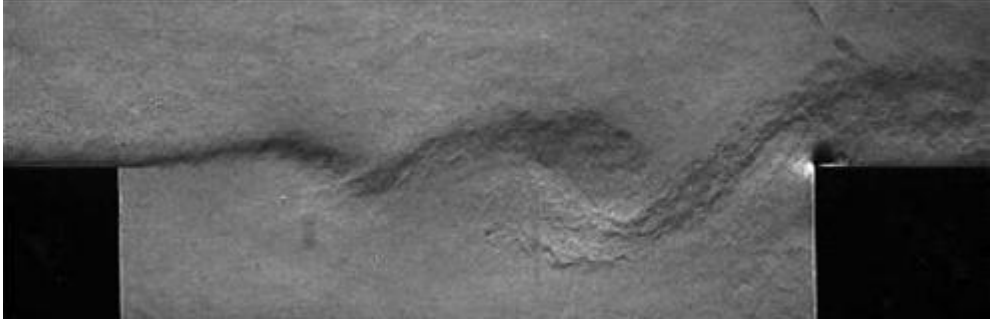
Kavitelerde akış üzerine yapılan deneysel çalışma sonuçları, hava tünellerinde ya da uçuş testlerinde yapılan çalışmalar ile elde edilmektedir. Hava tüneline yapılan çalışmalarda, basınç ölçümü yapabilmek için basınç transdüserleri, schlieren fotoğraf çekim düzeneği, Planar lazer akış (Planar Laser Imaging) görüntüleyici ve bunun gibi maliyetli donanımlar gerekmektedir. Bu sebepten ötürü numerik çalışmalar daha çok yapılmakta ve var olan deneysel çalışmalar ile sonuçlar kıyaslanmaktadır.

Bueno ve diğerleri [33], Texas Üniversitesi hava tüneline süpersonik hızlar için deneyler gerçekleştirmiştir. Kavite L/D oranı 5 ve 9 arasında değişim göstermektedir ve Mach sayısı 2 değerindedir. Çalışmada, farklı noktalardan basınç ölçümleri yapılarak yerel etkiler gözlemlenmiştir. Salınlı basınç değerleri; kavite boyu uzadıkça artmış, kavite boyu kısaldıkça azalmıştır. Akışa bir kontrol mekanizması yerleştiren Bueno ve diğerleri akışa belirli aralıklarla kütle enjeksiyonu yapmıştır. Böylece enjeksiyon jetleri vortex oluşturucular gibi davranarak kavite bölgesindeki girdaplanmayı ve türbülanslı salınımları arttırmış böylece kavite içi basınç değerleri düşmüştür. Bu durum da ses basınç seviyelerinin azalması ile sonuçlanmaktadır. Sürekli kütle enjeksiyon ile ses basınç seviyesi değerleri 6.5 dB mertebesinde düşmüştür.

Ünalmiş ve diğerleri [34], 5 Mach sayısı ve 3 ile 7 arasında değişen L/D oranları için salınlı basınç değerleri ölçmüşlerdir. Deneysel sonuçlara göre kavite ön duvarı salınımları arka duvara göre daha azdır. Salınımlar tüm duvarlarda periyodiktir

bunun nedeni arka duvar ve ön duvar arasında gidip gelen akustik dalgalar ile basınç osilasyon periyodunun uyumlu olmasıdır.

Perng [35]'e göre serbest akışla gelen sınır tabakası kavite üzerinde akmaya başlayınca, kavitenin ön duvarı kenarında kararlı olmayan bir akış çizgisine ve yüksek hızlı dış akış ile kavite içindeki dönümlü akış arasındaki zamana bağlı değişen basınç farklılıklarına sebep olur. Bu zamana bağlı değişen basınç farklılıkları kavite içinde girdap yoluna sebep olmaktadır. Akım çizgisindeki kararsızlık ve bu akım çizgisi ile kavitenin arka duvarının köşe kısmı arasındaki etkileşim yüzünden kavite içinde zamana bağlı değişen salınımlar oluşmaktadır (Şekil 1.9). Kavite girişinde, ön duvarın köşesinde, kavite içindeki basınç serbest akış basıncından az olduğu için kararsız hale gelen akım çizgisi aşağıya doğru eğilerek kaviteye kütle ve momentum geçişine sebep olur. İçeri giren kütle, kavite içindeki yitimli prosesler tarafından yavaşlatılır ve içerideki basınç bu sayede serbest akış basıncından fazla hale gelir. Sonrasında akım çizgisi fazla basınç ve kütleden dolayı kavite dışına doğru eğilir.



Şekil 1.9. Kavite akışı kesme tabakasının schlieren görüntüsü [36].

Lazar ve diğerleri [37], 1.4 Mach sayısı ve 5.29 L/D oranı için deneysel olarak çalışmış ve akışa lazer uygulayarak basınç salınımlarını azaltmayı hedeflemiştir. Kavite giriş köşesinden lazer ışınları gönderilerek kesme tabakasındaki değişimler incelenmiştir. Lazer enerjisi yüklemesi kesme tabakası salınımlarını azaltmıştır.

Williams ve diğeri [38, 39] süpersonik hava tüneline akış fiziğini incelemiş ayrıca kavite akustik kontrol edebilme mekanizmaları üzerine çalışmışlardır. Ses basınç seviyesi değerlerinin hava tüneli basınç değerlerine bağlı olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca bu çalışmada akış karakteristiklerinin Mach sayısına bağlı olarak değiştiği savunulmuştur.

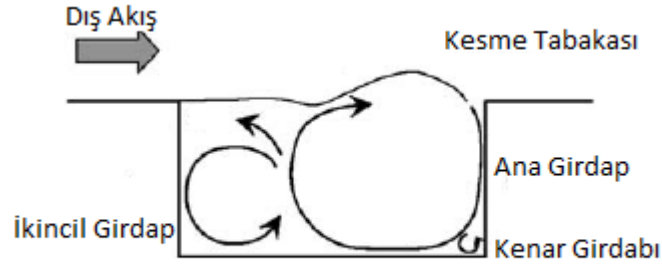
Stallings [40], farklı L/D oranları için süpersonik hızlarda deneysel çalışmıştır. Sonuçlara göre kavite derinliğindeki artış basınç dağılımı üzerinde ciddi bir etkiye sahiptir. Sığ kavite için akış kavite giriş köşesinde ayrılıp kavite yerine çarpılmaktadır. Sığ kavite kesme tabakası kavite içi akış ile daha fazla etkileşime sahiptir. Derin kavite ise kavite yerine çarpma gerçekleşmemekte kavite girişinde ayrılan akış kavite çıkış köşesinde tekrar birleşmektedir. Mach sayısı 2.36 ve 2.86 olan çalışmalar karşılaştırıldığında kavite akışının Mach sayısına da bağlı olduğu gözlemlenmiştir.

Chung [41] ve Heller vd [42] deneysel çalışmalarında basınç salınımlarının arka duvarda en yüksek değerlere çıktığını ve basınç dalgalarının bu duvarda oluştuğunu savunmuşlardır. Kesme tabakasının kavite arka duvarı ile olan etkileşimi kavite de oluşan karmaşık akışın başlıca sebebi olarak gösterilmiştir.

Disimile ve Toy [43] çalışmalarında L/D değerini 1.47 ile 8.73 arasında değiştirerek açık kavite akışı üzerine deneysel olarak çalışmışlardır. Çalışmaya göre rezonans frekansları kavite genişliğine değil kavite uzunluğuna bağlıdır. Küçük L/D değerlerinde daha yüksek ses basınç seviyeleri ölçümlenmiştir. Strouhal sayısı kavite uzunluğu ve kavite derinliğine bağlı bir parametredir.

Zhuang ve diğeri [44] süpersonik rüzgâr tüneline 2 Mach sayısında L/D=1, 2, 3 ve 5.1 değerleri için deneyler yapmış ve L/D oranının akışa olan etkilerini gözlemlemişlerdir. L/D=3 geometrisinde akış yapısı oldukça karmaşık hale gelmiş ve SPL değerleri en yüksek değerlere bu L/D oranında ulaşmıştır dolayısıyla en güçlü rezonans döngüsü bu konfigürasyondaki kavitede gözlemlenmiştir.

Faure ve diğeri [45] farklı L/D oranları ve Reynolds sayıları için deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında kavite akış dinamiklerini şematik olarak Şekil 1.10'da verildiği gibi göstermişlerdir. Kavite bölgesinde büyüklükleri geometrik özelliklere bağlı olarak değişen 3 girdap oluşumundan söz edilmiştir. Bu yapılar ana girdap, köşe girdabı ve ön duvar yakınında oluşan ikincil girdaptır.



Şekil 1.10. Kavite akışı dinamikleri [46]

Heigermoser ve diğeri [46] tarafından yapılan deneysel çalışma düşük hız değerlerinde farklı L/D oranları için açık kavite aralığında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada basınç spektrumundaki osilasyonların frekansının ve genliğinin, kavite uzunluğunun kaviteye gelen sınır tabakası momentum kalınlığı oranına ( $L/\theta$ ) bağlı olduğu iddia edilmektedir.  $L/\theta$  değeri düştükçe osilasyonlar azalmaktadır. Yani kavite akışı türbülanslı sınır tabakasının yapısından büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu etki ise kesme tabakasının düzensiz hareketlerine hükmetmekte ve kesme tabakasında türbülanslı yapıların oluşumunu ve etkileşimini tetiklemektedir.

## 1.6. Tezin Amacı

Bu tezin amacı süpersonik kavite akışını HAD yardımıyla modelleyerek kavite akışının doğasını ve fiziğini anlayabilmektir. İki ve üç boyutlu türbülanslı sıkıştırılabilir akış için HAD simülasyonları sıkıştırılabilir Navier-Stokes denklemlerini gradyanların ve türevlerin hesaplanmasında Fluent [47] programı

kullanılmıştır. Analizlere ağ yapısı ve zaman adımı çalışması ile başlanmış sonuçlar ağ yapısı ve zaman adımından bağımsız hale getirildikten sonra uygun parametreler ile analizler gerçekleştirilmiştir. Tezin amaçları ayrıntılı olarak aşağıdaki başlıklar ile verilebilir.

- İki boyutlu akış simülasyonları ve sayısal parametrelerin akış çözümlemesi üzerine etkilerinin araştırılması
- Türbülans modellerinin kavite akışı üzerine etkisinin incelenmesi
- Kavite uzunluk/derinlik oranının akış fiziği üzerine etkilerinin incelenmesi
- Üç boyutlu akış simülasyonları ve iki boyutlu akış simülasyonları sonuçlarının kıyaslanması ve akış fiziğinin anlaşılması

Sonuçların analizi için kavite osilasyon frekanslarını hesaplamaya yarayan hızlı Fourier dönüşümü analizi yapılmış, salınımda dominant frekanslar belirlenmiş ve Rossiter formülasyonu ile analiz sonuçlarında elde edilen frekans değerleri kıyaslanmıştır. Simülasyon sonuçları deneysel çalışma ile karşılaştırılmış bu kıyaslamalar SPL ve ortalama basınç kat sayıları ölçümleri cinsinden yapılmıştır. Hız, basınç ve enerji konturları çizdirilmiş ve akışın fiziğinin anlaşılmasında bu konturlardan yararlanılmıştır.

## **1.7. Tez Planı**

Bu tezde uçakların mühimmat atan bölümlerini temsil eden süpersonik açık kavitelereki türbülanslı ve zamana bağlı değişen akışın davranışını, karmaşık yapısını açıklamak, ortaya koymak amaçlanmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda sıkıştırılabilir, zamana bağlı ve türbülanslı akış için Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemleri iki boyutta ve üç boyutta RANS ve DES yaklaşımları kullanılarak çözümlenmektedir.

Bölüm 1’de literatür taraması yapılmış ve konu hakkında genel bilgiler verilmiştir. Bölüm 2, sayısal yöntemler ve simülasyonlardaki akış koşulları ve geometriler ile ilgili genel bilgileri içermektedir. Bölüm 3, iki boyutlu akış simülasyonları ve



sayısal parametrelerin akıŖa etkileri üzerine kurulmuŖtur. Bölüm 4 kavite uzunluğunun akıŖ fiziği üzerine olan etkilerini kapsamaktadır. Bölüm 5 akıŖ fiziğini açıklamak üzerine kurulmuŖ, 3 boyutlu ve 2 boyutlu simülasyon sonuçları ve bu sonuçların kıyaslanması üzerinedir. Son bölümde ise sonuçların yorumlanmasına ve gelecekte yapılabilcek alıŖmalara yer verilmiŖtir.

## 2. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Kavite geometrisi oldukça basit bir geometri gibi gözüксе de kavite akışı, girdap oluşumları, kesme tabakası kararsız hareketleri ve birçok etkileşim içeren oldukça kaotik bir akıştır ve türbülanslı akışa iyi bir örnektir. Bu başlık altında türbülans ve türbülans modelleme tekniklerinden bahsedilecektir. İki ve üç boyutlu türbülanslı sıkıştırılabilir akış için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği simülasyonları, sıkıştırılabilir Navier-Stokes denklemlerini gradyanların ve türevlerin hesaplanmasında yoğunluk tabanlı algoritma kullanarak çözen ANSYS FLUENT [47] programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, DES ve RANS çözümleri yapılmıştır. RANS yöntemi düşük maliyetli bir yöntem olmakla beraber bu konu üzerine çalışan birçok araştırmacıya göre oldukça iyi sonuçlar verebilmektedir. DES yöntemi daha pahalı olmasına rağmen bu akış için denenmiştir. Akışkanların hareketini temsil eden kütle, momentum ve enerji denklemleri ve bu denklemlerin çözümlenmesi bu bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

### 2.1. TÜRBÜLANS

Laminer akış analizlerinde türbülanslı yapıların modellenmesine gerek olmadığından, doğru bir çözüm için çok fazla hücre içeren bir ağ yapısına gerek kalmamaktadır. Türbülanslı akışlarda en küçük türbülanslı yapıların çözümlenebilmesi için çok sayıda hücre içeren bir ağ yapısı gerekmektedir. Türbülanslı çözümlenebilmek için türbülans modellerine ihtiyaç vardır [48].

Türbülansın matematiksel ifadesi, akışkanın atalet kuvvetinin viskoz kuvvetine oranı ile boyutsuz bir sayı olan Reynolds sayısı ile ifade edilir. Re sayısı akışkanın yoğunluğuna ( $\rho$ ), hızına ( $U$ ), viskozitesine ( $\mu$ ) ve akışkanın temas ettiği cismin karakteristik uzunluğa bağlıdır ve aşağıdaki denklemde verildiği gibi ifade edilir.

$$Re = \frac{\rho UD}{\mu} = \frac{\text{atalet kuvvetleri}}{\text{viskoz kuvvetler}} \quad (2.1)$$

Küçük ölçeklerdeki ve düşük hızlardaki yani düşük Reynolds değerlerindeki viskoz akışlar için bölüm 2.2’de verilen hareket denklemleri çözümlenebilir ve düzenlidir. Bu tip akışlar vortisite ve momentumun viskoz yayılımı ile kontrol edilmekte ve laminer akış olarak adlandırılmaktadır. Deneysel ve doğal yollarla bu akışı gözlemlemek mümkündür. Büyük Reynolds sayılarında akıştaki atalet kuvvetleri viskoz kuvvetlerden baskın olmakta ve laminer akış düzensiz hale dönüşmektedir. Yüksek hızlar ve basınç değerleri salınımlı hale gelmekte ve hareket üç boyutlu ve düzensiz bir yapıya bürünmektedir. Bu kaotik hareketlenmeler ise türbülans olarak tanımlanmaktadır [48,49].

Günlük hayatın ayrılmaz bir parçası olan türbülans, örneğin roketler, hava araçları, gemiler ve otomobiller gibi araçları çevreleyen akışta, bulutların hareketi, akarsu akışı gibi jeofiziksel olaylarda gözlemlenmektedir. Günlük hayatın bu kadar içinde olan bu akışlar da göz önüne alındığında sık sık karşımıza çıkan bu akış hareketini anlayabilmek için türbülans kavramı ele alınmalıdır [49,50].

### 2.1.1. Türbülansın Genel Özellikleri

Hinze [51], türbülansı “ Türbülans belirli niteliklerin zaman ve uzay koordinatlarında rastgele varyasyonlarından oluşan bir akış hareketidir” söyleviyle ifade etmiştir. Türbülansın başlıca özelliklerinden bazıları başlıklar halinde sunulmuştur.

- **Düzensizlik:** Türbülans her zaman kaotik, rastgele ve düzensiz bir akışı temsil eder. Türbülansı zaman ve uzay koordinatlarının fonksiyonu olarak yazmak mümkün olmadığından bu tip akışlarda deterministik yaklaşım, işe yaramamaktadır [48,49].

- **Kararsızlık ve Lineer Olmama:** Viskoz bir akış için, Navier-Stokes denklemleri ile lineer olmayan atalet ve viskoz terimlerin etkileşimi kararsızlık yaratır. Bu kararsızlık; rotasyonlardan, üç boyut etkisinden ve zamana bağlı değişimlerden dolayı son derece karmaşıktır. Navier-Stokes denklemindeki lineer olmayan terimler farklı dalga boylarının ve yönlerinin salınımlarının etkileşimlerini göstermektedir. Temel fiziksel olay vortex elemanları ortalama hız gradyanları ile yönlendirilirse vortex uzaması gerçekleşmekte ve türbülans enerji kazanmaktadır. Dolayısıyla büyük ölçekli türbülans hareketleri enerjinin büyük bir kısmını taşır ve yayılım gücünü arttırır. Büyük türbülanslı yapılardaki enerji küçük türbülanslı yapılara iletilir ve belirli bir dalga boyunda viskozite etkisi ile yitim gerçekleşir [48,52].
- **Süreklilik:** Türbülans sürekli bir süreçtir. Doğru bir sayısal yaklaşım için bütün ölçeklerdeki olaylar çözümlenmelidir. Tennekes ve Lumley'e göre [53], türbülanslı akıştaki en küçük ölçekli olay, moleküler ölçek uzunluğundan daha büyüktür. Doğru bir sayısal yaklaşım yapabilmek için ilgili bütün ölçekli olayların çözümlenmesi gerekmektedir.
- **Türbülans Ölçekleri:** Türbülans büyük ölçekten küçük ölçeklere doğru ilerleyen sürekli bir spektruma sahiptir. Türbülanslı akış spektrumunu tanımlamak için girdaplardan yararlanılmaktadır. Girdaplar yerel bir dönme hareketidir ve sınır tabakası kalınlığı ile orantılı büyüklüklere sahiptirler. Türbülansın kinetik enerjisi büyük girdaplardan küçük girdaplara aktarılmakta ve küçük girdaplar ise ısıya dönüşmekte ve yitim gerçekleşmektedir. Dolayısıyla bütün viskoz akışlar gibi türbülanslı akışlarda da her zaman yitim gerçekleşir [48].

### 2.1.2. Türbülanslı Akışın Matematiksel İfadesi

Sıkıştırılabilir akış hareketini çözümlmek için kütle, momentum ve enerji denklemlerini çözmek gerekir. Bu denklemler aşağıda verildiği gibi ifade edilmektedir[48]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ji}}{\partial x_j} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( e + \frac{1}{2} u_i u_i \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho u_j \left( h + \frac{1}{2} u_i u_i \right) \right] = -\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i t_{ij}) + \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (2.4)$$

Bu denklemlerde  $e$ , iç enerji,  $h=e+p/\rho$  özgül entalpi değeridir. Sıkıştırılabilir akışlar için,  $t_{ij}$  terimi,  $\zeta$  ikincil viskozite terimini ve  $\mu$  yani moleküler viskozite terimini içeren viskoz stress tensörüdür. Bu terim aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$t_{ij} = 2\mu s_{ij} + \zeta \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (2.5)$$

$s_{ij}$  açısal deformasyon ve  $\delta_{ij}$  Kronecker deltadır. Bir akış elemanı tanım olarak en küçük akış hareketinden daha küçük olduğundan sadece iletim ile ısı transferi yapabilir. Isı akısı vektörü  $q_j$  terimi Fourier ısı iletim kanunundan gelmektedir ve aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir:

$$q_j = -k \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (2.6)$$

k, ısı iletim kat sayısıdır. İkincil viskoziteyi moleküler viskozitede cinsinden yazarak denklemler sadeleştirilebilir.

$$\zeta = -\frac{2}{3}\mu \quad (2.7)$$

Moleküler viskozite hava için Sutherland viskozite formülasyonu kullanılmıştır.

$$\mu = 1.456 \times 10^{-6} \frac{T^{3/2}}{T + 110.3} \text{ Nt-s/ m}^2 \quad (2.8)$$

İç enerji  $e$ , özgül entalpi  $h$  ideal gazlar için denklem 2.9 ve 2.10'daki gibi verilmektedir.

$$e = c_v T \quad (2.9)$$

$$h = c_p T \quad (2.10)$$

$c_p$  ve  $c_v$  terimleri sabit basınç ve sabit hacim için özgül ısı katsayılarıdır. İdeal gazlar için basınç, sıcaklık ve yoğunluk arası ilişki denklem 2.11'de verilen denklem ile formüle edilmiştir. Bu denklemde  $R$ , ideal gaz sabitidir.

$$P = \rho RT \quad (2.11)$$

Moleküler ısı akısı aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$q_i = -\frac{C_p \bar{\mu}}{\text{Pr}} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} \quad (2.12)$$

2.12 no'lu denklemdeki Pr, moleküler Prandtl sayısıdır ve şöyle formüle edilmiştir.

$$\text{Pr} = \frac{\mu C_p}{\hat{k}} \quad (2.13)$$

Süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin bir arada çözülmesi ile bilinmeyen hız, basınç, sıcaklık, yoğunluk değerleri hesaplanacaktır. Sınır şartları ve ilk şartların belli olduğu bir akış problemi Navier-Stokes denklemlerinin analitik bir çözümü bulunmadığından bu denklemler sayısal yöntemlerle HAD programları ile çözümlenmektedir.

## 2.2. TÜRBÜLANSIN MODELLENMESİ VE SAYISAL YAKLAŞIMLAR

Türbülanslı akışların karakteristik özelliklerinden bir tanesi salınımlı bir akış alanı yaratmasıdır. Akış alanında taşınan her veri salınıma maruz kalabilmektedir. Bu salınımlar küçük ölçekte ve yüksek frekans değerlerinde olabilirler, bu durum mühendislik çözümlerinde maliyeti arttırmaktadır. Maliyeti azaltmak ve analiz sürelerini düşürmek için korunum denklemleri Reynolds ortalamalı ya da küçük ölçekleri ihmal edecek şekilde modifiye edilir; ancak modifiye edilen denklemler probleme ek bilinmeyenler dâhil eder ve bu bilinmeyenlerin çözümü için türbülans modelleri gerekir. Maalesef bütün türbülanslı akış problemlerini çözümleyebilen tek bir türbülans modeli bulunmamaktadır. Birçok türbülans modeli arasından seçilecek olan model, var olan bilgisayar gücüne, zamana, istenen doğruluk mertebesine ve akış fiziğine bağlıdır. Türbülanslı akış simülasyonlarında var olan dört önemli yöntem: RANS,DES, LES, DNS' dir.

Yüksek Reynolds sayısındaki zamana bağlı akışlar için Navier-Stokes denklemlerinin her ölçek için çözülmesi bazı durumlarda üstesinden gelinemez bir durumdur. Navier-Stokes denklemlerinin çözümlenebilir olması için var olan Reynolds ortalaması ve filtreleme yaklaşımları ile küçük ölçekli türbülans salınımlar çözülmek yerine modellenmektedir. Her iki yöntem ile de korunum denklemlerine yeni bilinmeyen eklenmektedir.

Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemleri türbülanslı akışı ortalama ve çalkantılı kısım olarak ikiye ayırmaktadır ve tüm ölçeklerdeki türbülanslı yapıları modellenmektedir. Bu sebepten ötürü RANS bazlı modelleme yaklaşımları analiz zamanını ve gereken bilgisayar gücünü büyük oranda azaltmaktadır. Bu çalışma kapsamında  $k-\omega$  ve  $k-\epsilon$  olmak üzere iki çeşit RANS türbülans modelinden faydalanılmıştır.

LES yöntemi büyük ölçekteki olayların tamamını çözümleyerek yeni bir yaklaşımda bulunmaktadır. LES yönteminde filtrelenmiş Navier-Stokes denklemleri çözümlenmektedir. LES yöntemi ile daha az türbülanslı yapı modellenmekte ve daha çok türbülans çözümlenmektedir böylece türbülans modellerinden kaynaklanan hata miktarı azalmaktadır. Filtreleme ile Navier-Stokes denklemleri sadece büyük girdaplar için geçerli hale getirilmektedir. RANS gibi bu yöntemde de filtreleme ile ek bilinmeyenler oluşmakta ve modelleme gerekmektedir. Yüksek Reynolds sayıları için LES metodu ciddi miktarda bilgisayar kaynağı gerektirmektedir. Bunun birincil sebebi enerji içerikli girdapların zaman ve uzay alanında çözümlenmesi gerekmesidir.

Ayrık girdap benzeşim yöntemi (DES) zamana bağlı değişen RANS ve LES yöntemlerinin birleşimi ile elde edilen LES kadar maliyetli olmayan bir yöntemdir. LES yöntemi yüksek Reynolds sayısındaki iç akış bölgelerinde yani büyük ölçekli olayların baskın olduğu kısımda kullanılmakta, duvar yakını viskoz etkilerin baskın olduğu yerlerde ise RANS modeli kullanılmaktadır. DES metodu LES kadar olmasa da bilgisayar gücü ve RANS modeline göre daha uzun zaman gerektirir [46].

### **2.2.1. RANS Yöntemi**

Reynolds ortalamasında Navier-Stokes denkleminde bulunan değişkenler ortalama ve salınımlı kısımlar olmak üzere iki parçaya ayrıştırılırlar. Bazı akış özelliklerinin ayrıştırılması aşağıdaki gibidir[48].



$$\left. \begin{aligned}
u_i &= \tilde{u}_i + u_i'' \\
p &= P + p' \\
h &= \tilde{h} + h'' \\
e &= \tilde{e} + e'' \\
T &= \tilde{T} + T'' \\
q_j &= q_{Lj} + q_j'
\end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Denklem 2.12'de verilen değişkenler ortalama ve salınımlı olmak üzere iki değişkene ayrıştırılmışlardır. Bu denklemler, denklem 2.2-2.4 ve 2.11'de yerlerine konulduklarında ve elde edilen denklemlerin ortalamaları alındığında Favre ortalamalı korunum denklemleri elde edilir.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{t}_{ji} - \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i] \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t} \left[ \bar{\rho} \left( \tilde{e} + \frac{\tilde{u}_i \tilde{u}_i}{2} + \frac{\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_i''}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \bar{\rho} \tilde{u}_j \left( \tilde{h} + \frac{\tilde{u}_i \tilde{u}_i}{2} \right) + \tilde{u}_j \frac{\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_i''}{2} \right] &= \frac{\partial}{\partial x_j} [-q_{Lj} - \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}'' + \bar{t}_{ji} \tilde{u}_i'' \\
- \bar{\rho} \tilde{u}_j'' \frac{1}{2} \tilde{u}_i \tilde{u}_i''] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \tilde{u}_i (\bar{t}_{ij} - \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i'') \right] & \quad (2.17)
\end{aligned}$$

$$P = \bar{\rho} R \tilde{T} \quad (2.18)$$

Bu denklemlerde  $\bar{\rho}$  ortalama yoğunluk,  $\tilde{u}_i$  ortalama hız, P ortalama basınç,  $\bar{t}_{ij}$  toplam gerilmeler,  $\tilde{e}$  birim kütle ise ortalama enerji terimidir. Denklem 2.15 ve 2.18 laminar eşlerinin aynısıdır. Denklem 2.17, toplam enerji denklemdir. Bu denklem iç enerji, ortalama akış kinetik enerjisi ve türbülans kinetik enerjisinden oluşur. Bu üç enerjide toplam enerji denklemine fiziksel özellikleri temsil eden ek bilinmeyen

terimler ekler. Sol taraftaki ilk iki terim türbülans salınmalarına bağlı kinetik enerji terimidir ve aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\bar{\rho}k = \frac{1}{2} \bar{\rho} \overline{u_i'' u_i''} \quad (2.19)$$

$u_j''$  ve  $h''$  terimleri arasındaki bağıntı ise türbülansa bağlı ısı taşınımının ifadesidir ve aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$q_{Tj} = \bar{\rho} \overline{u_j'' h''} \quad (2.20)$$

Sağ taraftaki  $t_{ji} u_i''$  ve  $\frac{\rho u_j''}{2u_i'' u_i''}$  terimleri ise moleküler difüzyon ve türbülans kinetik enerjisinin türbülansa bağlı taşınımını ifade etmektedir. Bu terimler ortalama enerji denklemindeki taşınımlı terimlerden ileri gelen toplam entalpinin ortalama entalpi, ortalama kinetik enerji ve türbülanslı kinetik enerjiden oluştuğunun göstergesidir.

Denklem 2.16'daki  $\bar{\rho} \overline{u_j'' u_i''}$ , Reynolds gerilmesi olarak isimlendirilir. Burada  $u_i''$  ve  $u_j''$  x-yönündeki ve y-yönündeki hızın bu yönlerdeki ortalama hız değerlerinden anlık sapma miktarlarıdır. Bu terim ortalama momentumun türbülanslı çalkantılara bağlı taşınımının ifadesidir ve türbülanslı akışı laminer akıştan ayıran terimdir. Türbülans olayının kaotik yapısından ötürü bu değerlerin hesaplandığı analitik bir yöntem mevcut değildir. Bu nedenle bu terim hesaplanırken ortalama hızdan sapma değerleri bazı yaklaşımlar kullanılarak bulunur. Türbülans modelleri bu değerlerin hesaplanabilmesi için geliştirilmiştir. Reynolds gerilimi sıkıştırılabilir akışlarda sıfır, bir ve iki denklemlilerle çoğu zaman Boussinesq yaklaşımı kullanılarak çözümlenir ve Boussinesq hipotezine göre Reynolds gerilmelerinin hız gradyanları ile ilişkisi aşağıdaki gibidir [46,48]:

$$\rho \tau_{ij} = \bar{\rho} \overline{u_j'' u_i''} = 2\mu_t \left( S_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \delta_{ij} \quad (2.21)$$

Bu yaklaşımda var olan türbülans viskozite terimi ( $\mu_t$ ) türbülans modelleri ile çözümlenmektedir. Boussinesq yaklaşımının dezavantajı, türbülans viskozitesini isotropik olarak varsaymasıdır; ancak gerçekte böyle bir şey söz konusu değildir. Spalart-Allmaras türbülans modelinde Navier-Stokes denklemlerine ek olarak sadece türbülans viskozitesi  $\mu_t$ 'yi ifade eden tek bir denklem daha çözümlenmektedir. İki denklemlilik modellerden olan k- $\epsilon$  ve k- $\omega$  modelleri ile türbülans kinetik enerjisi için k denklemlilik ve türbülans yitimi için  $\epsilon$  veya spesifik yitim için  $\omega$  ek denklemlilik çözümlenmektedir ve bu denklemlilerde  $\mu_t$  terimi  $\epsilon$  ve  $\omega$ 'nın bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan k- $\epsilon$  ve k- $\omega$  türbülans modelleri aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır[46].

### 2.2.1.1. k- $\omega$ Türbülans Modeli

İki denklemlilik bir model olan k- $\omega$  türbülans modeli Kolmogorov [54] tarafından bulunmuş ve zaman içinde birçok araştırmacı tarafından geliştirilmiştir. Kolmogorov ilk türbülans parametresini türbülanslı kinetik enerji yani k, ikinci parametreyi ise birim türbülans kinetik enerjisindeki yitim yani  $\omega$  olarak tanımlamıştır. Kolmogorov türbülans viskozitesi, türbülans uzunluk skalası ve yitimin matematiksel tanımını  $\mu_t = \rho k / \omega$ ,  $l = k^{1/2} / \omega$  ve  $\epsilon = \omega k$  şeklinde yapmıştır. Akışın hareketindeki fiziksel prosesler (düzensizlik, iletim, difüzyon, yitim, saçılım) göz önüne alınarak Kolmogorov türbülans yitimi için aşağıdaki denklemlilik elde etmiştir.

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = -\beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \sigma \mu_t \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (2.22)$$

Bu çalışmada kullanılan program olan FLUENT [46] ve EDDYBL [48] Wilcox k-  $\omega$  türbülans modelini temel almaktadır. Wilcox [48] tarafından geliştirilen k-  $\omega$  modelilik ile ilgili ayrıntılı denklemliler aşağıda verilmektedir.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_j k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma^* \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 - \beta \rho \omega (2\Omega_{mm} \Omega_{mm})^{0.5} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma^* \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (2.24)$$

Denklem 2.23 ve 2.24'deki türbülans gerilim tensörü  $\tau_{ij}$  denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\tau_{ij} = 2\mu_t \left[ S_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.25)$$

Açısal deformasyon tensörü  $S_{ij}$  denklem 2.2.6'da verildiği gibidir.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (2.26)$$

Türbülans viskozite aşağıda ifade edilmiştir.

$$\mu_t = \frac{\alpha^* \rho k}{\omega} \quad (2.27)$$

Dönme deformasyon tensörü aşağıdaki gibidir.

$$\Omega = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (2.28)$$

Türbülans ısı akısı ve ısı akısı denklemlerindeki Prandtl sayıları formülasyonları aşağıda sırası ile verilmektedir.

$$q_j = - \left( \frac{\mu}{Pr_l} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (2.29)$$

$$Pr_l = \frac{\mu c_p}{\hat{k}} \quad (2.30)$$

$$Pr_t = \frac{\mu_t c_p}{\hat{k}_t} \quad (2.31)$$

Denklemlerdeki kat sayılar ise aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.52 \\ \beta_o &= 0.072 \\ \beta_o^* &= 0.09 \\ \sigma &= 2 \\ \sigma^* &= 2 \end{aligned} \quad (2.32)$$

### 2.2.1.2. k-ε Türbülans Modeli

Launder ve Spalding [55] tarafından son halini alan bu model, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans kinetik enerjisi yitim oranı için taşınım denklemlerini çözmektedir. k-ε modelinin temeli akışın tam gelişmiş olduğu ve duvar yakınında türbülans stress üretim miktarı ile türbülans kinetik enerjisi yitiminin eşit olduğu lokal bir denge durumu olduğunu varsayar. Birim kütle için yitim (ε) aşağıdaki korelasyon ile tanımlanmaktadır.

$$\varepsilon = \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \quad (2.33)$$

Bu denklem üzerinde gerekli değişikliklerin yapılması ve kat sayıların eklenmesinin ardından standart k-ε modeli denklemleri aşağıdaki halini almaktadır.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_j k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma^* \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_T / \sigma_\varepsilon) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (2.35)$$

2.34 ve 2.35 no'lu denklemlerdeki türbülans viskozitesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.36)$$

Denklemlerdeki kat sayılar ise aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} C_{\varepsilon 1} &= 1.44 \\ C_{\varepsilon 2} &= 1.92 \\ C_\mu &= 0.09 \\ \sigma_k &= 1.0 \\ \sigma_\varepsilon &= 1.3 \end{aligned} \quad (2.37)$$

Bu model yüksek Reynolds sayılarında geçerlidir. Sınır tabaka içerisinde çok ince bir sınır tabakası kalınlığı vardır, bu sınır tabakasının bitimi türbülansa geçişin göstergesidir. Sınır tabakası içerisinde Reynolds sayıları düşmekte ve k-ε modeli yetersiz kalmaktadır. Bu modelde duvara en yakın nokta sınır tabakası dışında yani türbülanslı bölgededir. Düşük Reynolds sayılarının olduğu sınır tabakası bölgesi içinse duvar fonksiyonları tanımlanmıştır[56].

### 2.2.2. DES Yöntemi

DES, büyük ölçekli yapılarda ve ayrılma bölgelerinde LES metodunu, kesme tabakalarında, sınır tabakalarında ve duvar diplerinde ise RANS metodunu uygulayan zamanı ve kaynakları verimli kullanmayı temel alan bir metottur. LES yöntemi büyük ölçekli olayların çözümlendiği küçük ölçekli olayların (SGS-subgrid scale) modellendiği bir metottur. Büyük ölçekli oluşumlar sınır şartlarından direk olarak etkilenmekte ve Reynolds gerilmelerinin çoğunluğunu barındırmaktadır. Küçük ölçekli olaylar ise daha zayıftır ve daha az Reynolds gerilmesi içerdiğinden ve isotropik sayılabileceklerinden ötürü büyük ölçekli olaylar kadar kritik değildirler. RANS ve LES arasında değişim  $y^+$  değerine ve mesh büyüklüğüne bağlı olarak gerçekleşir. Bu yöntem ile RANS metodu ile gözlemlenemeyen geometriye bağlı, üç boyutlu girdapları elde etmek mümkündür. DES yönteminde kritik olan iki uzunluk skalası RANS ile LES yöntemi arası geçişi belirler ve bu uzunluk skalaları aşağıda tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned}\ell_{RANS} &= \sqrt{k} / \beta^* \omega \\ \ell_{DES} &= \min(L_t, C_{DES} \Delta)\end{aligned}\tag{2.38}$$

$C_{DES}$  sabiti 0.65 değerindedir ve  $\Delta$  maksimumu hücre boyutudur,  $d$  ise duvar mesafesidir.  $\ell_{RANS} < \ell_{DES}$  olan hücreler çözümlenmemekte ve hibrid RANS metodu ile modelleme yapılmaktadır. Uzunluk skalası değerinin  $\Delta$ 'dan büyük olması ile birlikte LES moduna geçilmektedir. Bu durum da DES yönteminin geometriye ve ağ yapısı yoğunluğuna bağlı olduğunun bir göstergesidir [13]. Uzunluk skalasına bağlı olarak kullanılacak metodun (RANS ya da LES) seçilmesine harmanlama denmektedir. Yöntemin RANS kısmında  $k-\omega$  SST,  $k-\epsilon$  ve Spalart-Allmaras gibi türbülans modelleri kullanılabilir. Bu çalışmada  $k-\omega$  SST bazlı DES yöntemi kullanılmıştır. SST bazlı  $k-\omega$  modelinin  $k-\omega$  modelinden farkı türbülans viskozitesi formülasyonunda türbülans kayma gerilmesi taşınım etkilerinin de dikkate alınmasıdır. Bu model,  $k-\omega$  türbülans modeline göre dış akışlarda ve ters basınç gradyanı olan akışlarda daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu modelde duvar kenarlarında  $k-\omega$  modeli,

iç bölgelerde ise k-ε modeli kullanılmaktadır. Menter [56] tarafından geliştirilen bu metot ile k-ε formülasyonu k-ω formülasyonuna dönüştürülmüştür. Türbülans kinetik enerji denklemi harmanlanmış DES fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_j k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - (1-\Gamma) \beta^* \rho \omega k - \Gamma C_d \frac{k^{3/2}}{\Delta} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma^* \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.39)$$

$C_d$  sabiti 0.01 değerindedir ve  $\Gamma$ , DES-harmanlama metodu ile ortaya çıkan yeni bir terimdir ve türbülans viskozitesinin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\mu_t = (1-\Gamma) \rho \frac{k}{\omega} + \Gamma C_s \rho \sqrt{k} \Delta \quad (2.40)$$

$C_s$  kat sayısı 0.01 değerindedir. Bu formülasyon ile  $\Gamma$  değişkeninin türbülans modellemeye etkili bir faktör olduğu görülmektedir [46,48].

### 2.3. SAYISAL YÖNTEMLER

İki ve üç boyutlu türbülanslı sıkıştırılabilir akış için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği simülasyonları ANSYS-FLUENT [46] programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zamanda ayrıklaştırma için ikinci dereceden kapalı ayrıklaştırma, mekânda ayrıklaştırma için ise ikinci dereceden upwind yönteminin kullanılmıştır. Akış sıkıştırılabilir olduğu için yoğunluk tabanlı algoritma ile çözümler gerçekleştirilmiştir.

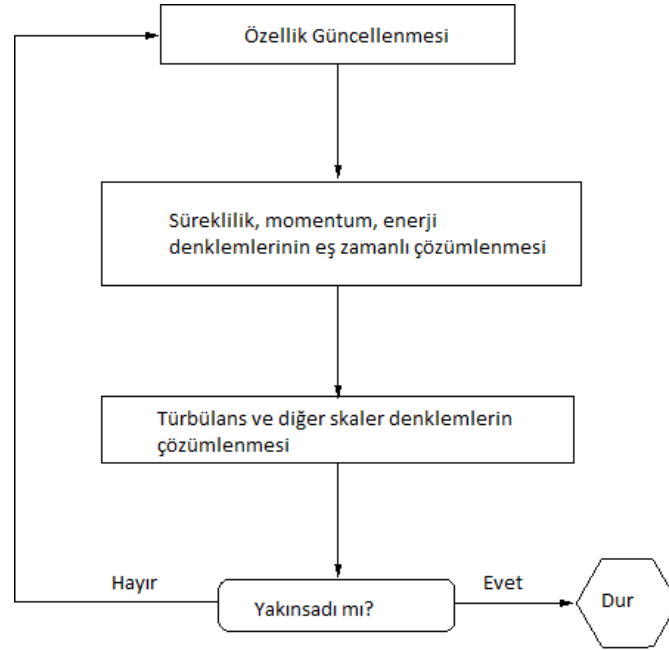
#### 2.3.1. Yoğunluk Tabanlı Algoritma

Yoğunluk tabanlı yaklaşım, yüksek hızlarda sıkıştırılabilir akışlar için geliştirilmiş bir algoritmadır. FLUENT [46] programında yoğunluk tabanlı algoritma süreklilik, momentum ve gerektiği takdirde enerji denklemlerini eş zamanlı olarak çözümlenmektedir. Korunum denklemleri lineer olmadığından dolayı yakınsama



sağlanana kadar denklemler güncellenen özellikler ile yeniden çözülür. Bu döngü Şekil 2.1’de şematize edilmiş ve basamaklar halinde aşağıda anlatılmıştır.

- Var olan sonuca göre akış özellikler güncellenir. (Çözüm yeni başlıyor ise ilk şartlar dikkate alınır)
- Süreklilik, momentum, enerji denklemleri eş zamanlı olarak çözülür.
- Yenilenen değerler ile türbülans, enerji, radyasyon gibi diğer skaler denklemler çözülür.
- Yakınsama kriteri kontrol edilir, sağlanıyorsa durulur, sağlanmıyorsa döngü başa döner.



Şekil 2.1. Yoğunluk tabanlı çözüm metodu [47]

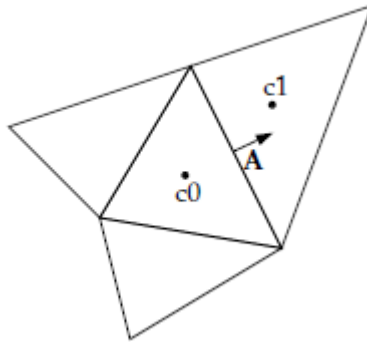
Yoğunluk tabanlı çözücüde, korunum denklemlerinin lineerleştirilmesi için açık ve kapalı yöntem olmak üzere iki farklı teknik bulunmaktadır. Kapalı yöntem ile daha hızlı bir şekilde yakınsama sağlanabilmekte ancak kapalı ayrıklaştırma yöntemi açık yöntemle göre daha fazla hafızaya ihtiyaç duymaktadır. Bu teknikler ayrıntılı olarak ilerleyen bölümlerde anlatılmaktadır.

### 2.3.2. Kontrol Hacim Yaklaşımı ve Ayrıklaştırma

FLUENT [46] korunum denklemlerini lineerleştirmek ve cebirsel denklemlere çevirip sayısal olarak çözümlenebilir hale getirmek için kontrol hacim yaklaşımını kullanmaktadır. Bu teknik, her kontrol hacmi için korunum denklemlerinin integre edilmesini temel alır. Akış alanında iletilen, kontrol hacim içerisindeki herhangi bir  $\phi$  niceliğinin değişim integral denklemi halinde aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [46].

$$\underbrace{\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV}_{\text{kontrol hacimdeki zamana göre değişim}} + \underbrace{\oint \rho \phi \vec{u} \cdot d\vec{A}}_{\text{hücre yüzeylerinden taşınım ile giren ve çıkan miktar}} = \underbrace{\oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A}}_{\text{hücre yüzeylerinden difüzyonla geçen miktar}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{kontrol hacimde üretilen miktar}} \quad (2.41)$$

Bu denklemde  $\rho$  yoğunluk,  $\vec{u}$  hız vektörü,  $\vec{A}$  yüzey alanı vektörü,  $\Gamma_\phi$   $\phi$ 'nin difüzyon katsayısı,  $S_\phi$  ise birim hacimde üretilen  $\phi$  miktarıdır. Denklem 2.41 çözüm alanındaki her kontrol hacmine ya da her hücreye uygulanmaktadır, Şekil 2.2' de üçgen hücreler kontrol hacmine örnektir ve bu hücreler için ayrıklaştırılmış denklem 2.42'de verildiği gibidir.



Şekil 2.2. Skaler taşınım denklemi ayrıklaştırılmasının kontrol hacmine uygulanması [47]

Denklem 2.42’de  $N_{\text{yüzey}}$ , hücrenin yüzey sayısıdır. Diğer bütün değişkenler denklem 2.41’dekiler ile aynıdır.

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V}_{\text{kontrol hacimdeki zamana göre değişim}} + \underbrace{\sum_f^{N_{\text{yüzey}}} \rho_f \vec{U}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f}_{\text{hücre yüzeylerinden taşınım ile giren ve çıkan miktar}} = \underbrace{\sum_f^{N_{\text{yüzey}}} \Gamma_\phi \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f}_{\text{hücre yüzeylerinden difüzyonla geçen miktar}} + \underbrace{S_\phi V}_{\text{kontrol hacimde üretilen miktar}} \quad (2.42)$$

2.42 no’lu denklemin doğrusallaştırılması çözümlenebilir olması için şarttır, Bu doğrusallaştırma  $a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_b + b$  şeklinde gerçekleştirilir. Denkleminde nb alt indisi komşu hücreleri göstermektedir a ve b ise katsayılarıdır. Doğrusallaştırma ile elde edilen cebirsel katsayılar matrisi, Gauss-Seidel yöntemi ile iteratif olarak çözülür.

FLUENT [46], ayrıklaştırılmış değerleri hücre ortalarında saklamaktadır (Şekil 2.2de c0 ve c1) ancak yüzey değerleri  $\phi_f$  taşınım terimleri için gerekli olduğundan hücre merkez değerlerinden interpolate edilir. Upwind şeması bu bağlamda işe yaramaktadır.

### 2.3.2.1. Birinci Dereceden Upwind Yöntemi

Birinci mertebeden bir doğruluk istendiğinde hücre yüzeylerindeki  $\phi$  değerleri hesaplamasında hücre merkezi  $\phi$  değerlerinin (Şekil 2.2’de c0 ve c1 noktalarına karşılık gelmektedir) hücre ortalama değeri olduğu varsayılır. Dolayısıyla birinci dereceden Upwind yönteminde  $\phi_f$  değeri,  $\phi$  değerine eşit alınmaktadır.

### 2.3.2.2. İkinci Dereceden Upwind Yöntemi

İkinci dereceden Upwind yönteminde hücre merkezinde Taylor serisi açılımı yapılarak hücre yüzeylerinde yüksek mertebede doğruluk elde edilir. İkinci dereceden Upwind metodunda yüzey değerleri  $\phi_f$ , aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\phi_f = \phi + \nabla \phi \cdot \Delta \vec{s} \quad (2.43)$$

$\phi_f$  ve  $\nabla \phi$  değerleri sırası ile herhangi bir niceliğin hücre merkez değeri ve üst hücredeki gradyanı ifade etmektedir,  $\Delta \vec{s}$  ise komşu hücrelerin merkezleri arasındaki konum vektörüdür. Denklem 2.42’de, hücre yüzeylerinden gerçekleşen difüzyonu ve hücre yüzeylerindeki taşınımı temsil eden terimlerde hesaplanmak istenen  $\phi_f$  niceliğinin gradyanı  $\nabla \phi$  görülmektedir. Bu çalışmada gradyanların ve türevlerin ayrıklaştırılmasında “düğüm tabanlı Green-Gauss” ve “Hücre Tabanlı Green-Gauss” yöntemi kullanılmaktadır. Green Gauss teoremi her hücrede  $\phi_f$  değerinin hesaplanmasını denklem 2.44’de verilen denklemle hesaplar.

$$(\nabla \phi)_{c,0} = \frac{1}{V} \sum_f^{N_{\text{yüzey}}} \phi_f \vec{A} \quad (2.44)$$

Düğüm tabanlı Green-Gauss teoremi ile denklem 2.44’deki  $\phi_f$  değerinin hesaplanmasında yüzeydeki düğüm noktaları değerlerinin aritmetik ortalamaları denklem 2.45’de verildiği gibi alınır.

$$\phi_f = \frac{1}{N_f} \sum_f^{N_{\text{yüzey}}} \phi_n \quad (2.45)$$

$N_f$  yüzeydeki düğüm sayısıdır. Hücre tabanlı yöntemlere göre daha pahalı olan bu metot özellikle yapısal olmayan ağ yapılarında daha efektif sonuçlar verebilmektedir.

Hücre tabanlı Green-Gauss teoremi ile  $\phi_f$  değerinin hesaplanmasında ise komşu hücrelerdeki değerlerin aritmetik ortalaması alınmaktadır.

$$\phi_f = \frac{\phi_{c0} + \phi_{c1}}{2} \quad (2.46)$$

### 2.3.2.3. Zamanda Ayırıklaştırma

Zamana bağlı çözümlerde korunum denklemleri hem uzayda hem zamanda ayırıklaştırılmaktadır. Zamanda ayırıklaştırma zaman adımı  $\Delta t$  değerine bağlı olarak yapılmaktadır.  $\phi$  değişkeninin zamana bağlı değişimi aşağıdaki gibidir.

$$F(\phi) = \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.46)$$

FLUENT programı, zamanda ayırıklaştırma için geri-farklar yöntemini kullanmakta olduğundan Denklem 2.46'daki zamana bağlı türev geri farklar yöntemi kullanılarak açılırsa birinci mertebeden ayırıklaştırılmış zaman terimi aşağıdaki halini alır.

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi) \quad (2.47)$$

İkinci mertebeden ayırıklaştırma ise denklem 2.48'de verilmiştir.

$$\frac{3\phi^{n+1} - 4\phi^n + \phi^{n-1}}{2\Delta t} = f(\phi) \quad (2.48)$$

$n+1$ ,  $t+\Delta t$  anındaki değeri,  $n$ ,  $t$  anındaki değeri,  $n-1$  ise  $t-\Delta t$  anındaki değeri göstermektedir. Bu çalışmada zamanda ayırıklaştırma 1.dereceden ve 2. dereceden kapalı yöntem kullanılarak yapılmıştır. Kapalı yöntem ile  $F(\phi)$  değerinin bir sonraki zaman anındaki değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi^{n+1}) \quad (2.49)$$

Bu denklem kapalı çözüm gerektirir çünkü verilen hücredeki  $\phi^{n+1}$  komşu hücredeki  $\phi^{n+1}$  değerine gerek duyar. Denklem 2.49 her zaman adımında iteratif olarak çözümlenir. Kapalı ayrıklaştırma yöntemi her koşulda yakınsayan bir çözüm elde edilmesini sağladığı için avantajlı bir yöntemdir.

#### 2.3.2.4. Momentum Denkleminin Ayrıklaştırılması

Akış alanında iletilen, kontrol hacim içerisindeki herhangi bir  $\phi$  niceliğinin değişim integral denklemi denklem 2.41'de verilmiştir. Momentum denkleminin ayrıştırılması ise 2.41 denkleminde  $\phi$  niceliğinin hız (u) ile değiştirilmesiyle denklem 2.50'deki gibi elde edilir.

$$a_p u = \sum_{nb} a_{nb} u_b + \sum P_f A \cdot \hat{i} + S \quad (2.50)$$

Basınç ve kütle akılarının bilindiği durumda bu denklem hız alanını hesaplamaktadır. Ancak basınç ve yüzey kütle akılarının elde edilmesi gerekmektedir. Şekil 2.2'deki c0 ve c1 hücreleri arası yüzeyde basınç değerlerinin hesaplanması için interpolasyon metodu kullanılmaktadır. Bu hesaplamada momentum denklemini kat sayıları kullanılmakta ve yüzeylerdeki basınç değerleri denklem 2.51'de gösterildiği gibi interpolate edilmektedir.

$$P_f = \frac{\frac{P_0}{a_{P,c_0}} + \frac{P_1}{a_{P,c_1}}}{\frac{1}{a_{P,c_0}} + \frac{1}{a_{P,c_1}}} \quad (2.51)$$

### 2.3.2.5. Süreklilik Denkleminin Ayrıklaştırılması

Şekil 2.2 ve denklem 2.22 aşağıda verildiği şekilde ayrıklaştırılabilir.

$$\sum_f^{N_{\text{yüze}}y} J_f A_f = 0 \quad (2.52)$$

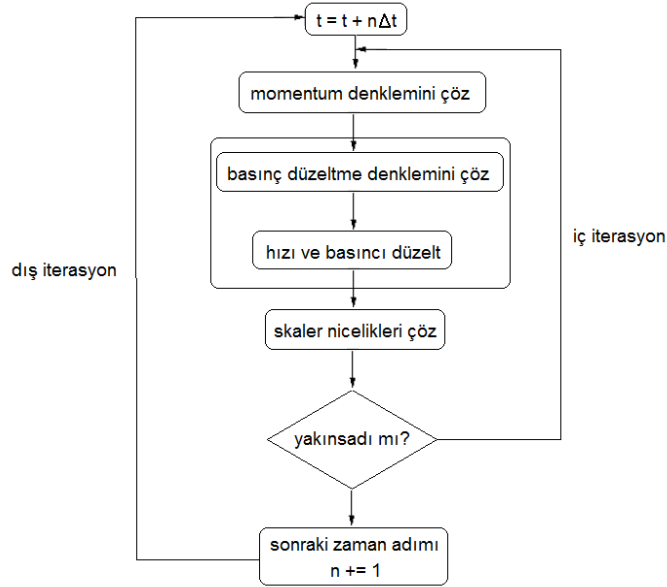
$J_f$  f yüzeyine olan kütle akısı olarak tanımlanmakta ve  $\rho v_n$ 'e eşittir.

$$J_f = \rho_f \frac{a_{P,c_0} v_{n,c_0} + a_{P,c_1} v_{n,c_1}}{a_{P,c_0} + a_{P,c_1}} + d_f \left( \left( P_{c_0} + (\nabla P)_{c_0} \cdot \vec{r}_0 \right) - \left( P_{c_1} + (\nabla P)_{c_1} \cdot \vec{r}_1 \right) \right) = \hat{J}_f + d_f (P_{c_0} - P_{c_1}) \quad (2.53)$$

$P_{c_0}, P_{c_1}, v_{n,c_0}, v_{n,c_1}$  sırası ile bir yüzeyle etkileşimde olan iki hücredeki basınç ve normal hız değerleridir.  $J_f$  bu hücrelerdeki hız değerlerinden etkilenmektedir.  $d_f$  ise komşu olan iki hücreye ait momentum katsayılarının ortalamasına bağlı bir fonksiyondur. Yüzeydeki yoğunluk değeri ise aritmetik ortalama ile hesaplanmaktadır.

### 2.3.3. Zamanda İlerleme Algoritması

İteratif metot ile bütün denklemler verilen zaman adımı için yakınsama kriteri sağlanana kadar iteratif olarak çözülür. Her zaman adımı içerisinde ve zaman adımı dışında iterasyonlar yapılır. İteratif yöntem Şekil 2.3'de şematize edilmiştir. İç iterasyonlar bittiğinde ya da yakınsama kriteri sağlandığında dış iterasyonlar ile devam edilir. Her dış iterasyon bir yeni zaman adımı demektir.



Şekil 2.3. Zamana bağlı iteratif çözüm algoritması [47]

## 2.4. SINIR ŞARTLARI

FLUENT programı birçok sınır koşulu varyasyonu içermektedir. Doğru sonuçlar için doğru sınır koşullarının seçilmesi çok önemlidir. Bu çalışmada, pressure far field, simetri ve duvar sınır şartları kullanılmıştır. Adyabatik duvar koşulu kavite duvarlarına ve kavite giriş, çıkış kenar duvarlarına verilmiştir. Simetri sınır koşulu üç boyutlu analizlerde kavite yan duvarlarına verilmiştir. Kavite giriş ve çıkışına da pressure far field sınır koşulu tanımlanmıştır. Kullanılan sınır şartları aşağıda ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

### 2.4.1. Pressure Far Field Sınır Koşulu

Bu sınır koşulu kavite girişine, kavite çıkışına, kavite üst duvarına tanımlanmıştır. Pressure far field sınır koşulu kullanırken statik akış şartları çözüm başlangıcında akışa sınır değeri olarak girilmektedir. Akış bölgesini etkilememesi ve doğru sonuç verebilmesi açısından sınırlar kavite bölgesinden yeterince uzağa atanmıştır. Bu sınır şartı sadece ideal gaz kullanılan durumlarda geçerlidir.

Süpersonik bir kavite üzerindeki akışın simülasyonunu gerçekleştirebilmek için en önemli sınır koşulu geometri üzerine gelen akışın kavite girişinde nasıl olduğudur. Giriş koşullarını bulabilmek için düz bir plaka üzerindeki akış simülasyonları



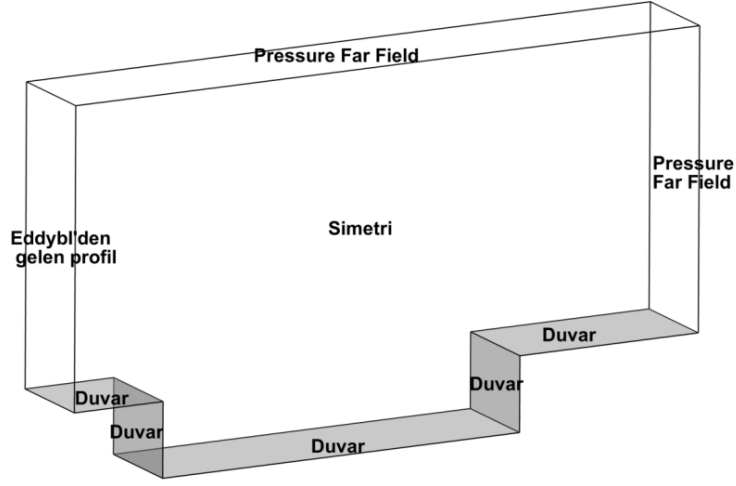
EDDYBL [48] programı ile gerçekleştirilmiş, bu simülasyon sonucunda çıkan değerler, kavite girişinde kullanılmıştır.

#### **2.4.2. Simetri Sınır Koşulu**

Geometrik açıdan ve akış çözümü olarak simetrik olan alanlarda kullanılmaya elverişli bir sınır koşuludur. Bu sınır koşulunda akış alanı içerisine akı giriş çıkışı yoktur, yani bütün normal gradyanlar sıfırdır ve bu sınır koşuluna herhangi bir özellik atamak gerekmez. Bu sınır koşulu sayesinde ağdaki düğüm sayısı iki katına çıkarılmak yerine, yarım kavite için çözülecek, bu da bilgisayar imkânları doğrultusunda daha iyi ağ yapısı kullanmaya olanak sağlayacak, kavitenin ikinci yarısı da çözülmek yerine daha çok düğüm kavitenin çözülen tarafı için kullanabilecektir. Literatürde Rizzetta [29] tarafından yapılan çalışmada simetrik kavite kullanılmış ve sonuçlar deneysel verilerle örtüşmüştür.

#### **2.4.3. Duvar Sınır Koşulu**

Akış hızı duvarlarda sıfır olarak tanımlanmaktadır (kayma yok şartı). Basınç gradyanları sıfırdır ve adyabatik sınır şartı verilmiştir. Bütün türbülans büyüklükleri no slip şartı ile duvar üzerinde yok edilmektedir. Bu sınır şartı kavite duvarlarına ve kavite giriş ve çıkış duvarlarına atanmıştır. Şekil 2.4'te sınır koşulları üzerinde çalışılan üç boyutlu geometri üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Sınır şartlarının akış alanı üzerinde gösterimi

## 2.5. HAD ANALİZİ ÖZELLİKLERİ VE AKIŞ KOŞULLARI

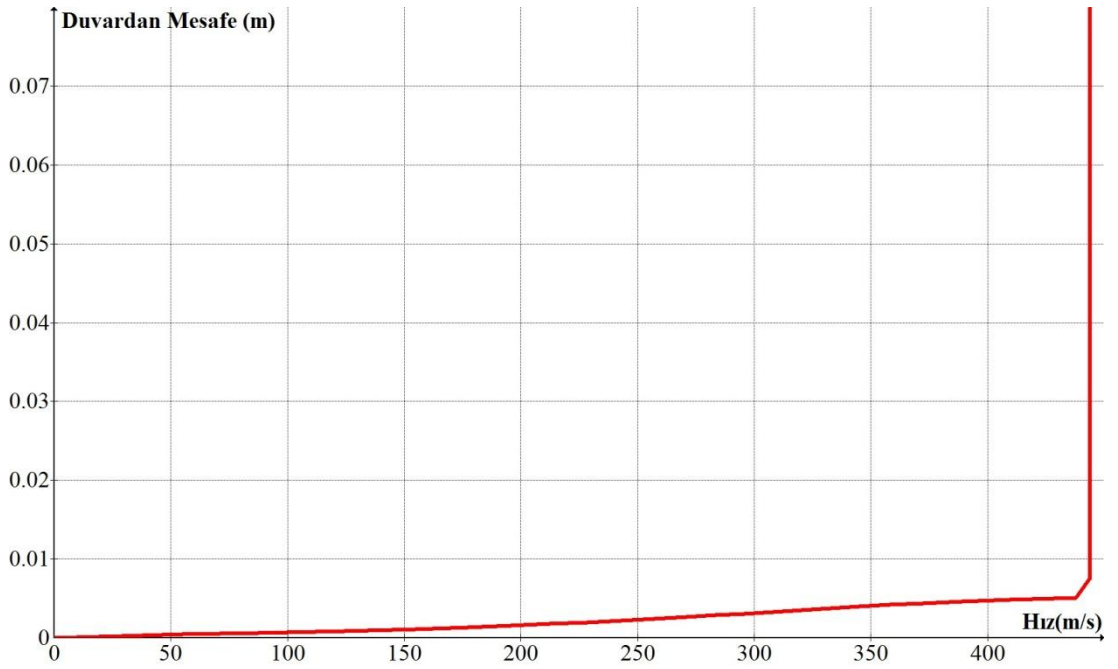
Kaufman vd.'nin [14] deneysel çalışması, karşılaştırılabilecek yeterli veri olduğundan ve numerik çalışmanın yapılabilmesi için gerekli tüm veriler bilindiğinden sayısal olarak çözümlenebilecek bir deneysel çalışmadır. Kaufman vd. [14] tarafından gerçekleştirilen deneyler rüzgâr tüneline dikdörtgen kavite için gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma ile ilgili ayrıntılar referans 14'de verilen çalışmada bulunmaktadır. Deneysel akış parametreleri Çizelge 2.1'de sunulmuştur. Bu akış özellikleri sayısal çalışmada da aynı şekilde alınmıştır. Kavite uzunluk derinlik oranı ( $L/D$ ) 5.07'dir. Bu geometrik özellik kavite akışını açık form akışı haline getirmiştir. Kavite uzunluğu 0.12065 m'dir. Kavite genişliği 0.0635 m'dir. Kavite  $L/W$  oranı 1.90'dır. Kavite uzunluk/derinlik etkisinin incelenme çalışmaları sırasında kavite uzunluğu değeri değiştirilmiş ve bu değişimin etkileri incelenmiştir. Açık kaviteyi temsil eden kavite geometrisi Şekil 2.4'de verilmektedir.

Çizelge 2.1. Deneysel çalışma koşulları

<b>Toplam Basınç</b>	66.4 kPa
<b>Toplam Sıcaklık</b>	218 K
<b>Mach Sayısı</b>	1.5
<b>Reynolds Sayısı</b>	$1.09 \times 10^6$
<b>Kavite Uzunluğu</b>	0.012065 m
<b>Kavite Derinliği</b>	0.0238 m
<b>Kavite Genişliği</b>	0.0635 m
<b>Sınır Tabakası Kalınlığı</b>	0.0051 m

Serbest akış sınır tabakası kalınlığı kavite akış mekanizmasını etkileyen önemli bir parametredir. Kavite sınır tabakası kalınlığı kavite akışında kavite karakteristik uzunluğu veya derinliği ile beraber  $L/\delta$  veya  $\delta/D$  olarak ifade edilmektedir. Kavite akışında sınır tabakası, osilasyon genliklerini ve kavite rezonans mekanizmasını değiştirebilmektedir dolayısıyla deneysel değerler ile uyumlu sınır tabakası elde edilmeden yapılan kavite analizlerinin akış fiziğini açıklaması mümkün değildir. Kaufman vd'nin [14] deneysel çalışmasında sınır tabakası kavite girişinde tamamen türbülanslı hale ulaşmaktadır ve  $L/\delta=23.87$  değerindedir. Sayısal çalışmalara başlanmadan önce kavite girişi için iki boyutlu düz bir plaka üzerindeki akış EDDYBL [48] programı yardımı ile çözdürülmüştür. Akış şartları Kaufman'ın [14] deneysel çalışmasındaki şartlar ile aynıdır (Çizelge 2.1). Sınır tabakası içerisinde 24 nokta bulunmaktadır.

Kavite girişine başlangıç koşulu olarak elde edilen sınır tabakası profili verilmiştir. Şekil 2.5’de x yönündeki hıza karşılık plaka yerinden olan mesafe grafiği çizdirilmiştir, bu grafikte serbest akış hızının yakalandığı duvar mesafesi verilmiştir.  $U/U_\infty$  oranının 0.99 değerine ulaştığı nokta sınır tabaka kalınlığı değerini vermektedir. Sayısal sonuçlarda ise  $U(x)$  değişiminin 0.0054 değerinde durduğu ve serbest ortam akış hızına ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç deneysel sonuç ile oldukça büyük bir uyumluluk göstermektedir.



Şekil 2.5. Hız-duvardan mesafe grafiği

Şekil 2.4’de verilen geometri ile gerçekleştirilen analizlerde hava tüneli test bölmesinin tamamını çözümlmek yerine sadece kavite bölgesini çözümlmek var olan zaman ve bilgisayar imkânları doğrultusunda daha elverişlidir. Bres ve Colonus [32], Stanek ve diğerleri [57]’de çalışmalarında aynı yöntemi izlemişler ve kavite fiziğini ortaya koyabilmiş, deneysel çalışmalarla uyumlu sonuçlar elde edebilmişlerdir.

## 2.6. ARD İŞLEME YÖNTEMLERİ

Ard-işleme için ANSYS FLUENT [46] ve TECPLOT [58] 360, MATLAB® [59], GRAPH [60] ve EXCEL programları kullanılmıştır. Analizler Fluent programında yapılmıştır. MATLAB programında Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD), Ses Basınç seviyeleri hesaplanması (SPL) ve  $C_p$  grafikleri elde edilmiştir. TECPLOT programında konturlar çizdirilmiştir. Grafik çıktıları için MATLAB, GRAPH ve EXCEL programından yararlanılmıştır.

### 2.6.1. Ses Basınç Seviyesi ve Ortalama Basınç Kat Sayısı Hesaplanması

DeneySEL veriler ile kıyaslamalar ses basınç seviyeleri ve basınç kat sayıları cinsinden gerçekleştirilmiştir. Hesaplama metotları aşağıda anlatılmıştır.

#### 2.6.1.1. Ses Basınç Seviyesi Hesaplanması

Ses basınç seviyeleri ölçümleri belirli noktalardaki basınç değerlerinin biriktirilmesi ve bu basınç değerlerinin aşağıdaki formülasyona tabi tutulması ile gerçekleşmektedir.

$$SPL = 10 \log_{10} \left( \frac{\bar{p}^2}{q^2} \right) \quad (2.54)$$

$$\bar{p}^2 = \frac{1}{t_f - t_i} \int_{t_i}^{t_f} (p - \bar{p})^2 dt \quad (2.55)$$

$$\bar{p} = \frac{1}{t_f - t_i} \int_{t_i}^{t_f} p dt \quad (2.56)$$

2.54 no'lu denklemdeki  $q$ , ses basınç referans değeridir ve  $2 \times 10^{-5}$  Pa değerindedir.  $t_f - t_i$  değeri SPL analizinin yapıldığı Rossiter periyodu kadardır. Rossiter periyodu ise Rossiter formülasyonu ile aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$St = \frac{fU_{\infty}}{L} = \left[ \frac{m - \alpha}{M_{\infty}(1 + [(\gamma - 1)/2]M_{\infty}^2)^{-1/2} + 1/K} \right] \quad (2.57)$$

Formülasyonda  $m$ ,  $m$ . moddaki frekans,  $M_{\infty}$  serbest ortam Mach sayısıdır,  $f$  ise Rossiter frekansdır ve bu değerin tersi Rossiter periyodu değerini vermektedir. Toplam analiz süresi Rossiter periyodu değerine bölüldüğünde analizin toplam kaç Rossiter periyodu için yapıldığı hesaplanmış olur.

$$\text{Analiz Süresi} = \frac{(\Delta t \times \text{zaman adımı})}{t_r} \quad (2.58)$$

2.58 no'lu formülasyonda  $\Delta t$  zaman adımı büyüklüğüdür. İki boyutlu analizler 20, üç boyutlu analizler 30 Rossiter periyodu için gerçekleştirilmiştir.

#### 2.6.1.2. Basınç Katsayısı Hesaplanması

Deneysel ve numerik sonuçları kıyaslayan bir diğer yöntem ise statik basınç kat sayısının konuma bağlı değerlerinin kıyaslanmasıdır. Statik basınç katsayısı  $C_p$  aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$C_p = \frac{2(\bar{p} - p_{\infty})}{t_f - t_i} \quad (2.59)$$

#### 2.6.2. Hızlı Fourier Dönüşümü

Sonuçların analizi için kavite osilasyon frekanslarını hesaplamaya yarayan hızlı Fourier dönüşümü (HFD) analizleri yapılmış ve salınımda dominant frekanslar ve büyüklükler belirlenmiştir.

HFD, zaman alanında elde edilen veri topluluğunu frekans alanına geçirip, karışık sinyaller içeren veri topluluğunu ayırıştırarak, hangi frekansta ne şiddette bir titreşim olduğunu gösterir.

Hızlı Fourier dönüşümü ile zaman alanındaki bir veri topluluğu frekans alanına çevrilir. Karışık sinyallerden oluşan bir veri topluluğu frekans alanına geçirilir ve kendini en çok tekrar eden verilerin frekansları hesaplanır. Bu çalışmada, Fluent programı ile toplanan basınç zaman verileri hızlı Fourier dönüşümüne uğrattırılarak güç frekans alanına çevirmiştir.  $X_k$  Verilerinin ayrık Fourier dönüşümü denklem 2.60 ile bulunur.

$$X_k = x_n w_N^{kn}, \quad w_N = e^{\frac{2\pi i}{N}} \quad k=0,1,\dots,N-1 \quad (2.60)$$

Bu denklemde  $x_k$  kat sayıları denklem 2.61 ile hesaplanmaktadır. Denklem 2.60 ve Denklem 2.61 kullanılarak dönüşüm ve ters dönüşüm işlemleri gerçekleştirilebilir.

$$x_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n w_N^{-kn} \quad (2.61)$$

## 2.7. Hesaplama Kaynakları

Proje kapsamında kullanılan bilgisayarın özellikleri aşağıdaki gibidir.

- İşlemci: Intel(R) Xeon(R) E5645 – 1.60 GHz hız
- Yüklü Bellek (RAM): 54,0 GB
- İşletim Sistemi: 64 bit işletim sistemi

Analiz süreleri Çizelge 2.2’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Simülasyonlar Fluent programında [46] dört işlemci ile paralel hesaplama ile yapılmıştır

Çizelge 2.2. Analiz süreleri

<b>Boyut</b>	<b>Kullanılan Model</b>	<b>Zaman Adımı</b>	<b>Analiz Süresi</b>
<b>2D</b>	RANS- $k-\omega$	22.000	1 gün
<b>2D</b>	RANS- $k-\epsilon$	22.000	1.5 gün
<b>3D</b>	RANS- $k-\omega$	32.000	49 gün
<b>3D</b>	DES- $k-\omega$	32.000	54 gün



### 3. İKİ BOYUTLU AKIŞ SİMÜLASYONLARI VE SAYISAL PARAMETRELERİN AKIŞ ÇÖZÜMLEMESİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Nümerik çalışmalar, akışkanlar için ana denklemleri çözümlen hesaplamalı akışkanlar dinamiği programlarından FLUENT [46] kullanılarak yapılmıştır. FLUENT programı, sonsuz hacim ayrıklaştırması yaklaşımı ile Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerini iki boyutlu ve üç boyutlu süpersonik kavite akışı için çözümlenmektedir. Yoğunluk tabanlı Navier-Stokes çözümlenmesi, ayrıklaştırılmış yöntem ile kapalı lineerizasyon metodu ile çözülecektir. Mekânda ayrıklaştırma için birinci ve ikinci dereceden Upwind yöntemi, zamanda ayrıklaştırma için birinci ve ikinci dereceden kapalı ayrıklaştırma yöntemi kullanılmıştır. Bölüm iki bu yöntemleri ayrıntılı olarak anlatmaktadır.

Süpersonik kavite akışı simülasyonları Kaufman vd.'nin [14] deneysel çalışması ile aynı parametreler doğrultusunda yapılmış ve nümerik çalışmalar bu deneysel çalışma ile doğrulanmıştır.

Zamandan ve ağ yapısından bağımsızlaştırılmayan sonuçlar hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde çok anlamlı değildir; dolayısıyla zamandan ve ağ yapısından bağımsızlaştırma çalışmaları yapılmalı, analizlere ağ yapısı ve zaman adımı hataları en aza indirgindikten sonra başlanmalıdır. Sayısal çalışmalarda uygun türbülans modeli seçimi akış fiziği üzerinde doğrudan etkilidir, dolayısıyla farklı türbülans modellerinin akış üzerindeki etkileri mutlaka incelenmelidir. Bu doğrultuda bu bölümde aşağıdaki başlıklar üzerine yapılan çalışmalar anlatılmaktadır.

- Ağ yapısı çalışması
- Zaman adımı çalışması
- Türbülans modelinin akışa etkileri
- İki boyutlu kavite akışı üzerine yapılan çalışmalar

Bölüm 2, analiz ve akış özelliklerini ayrıntılı biçimde anlatmaktadır. Sayısal çalışma parametreleri ise Çizelge 2.1' de verilmiştir. Bu akış parametreleri, belirlenen sınır koşulları ve sayısal yöntemler kullanılarak bölüm 3'teki çalışmalar yapılmıştır.

### 3.1. Ağ Yapısı Çalışması

Türbülans modelinden bağımsız olarak bütün hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmalarında ağ yapısından bağımsızlaştırma çalışmaları yapılmalıdır. Sonuçlar ağ yapısından bağımsız hale geldikçe çözüm sürekli bir çözüme ulaşmakta ve simülasyonlarda önemli bir etkiye sahip olan ayrıklaştırma hataları indirgenmektedir. Akış karakteristiklerinin gözlemlenebilmesi ve yakalanabilmesi için ağ yapısı yeterli nokta sayısına sahip olmalıdır. Probleme bağlı olarak bu gereksinim değişiklik göstermektedir. Bu sebeplerden ötürü farklı ağ yapıları için çözümlene yapılmış ve deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Çalışmada kullanılan bütün ağ yapıları yapısaldır. Bütün ağ yapılarında türbülans oluşumlarının en fazla olacağı beklenen kavite kesme tabakası ve duvar diplerinde ağ yapısı daha sıkı tutulmuştur. Kullanılan ağ yapılarının özellikleri Çizelge 2.1'de sunulmuştur. Akış alanı 2 boyutlu analiz için  $-0,24865 \leq x/L \leq 1,5$  ve  $-1,0 \leq y/D \leq 4$  olarak belirlenmiştir. Elde edilen ağ yapısında akış alanı farklı bölgelere ayrılmıştır. Böylece daha kısa sürede yapısal bir çözüm ağı elde edilebilmektedir.

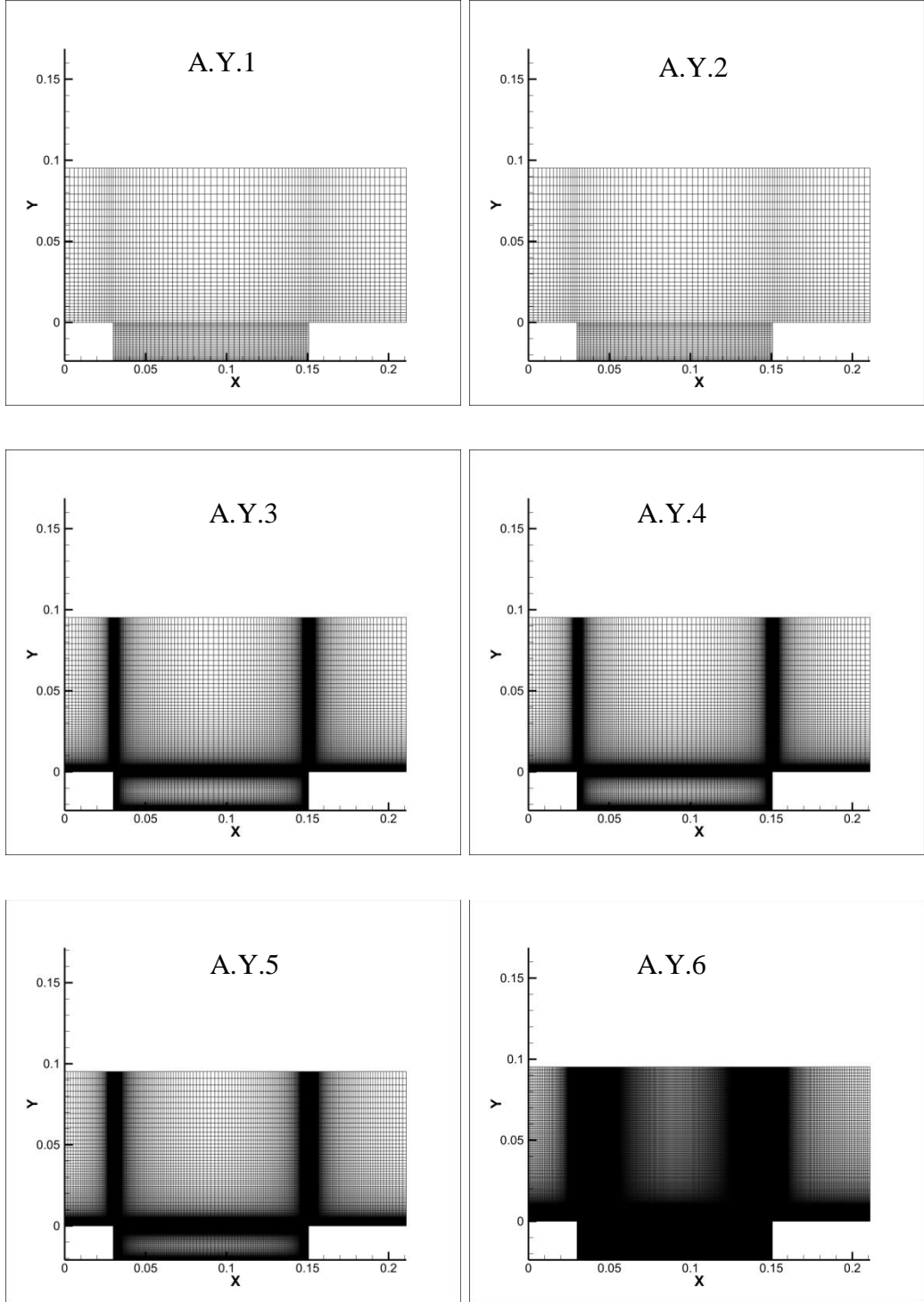
Badcock ve diğerlerinin [61] süpersonik hızlarda gerçekleştirdiği ağ yapısı çalışmalarına göre sıkı ağ yapısı, deneysel çalışma veya kaba ağ yapısı sonuçlarından farklı sonuçlar vermektedir. Yapılan ayrıntılı çalışmaya göre akım yönünde ağ yapısı iyileştirmelerinin sonuçlar üzerinde olumlu bir etkisi olmayabilirken kesme tabakası üzerinde y ekseninde yapılacak ağ yapısı iyileştirmeleri sayısal sonuçları deneysel sonuçlara yaklaştırabilmektedir. Bu doğrultuda, yapılan ağ yapısı çalışması iyi bir irdeleme gerektirmektedir, hem nitelik hem niceliksel olarak yapılan incelemeler sonucunda uygun ağ yapısı kararı verilmelidir.

Nümerik çalışmalar sonucunda belirli noktalarda alınan basınç değerleri ile ses basınç seviyeleri hesaplanmıştır. Zamana bağlı basınç değerleri frekans-güç grafiği elde edilmesinde ve basınç kat sayısı hesaplanmasında da kullanılmıştır. Nümerik basınç kat sayısı değerleri deneysel değerler ile ve sayısal frekans değerleri Rossiter frekans değerleri ile kıyaslanmıştır. Ayrıca hız ve basınç konturları çizdirilmiştir. Yapılan bu hesaplamalar ve kıyaslamalar, ağ yapısından bağımsız sonuçlar elde edilmesi için gereken ağ yapısının seçilmesinde yardımcı olmuştur.

Çizelge 3.1. Kullanılan ağ yapıları ile ilgili bilgiler

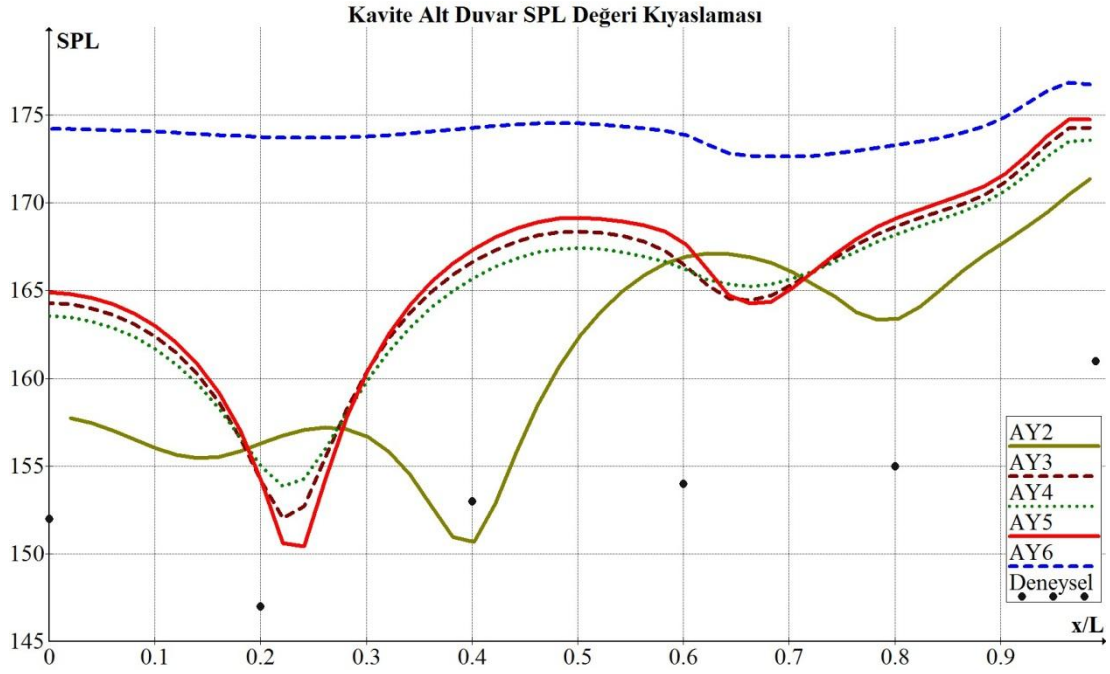
<b>Ağ Yapısı</b>	<b>Hücre Sayısı</b>	<b>Yüzey Sayısı</b>	$\Delta x/L$	$\Delta y/D$	<b>Ortalama y+</b>	<b>Minimum y+</b>
<b>1</b>	4.055	8.257	0.01252	0.0271	41.8	3.31
<b>2</b>	16.104	32.501	0.00364	0.01050	11.9	0.31
<b>3</b>	36.321	73.082	0.00062	0.00252	3.4	0.07
<b>4</b>	57.295	115.146	0.00062	0.00252	2.0	0.02
<b>5</b>	64.410	129.418	0.00048	0.00282	3.1	0.03
<b>6</b>	337.356	676.044	0.00037	0.0007	1.21	0

Kullanılan ağ yapıları Şekil 3.1’de verilmiştir.

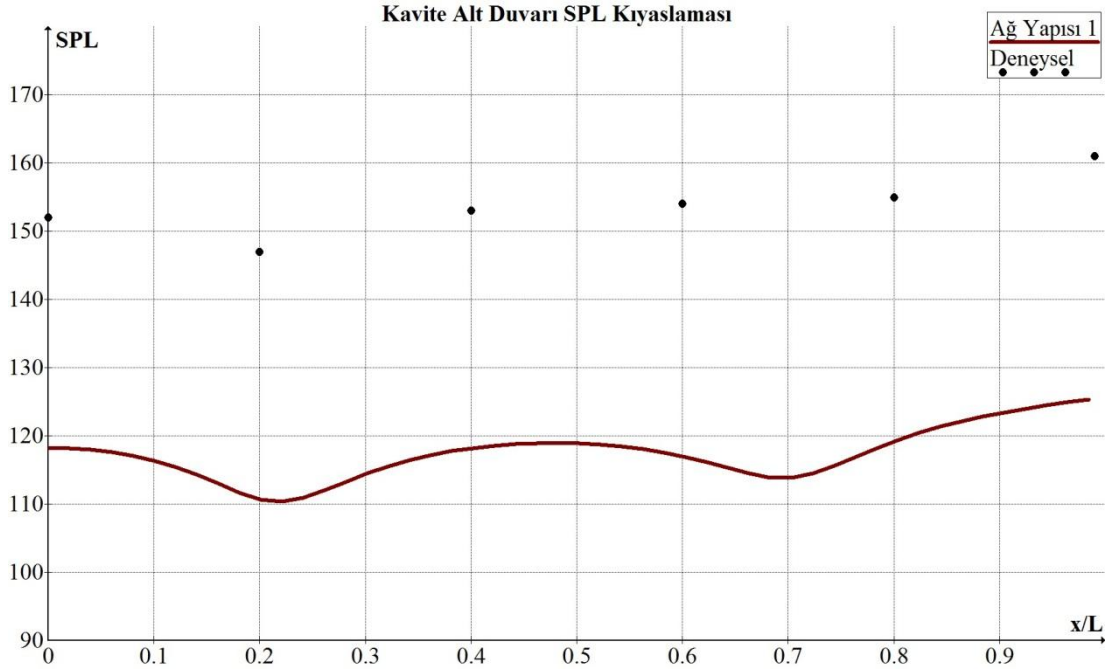


Şekil 3.1. Hazırlanan ağ yapıları

Analizler, 20 Rossiter periyodu için,  $10^{-6}$  zaman adımı ile Çizelge 2.1’de verilen parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Altı farklı ağ yapısının birbirleri ile ve deneysel çalışma sonuçları ile SPL değerleri cinsinden kıyaslanması, Şekil 3.2 ve 3.3’deki SPL- konum grafiği ile sunulmuştur.

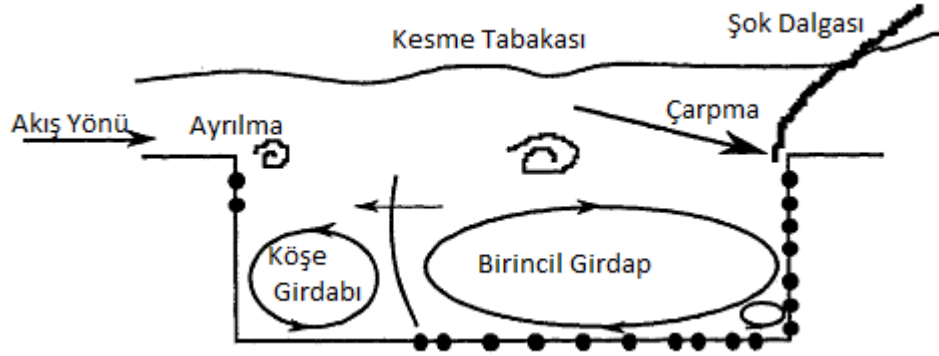


Şekil 3.2. Kavite alt duvarı SPL seviyeleri kıyaslaması



Şekil 3.3. Kavite alt duvarı SPL seviyeleri kıyaslaması (ağ yapısı 1 için)

Bölüm 1’de verilen literatür çalışmaları incelendiğinde kavite bölgesinde oluşan akış yapısı hakkında fikir sahibi olunmuştur. Dolling ve diğerlerinin [62], 5 Mach sayısı ve  $L/D=3$  oranındaki kavite akışının karakteristik özellikleri Şekil 3.4’te sunulmuştur. Dolling vd’nin çalışmasına göre kavite bölgesinde iki girdap yapısı vardır. Birincil girdap kavitenin büyük bir kısmını kaplamaktadır. Köşe girdabı, birincil girdap ve kavite giriş köşesi arasında oluşmaktadır. Kavite bölgesi akış ve kavite dışı akış kesme tabakası ile ikiye ayrılmakta ve kavite çıkış köşesinde şok oluşmaktadır. Bu çalışmadaki kavite bölgesi oluşumları literatürdeki birçok çalışmada aynı şekilde gözlemlenmektedir [7, 45, 63, 64]. Ağ yapısı çalışması sonucunda elde edilen konturlar (Şekil 3.5) irdelenerek hangi ağ yapısının akışın karakteristik özelliklerini daha belirgin olarak yakaladığı irdelenecektir.



Şekil 3.4. Kavite bölgesindeki akış karakteristikleri [62]

Ağ yapısı 1 SPL değerleri, deneysel değerlerden %25'e varan sapma göstermektedir dolayısıyla Şekil 3.2'ye dahil edilememiştir. Bu ağ yapısında herhangi bir basınç salınımı oluşmamakta SPL seviyeleri neredeyse sabit bir dağılım göstermektedir (Şekil 3.3). Ağ yapısı 1'e ait hız konturu incelendiğinde (Şekil 3.5.a) bu kaba ağ yapısı kavite akışının karakteristik özelliklerini yakalayamamaktadır.

Ağ yapısı 2, Ağ yapısı 1'in iki katı nokta içermektedir. Ağ yapısında iyileştirme yapmak ses basınç seviyelerinde hata payını %9 değerine kadar düşürmektedir ve deneysel değerlerden daha yüksek SPL ölçüldüğü gözlemlenmektedir; ancak deneysel değerlere göre  $x=0.2$  konumunda ani bir düşüş olmaktadır. Sayısal çalışma ise bu ani düşüşü  $x=0.2$  konumundan farklı bir konumda yakalamıştır (Şekil 3.2). Şekil 3.5.b'de verilen akım çizgileri irdelendiğinde kavite bölgesinde zayıf yapıda tek bir girdap oluşumu gözlemlenmektedir; ancak literatürdeki çalışmalara göre [16, 63, 65] iki boyutlu çalışmalarda bu  $L/D$  oranında kavite bölgesinde birden fazla girdap oluşumu vardır. Dolayısıyla bu ağ yapısı kavite bölgesi oluşumlarını gözlemlenmekte yetersiz kalmıştır. Özellikle duvar diplerinde olmak üzere kavite bölgesinde ağ yapısında sıkılaştırma yapılmalıdır.

Ağ yapısı 3 için ağ yapısı, Şekil 3.1.c'de verilmiştir. Bu ağ yapısında nokta sayısı ağ yapısı 1'in 3 katıdır. Duvar diplerinde ve kesme tabakasında ağ yapısı sıkılaştırılmıştır. Şekil 3.2'de verilen ses basınç seviyeleri grafiğine göre bu ağ yapısı

deneysel değerlerdeki dūşūş ve artışları deneysel konumlar ile aynı noktalarda yakalamıştır. Deneysel değerler ile nūmerik değerler arasındaki en būyūk fark % 8,5 değerindedir. Aę yapısı 2'ye gōre hata payı çok dūřmemiř gibi gōzükse bile ses basınç seviyesindeki azalış ve artışların doğru yerlerde yakalanmış olması akıştaki oluşumların doğru yer ve zamanda gerçekleştiğinin gōstergesidir. Aę yapısı 1 ve 2 ile yakalanamayan kesme tabakası kararsız yapısı bu aę yapısı ile gōzlemlenebilmektedir. şekil 3.4' de verilen akış karakteristikleri bu aę yapısında da benzer şekilde gōzlemlenmektedir. Çizelge 3.2' de verilen sayısal frekans değerleri ve Rossiter frekans değeri arası fark bu aę yapısında % 6.5 olarak hesaplanmıştır.

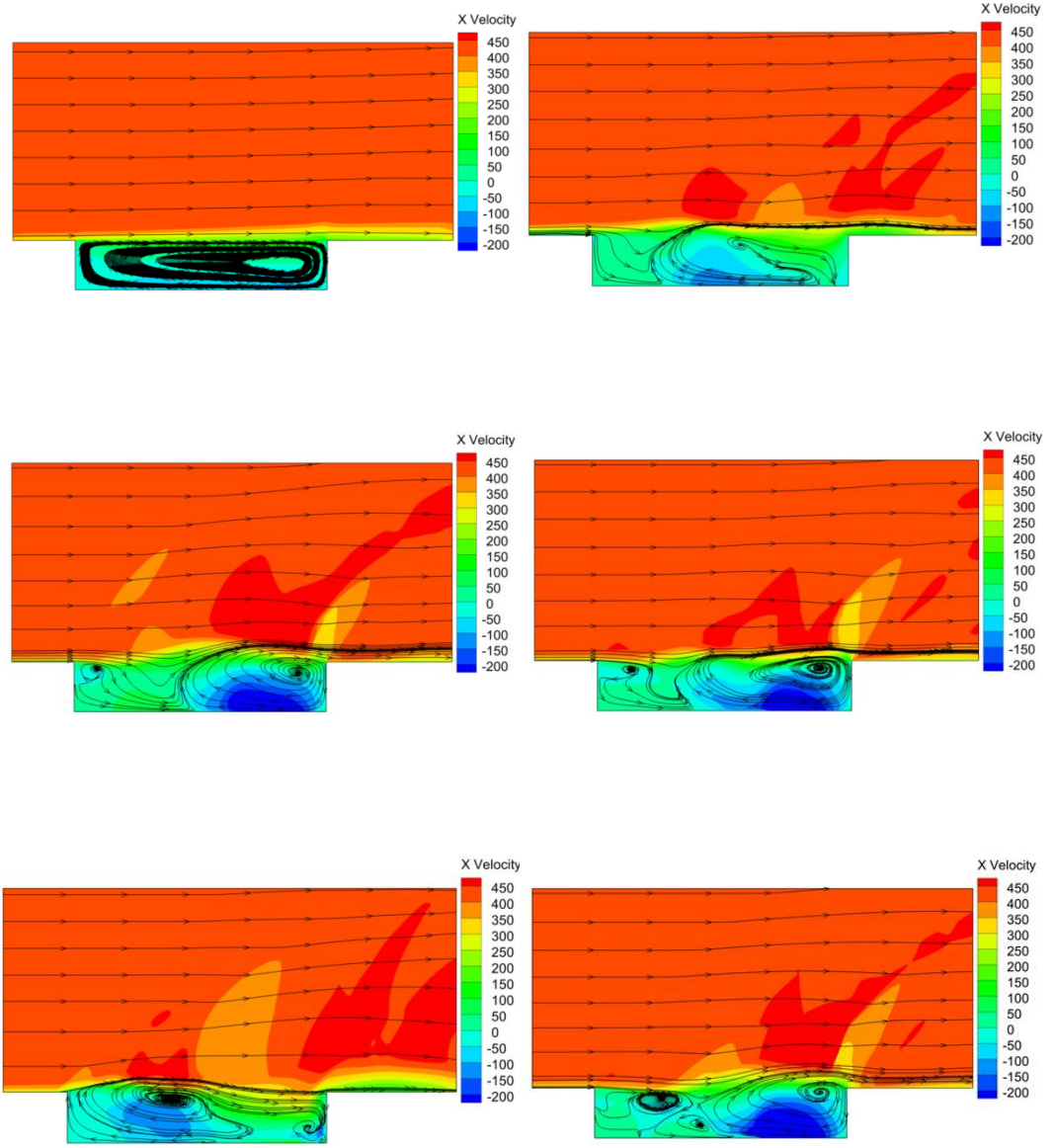
Aę yapısı 4 için aę yapısı, şekil 3.1.d'de verilmiştir. Aę yapısı 4 ve Aę yapısı 3 aę yapılarında en kūūk aę yapısı aralığı ( $\Delta x$  ve  $\Delta y$ ) aynı tutulmuş ancak aę yapısı 4'de kavite bōlgesine daha fazla eleman yerleştirilmiş ve daha sıkı bir kavite bōlgesi elde edilmiştir. Aę yapısı 3 ve 4'ūn akış fizikleri kıyaslandığında iki aę yapısı ile de akış dūzensizlikleri, kesme tabakası kararsızlığı, basınç değişimleri gōzlemlenebilmektedir. Ses basınç seviyeleri arası fark iki aę yapısı arasında en fazla % 0.61 değeri kadardır. Bu fark gōz nūne alınarak elde edilen sayısal çalışma sonuçlarının aę yapısındaki değişikliklerden bağımsız hale geldiği sōylenebilir.

Aę yapısı 5, aę yapısı 1'in 4 katı elemana sahiptir. Bu aę yapısında y yōnündeki minimum aę yapısı aralığı aę yapısı 3 ve 4 ile yaklaşık olarak aynı tutulmuş, x yōnünde iyileştirme yapılmıştır. Aę yapısı 3 ve aę yapısı 4 ile SPL seviyeleri kıyaslandığında en būyūk fark % 0.9 mertebesindedir bu doğrultuda Badcock vd.'nin [61] çalışmasında olduğu gibi aę yapısında akış yōnünde yapılan iyileştirmelerin sonuçlara etkisinin olmadığı bu çalışmada da gōzlemlenmiřtir.

Aę yapısı 6 ile x ve y yōnündeki minimum aę yapısı aralıęı deęerleri dūřürölmiř kavite bōlgesinde sıkı bir aę yapısı oluřturulmuřtur (řekil 3.1). řekil 3.5(e) incelendięinde dięer aę yapılarından farklı olarak kavite bōlgesinde ūūncū bir girdap oluřumu gōzlemlenmektedir. řok etkisinin daha geniř bir alana yayıldıęını ve kavite bōlgesi oluřumlarının daha kuvvetli olduęunu sōylemek mūmkündür. Daha kuvvetli oluřumlar ise SPL deęerlerinin daha yūksek olmasının nedeni olarak



gösterilebilir (Şekil 3.2.). En sıkı ağ yapısı olan bu ağ yapısı ile SPL seviyeleri deneysel değerlerden uzaklaşmıştır. Deneysel çalışmada var olan SPL artış ve azalışları bu ağ yapısı ile gözlemlenememiştir. Daha sıkı ağ yapısı ile deneysel değerlerden daha uzak sonuçlar alınmasının nedeni olarak x yönündeki minimum ağ yapısı aralıklarının y yönündekilerden düşük hale gelmesinin gereksiz bir yapı yaratmış olması ve bu kadar küçük ağ yapısı aralıklarının yuvarlama hatalarının artmasına neden olmuş olması gösterilebilir. Sayısal hataların büyümesi deneysel değerlerden sapmalara yol açmış ve bu kadar sıkı bir ağ yapısının kullanılmasına gerek olmadığını göstermiştir.



Şekil 3.5. Hız konturları üzerine akım çizgileri (a) ağ yapısı 1 (b) ağ yapısı 2 (c) ağ yapısı 3 (d) ağ yapısı 4 (e) ağ yapısı 5 (f) ağ yapısı 6  
( $t= 0.0128$  s)

Çizelge 3.2. İlk Mod için frekans değerleri kıyaslaması

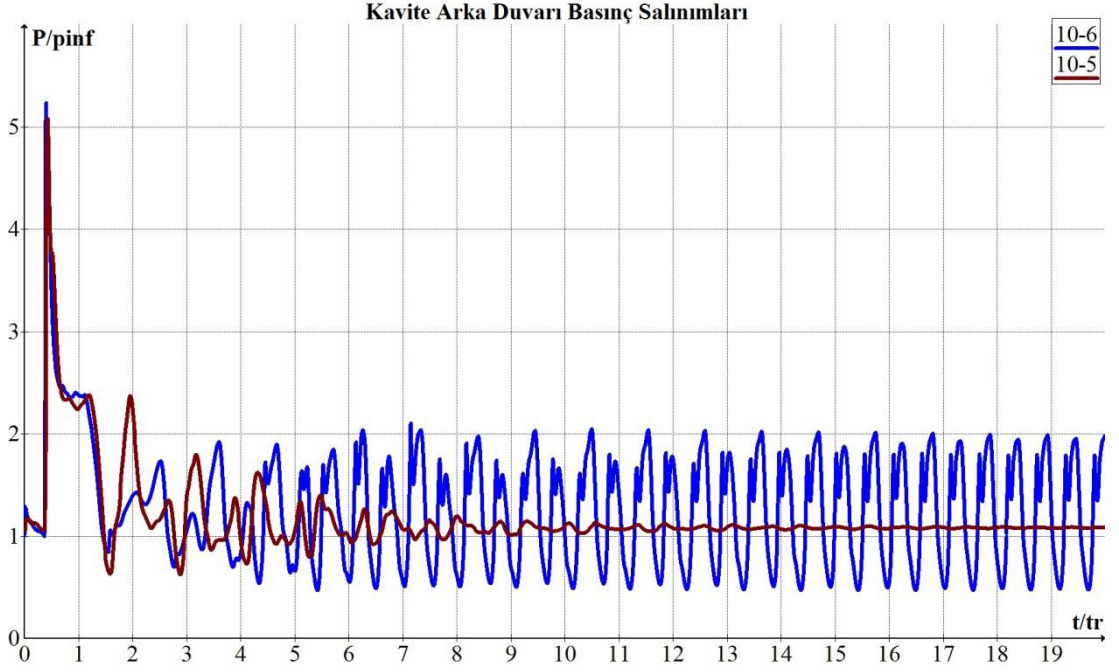
Ağ Yapısı	Rossiter Formulasyonu (Hz)	Sayısal Değerler (Hz)	Fark (%)
1	1109.1	1230	11
2	1109.1	1195.0	7.7
3	1109.1	1037.0	6.5
4	1109.1	1186.0	6.9
5	1109.1	1050	5.3
6	1109.1	1010	9

Yapılan bu değerlendirmeler sonucunda ağ yapısı 3, 4 ve 5'in birbirleri ile tutarlı ve deneysel değerler ile uyumlu sonuçlar verdiği söylenebilir. Maliyet ve bilgisayar olanakları göz önüne alındığında bu üç ağ yapısı arasından ağ yapısı 3 en uygun ağ yapısıdır. Sonuç olarak, bundan sonra yapılacak çalışmaların ağ yapısı 3 kullanılarak gerçekleştirilmesi uygun bulunmuştur.

### 3.2. Zaman Adımı Çalışması

HAD çalışmalarında, doğru ağ yapısı ile çalışılması kadar doğru zaman adımı ile çalışılması da önemlidir. Zamana bağlı değişen akışlarda akış karakteristiklerinin olduğu zaman aralığından daha küçük bir zaman adımı seçilmediği takdirde akış özelliklerini gözlemlemek mümkün değildir. Bu doğrultuda, bu çalışmada  $\Delta t=10^{-5}$  s ve  $\Delta t=10^{-6}$  s olmak üzere iki farklı zaman adımı büyüklüğü denenmiştir. İki boyutlu analizler 22.000 zaman adımı için gerçekleştirilmiştir. Basınç değeri serbest ortam basınç değeri ile zaman değeri ise Rossiter periyodu ile boyutsuzlaştırılmış ve boyutsuz basınç zaman grafiği iki zaman adımı değeri için de Şekil 3.6'da verilmiştir. Grafiğe göre  $10^{-5}$  s zaman adımı büyüklüğü akış özelliklerini yakalayamamaktadır. Basınç salınımları kısa sürede yok olmaktadır.  $10^{-6}$  s zaman adımı büyüklüğü ile periyodik basınç salınımları oluşmaktadır, uygun ağ yapılarında salınımların frekans değeri ise Çizelge 3.2'de verildiği üzere Rossiter frekans değeri ile tutarlı sonuçlar vermektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda bu basamaktan sonra

yapılacak çalışmaların ağ yapısı 3 ile  $10^{-6}$  zaman adımı büyüklüğünde 22.000 zaman adımı için gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.

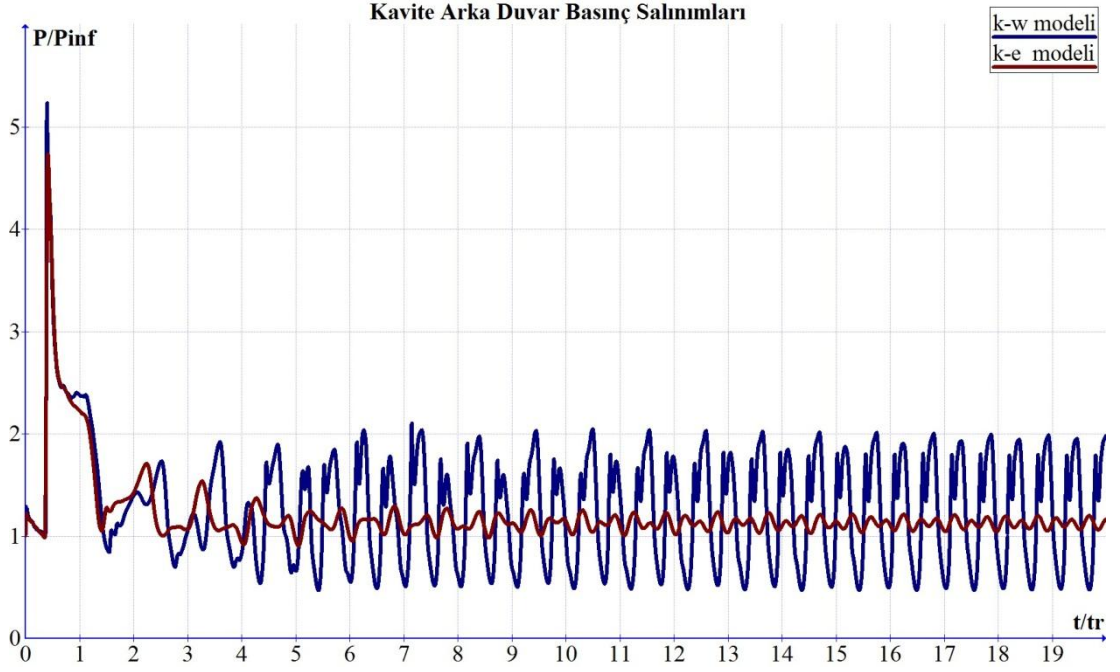


Şekil 3.6. Kavite arka duvarı basınç salınımları grafiği (kavite arka duvarı  $y/d=0.6$  konumu verileri kullanılmıştır)

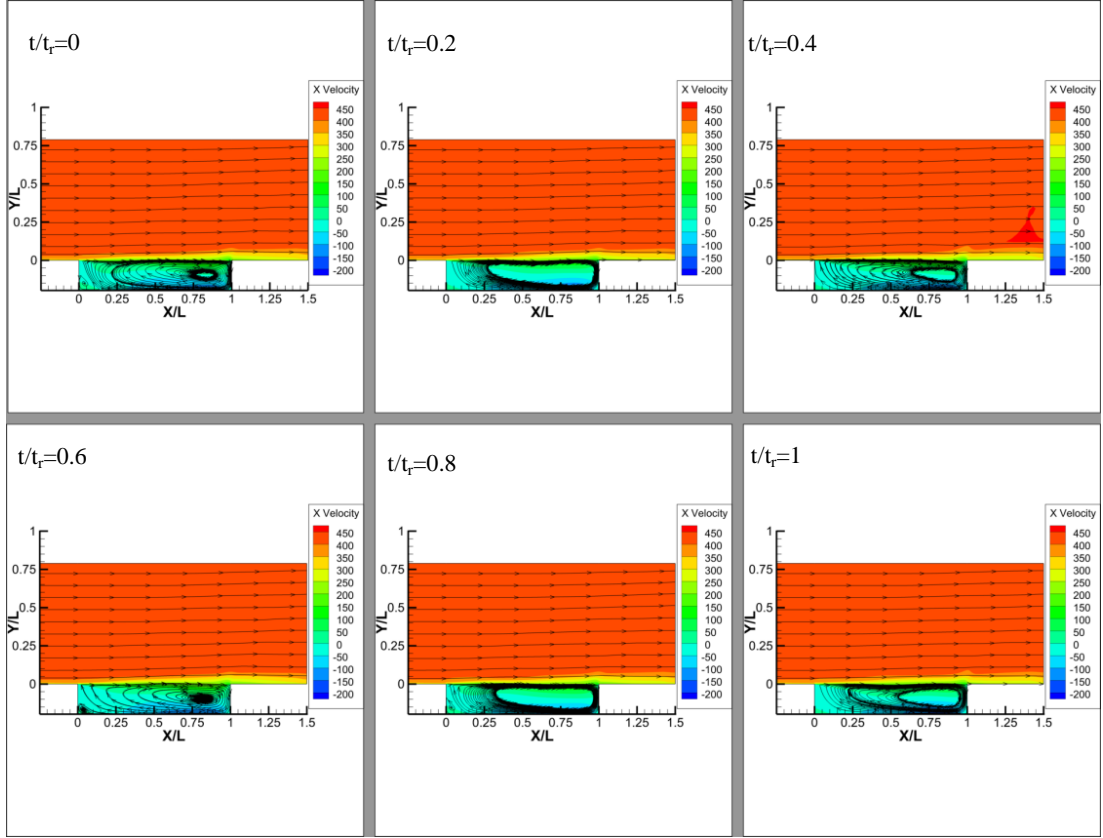
### 3.3. Türbülans Modelinin Akışa Etkileri

Bölüm 2'de anlatılan  $k-\epsilon$  ve  $k-\omega$  modelleri, seçilen ağ yapısı ve zaman adımı ile 20.000 Rossiter periyodu için akış çözümlemesinde kullanılmıştır. Şekil 3.7'de verilen basınç- zaman grafiğine göre iki model ile de periyodik bir akış yapısı elde edilmiştir; ancak  $k-\omega$  modeli ile basınç salınımları serbest basınç değerinin 2 katı iken  $k-\epsilon$  modeli ile salınımlar serbest basınç değerinin 1.2 katına kadar çıkmaktadır. Daha güçlü salınımların olduğu  $k-\omega$  modeli ile kavite bölgesi oluşumları (Şekil 3.9) rahatlıkla gözlemlenirken  $k-\epsilon$  türbülans modeli ile birincil girdap oluşumu dışında kavite karakteristiğini temsil eden herhangi bir oluşum gözlemlenememiştir (Şekil 3.8). Bir periyodluk zaman dilimi içinde alınan konturlar akışın periyodik yapısından dolayı ilk ve son zaman anında aynı yapılanmaya sahip

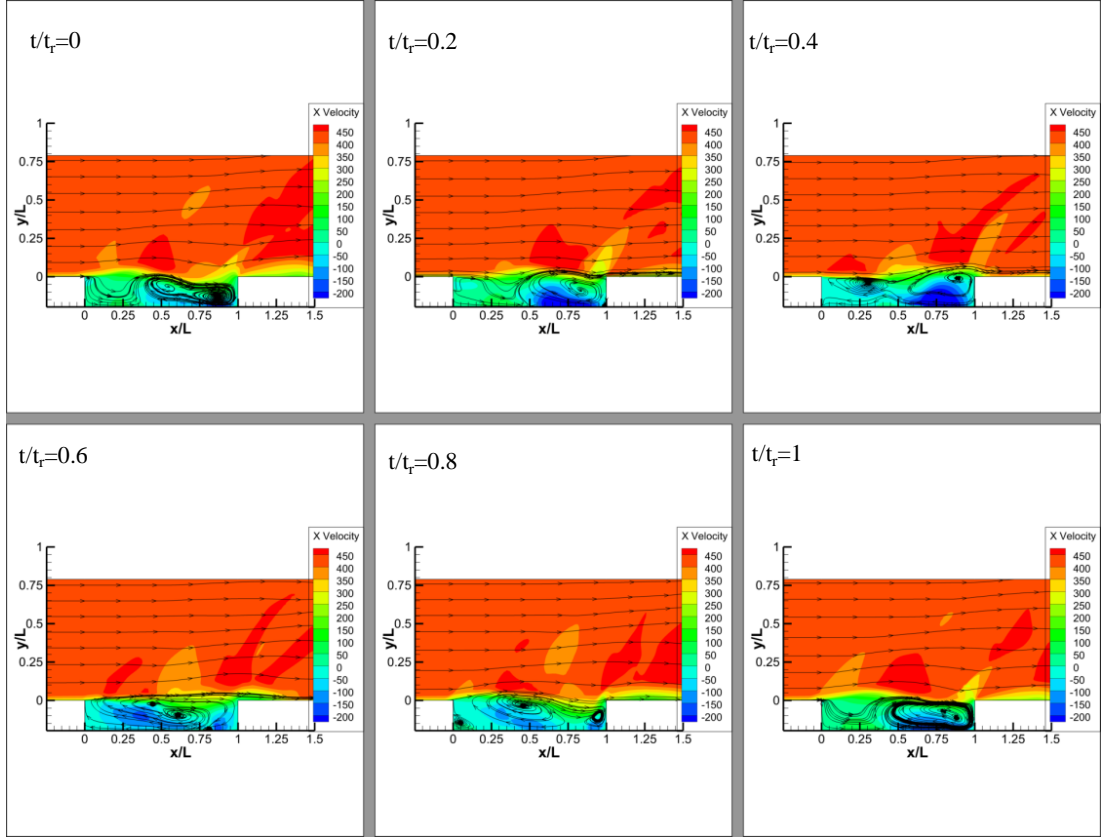
olmalıdır. Bu durum  $k-\omega$  modeli ile yapılan çözümler sonucunda elde edilen konturlarda (Şekil 3.9) açıkça görülmektedir.



Şekil 3.7. Basınç-zaman grafiği (kavite arka duvarı  $y/D=0.6$  konumu verileri kullanılmıştır)



Şekil 3.8 Bir periyodluk zaman için hız konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri (k-ε türbülans modeli)

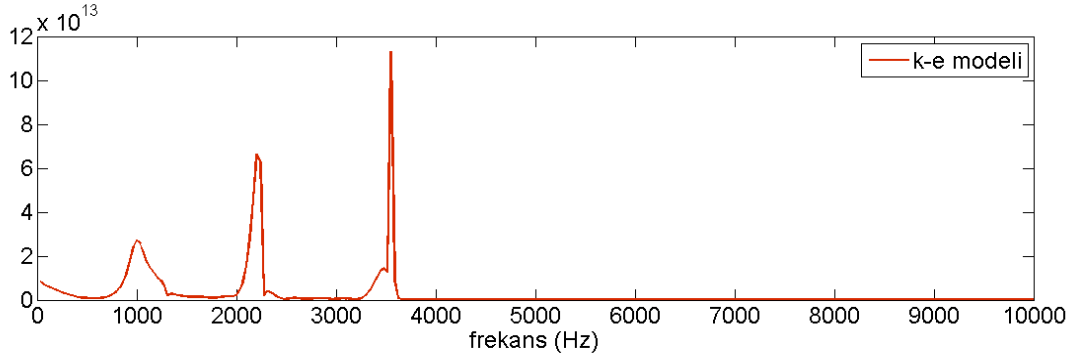
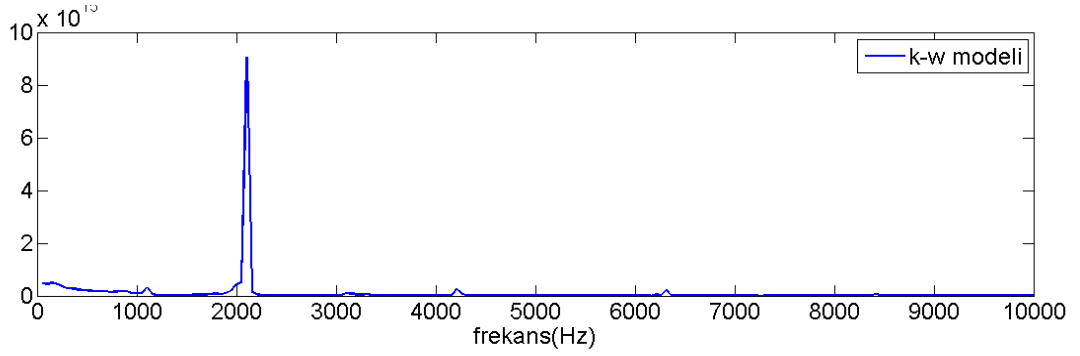


Şekil 3.9. Bir periyodluk zaman için hız konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri (k- $\omega$  türbülans modeli)

Basınç zaman verileri Hızlı Fourier Dönüşümü ile frekans alanına çevrilmiştir (Şekil 3.10). Çizelge 3.3’de iki türbülans modeli için, elde edilen ilk üç mod frekans değerleri Rossiter formülasyonu ve geliştirilmiş Rossiter formülasyonu ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamaya göre k- $\omega$  modeli ile yapılan frekans tahmini değerleri yarı deneysel formülasyonu ile elde edilen frekans değerlerine daha yakındır.

Çizelge 3.3. İlk üç Mod için Frekans Değerleri

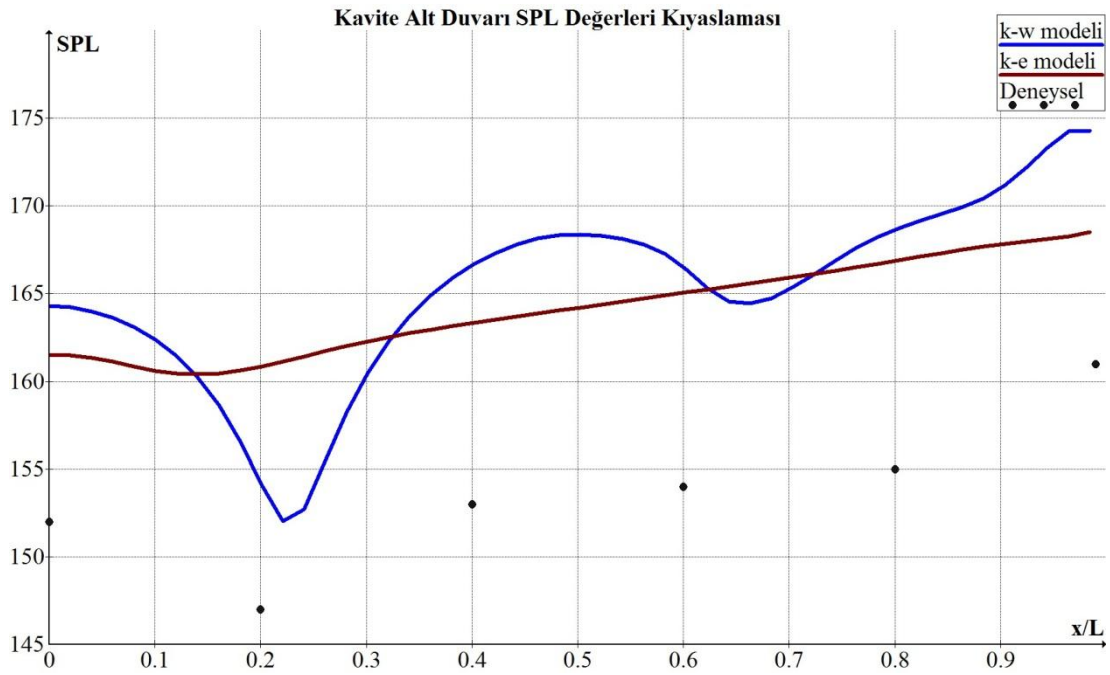
Türbülans Modeli	Frekans Modları	Sayısal Değerler (Hz)	Gelşt. Rossiter Form.( $k=0.55$ & $\alpha=0.25$ ) (Hz)	Rossiter Form. (Hz)	Fark (%) (Gelşt. Rossiter Form. ve Sayısal St değerleri)	Fark (%) (Rossiter Form. ve Sayısal St değerleri)
k- $\omega$	$f_1$	1037.0	900.8	1109.1	15.0	6.5
k- $\omega$	$f_2$	2106.0	2102.0	2218.0	0.19	5.0
k- $\omega$	$f_3$	3263.0	3303.1	3327.0	4.5	5.0
k- $\epsilon$	$f_1$	1000.0	900.8	1109.1	11.0	9.8
k- $\epsilon$	$f_2$	2241.0	2102.0	2218.0	6.6	1.1
k- $\epsilon$	$f_3$	3552.0	3303.1	3327.0	7.5	6.8



Şekil 3.10. Farklı türbülans modelleri için güç frekans grafikleri (arka duvar  $y/d=0.6$  konumu verileri kullanılmıştır.)



İki türbülans modeli arasında kıyaslama yapmak için SPL-zaman grafiği çizdirilmiştir. k- $\omega$  modeli ile elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile daha uyumlu bulunmuş ve SPL seviyelerinde düşüş ve artış noktaları deneysel konumlar ile benzer yerlerde yakalamıştır. Sonuç olarak, yapılan niteliksel ve niceliksel kıyaslamaların ardından k- $\omega$  türbülans modeli çözümlemesi Çizelge 2.1’de verilen akış özelliklerine sahip süpersonik kavite akışı analizleri için daha uygun bulunmuştur

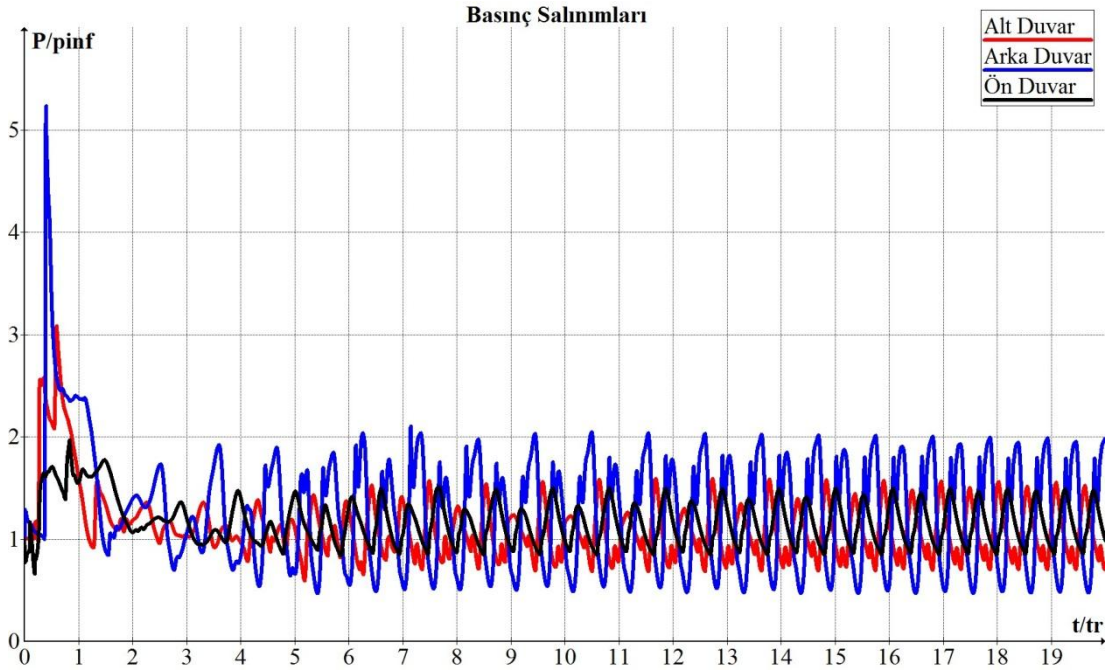


Şekil 3.11. Kavite alt duvarı SPL seviyeleri kıyaslaması

### 3.4. İki Boyutlu Süpersonik Kavite Simülasyonu

Sayısal parametrelerin akış çözümlemesi üzerine etkilerinin araştırılmasının, uygun model, ağ yapısı ve zaman adımının belirlenmesinin ardından akışın fiziğinin anlaşılması için üç boyutlu çalışmalardan önce iki boyutlu kavite analiz sonuçları irdelenmiştir. Şekil 3.12’de kavite ön, alt ve arka duvarları için boyutsuzlaştırılmış basınç zaman grafiği verilmiştir. Bu grafiğe göre kavite arka duvarında en yüksek genlikte salınımlar oluşmaktadır. Bu durumun, kesme tabakasının arka duvarla birleşmesi sonucundaki ani basınç değişimine bağlı olduğu düşünülmektedir. Grafiğe göre akışın sayısal etkilerden arınarak periyodik salınımlar göstermesi için yaklaşık 4

periyod geçmesi gerekmiştir. Akışın sayısal etkilerden arınmış olduğu ve periyodik salınımların gözlemlendiği 10. ve 20. Rossiter periyodları arasındaki veri topluluğu analiz sonuçlarının elde edilmesinde kullanılmıştır.

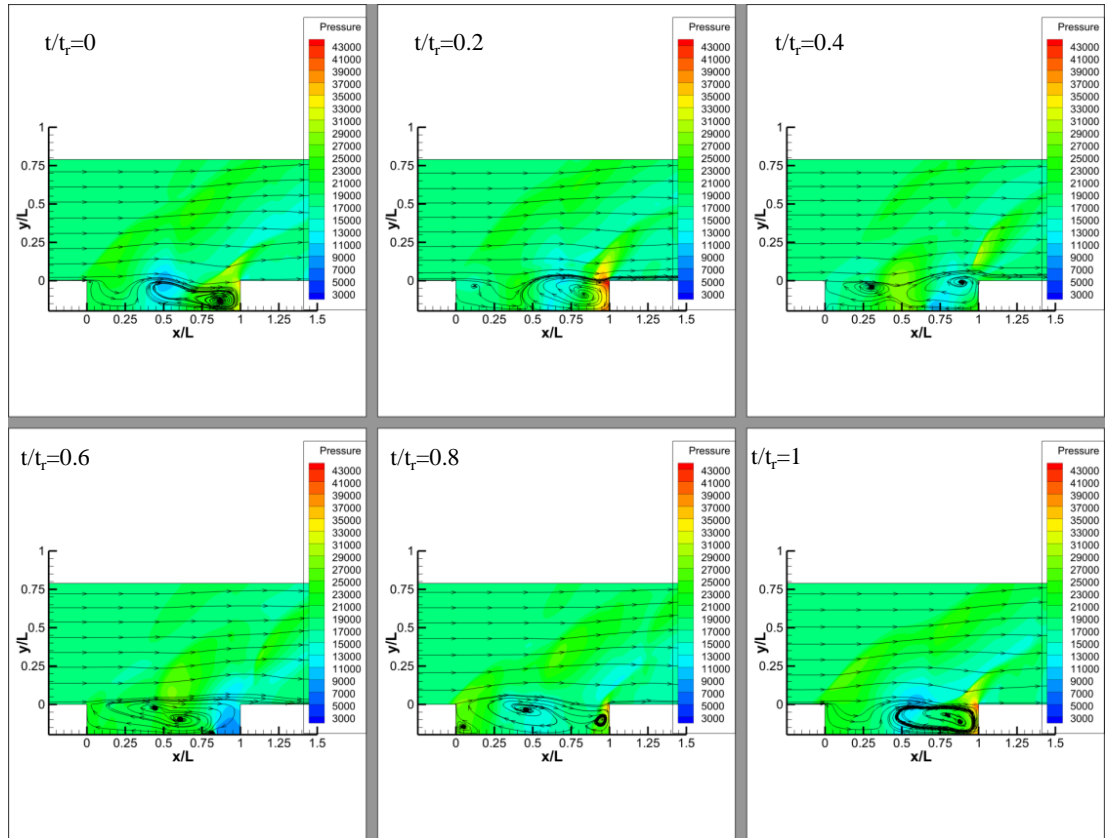


Şekil 3.12. Basınç-zaman grafiği (kavite arka duvarı  $y/d=0.6$  konumu verileri kullanılmıştır)

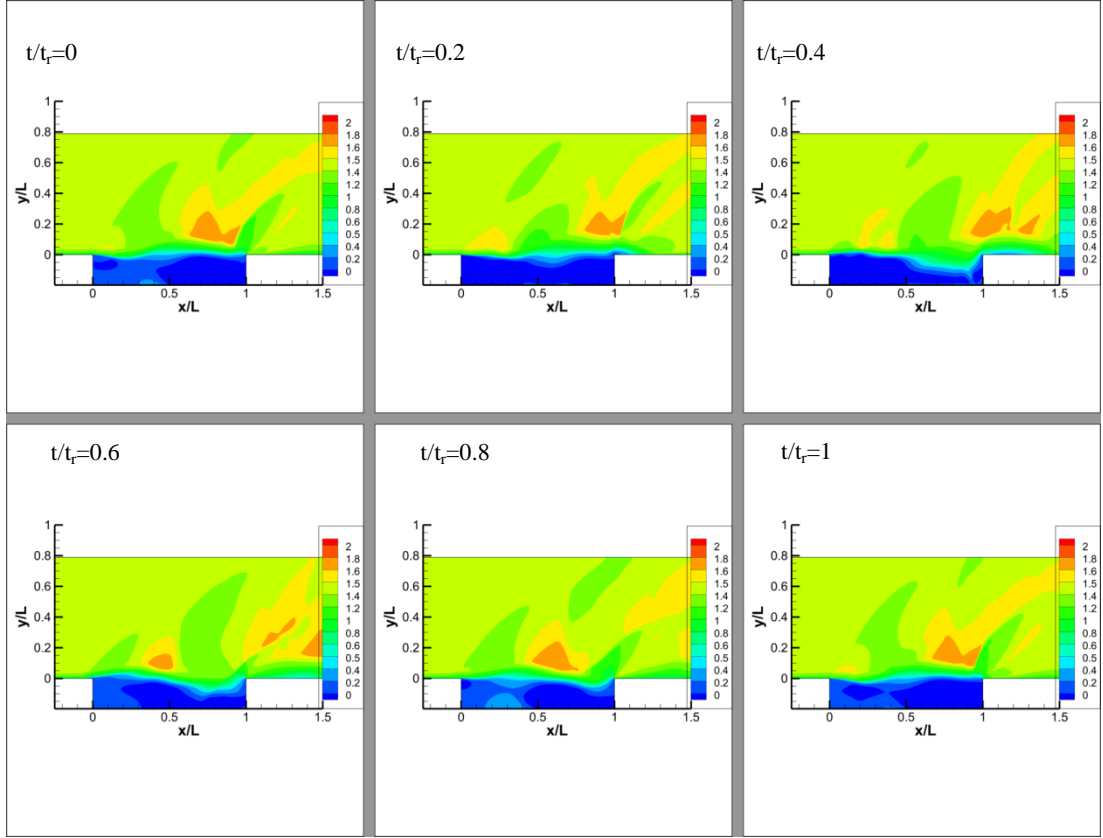
Şekil 3.9 ve Şekil 3.13’de bir Rossiter periyodu içerisindeki 6 farklı zaman anı için hız ve basınç konturları verilmiştir. Bu konturlara göre kavite girişinde serbest akış ile gelen sınır tabakası ayrılmakta, kavite üzerinde akmakta ve kavite arka köşesinde tekrar birleşmektedir. Kavite arka köşesinde kesme tabakasının duvar ile birleşmesine bağlı olarak kavite bölgesi basınç değerleri serbest basınç değerinin çok altında kalmakta dolayısıyla kesme tabakası kavite içerisine doğru eğilmekte ve kavite bölgesine kütle girişi olmaktadır. Bu durum Şekil 3.9’da  $t/t_r=0$  anında gözlemlenmektedir. Bu kütle girişi kavite arka duvarında basınç dalgaları yaratmakta ve oluşan basınç dalgaları kavite ön duvarına doğru hareket etmektedir. Ön duvara çarpan dalgalar kavite bölgesindeki basınç değerini arttırmaktadır. Yükselen basınç değerleri kesme tabakasını dışa doğru eğmektedir ve kavite dışına kütle çıkışı olmaktadır (Şekil 3.9, Şekil 3.13).  $x/L=0.45$  konumunda kesme tabakasının dışa

doğru bükülmesi Şekil 3.9,  $t/t_r=0.2$  anında gözlemlenmektedir. Şekil 3.15’de verilen SPL-konum grafiği incelendiğinde de hem sayısal hem deneysel olarak  $x/L=0.45$  konumunda SPL seviyesi artmaktadır.  $x/L=0.2$  noktasında ise SPL seviyesinde ciddi bir düşüş gözlemlenmektedir. Bunun tahmini sebebi bu noktada kavite önüne ilerleyen akış ile öne çarpan ve arkaya yansıtılan akışın çarpışması olarak düşünülmektedir.  $x/L=1$  konumunda yani kavite alt duvarı ve kavite arka duvarı köşesinin birleşme noktasında ses basınç seviyelerinin yükselmesi kesme tabakası ve kavite arka duvarı etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Bu konumdaki basınç değerleri artışı Şekil 3.13’de  $t/t_r=0.2$  anında rahatlıkla gözlemlenmektedir.

Kesme tabakasının farklı yoğunluk, hız ve basınçta akan iki bölge arasında kalmakta ve dış şartlara adapte olabilmek için şok dalgaları oluşturmaktadır. Bu şok yapıları şekil 13 ve 14’de gözlemlenebilmektedir. Şok oluşumu öncesinde daha yüksek olan hız değerleri şok sonrasında düşmektedir (şekil 14). Bu şokların zayıf yapıda eğik şoklar olduğu şekil 3.14’e bakılarak söylenebilir.

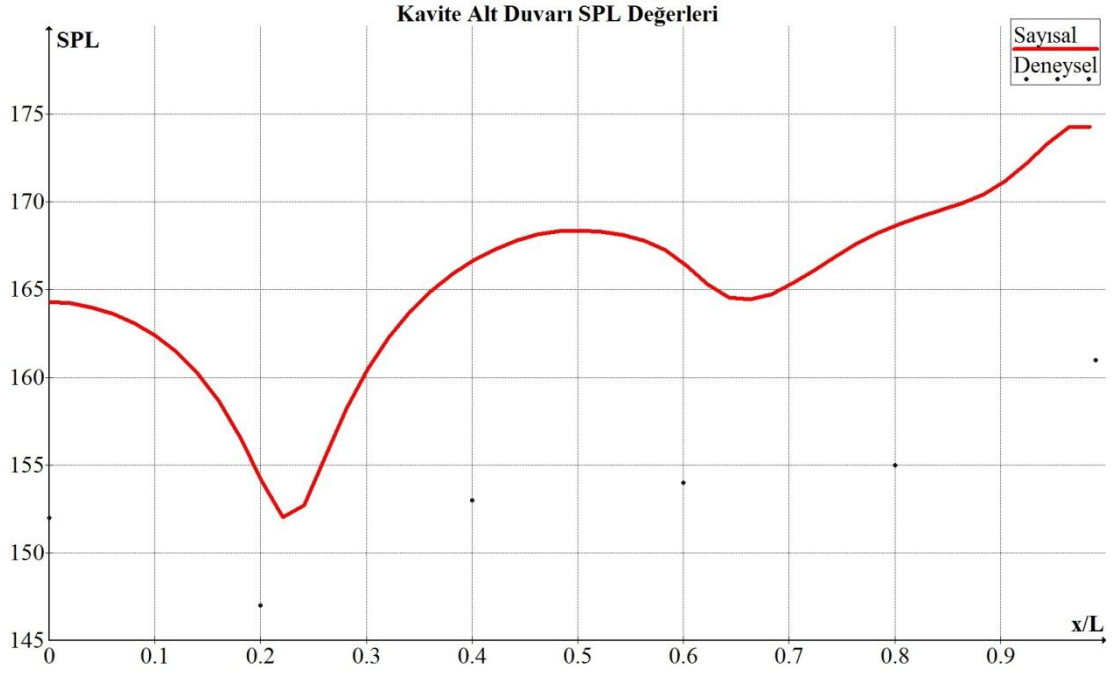


Şekil 3.13. Basınç konturları üzerine çizdirilmiş akım çizgileri

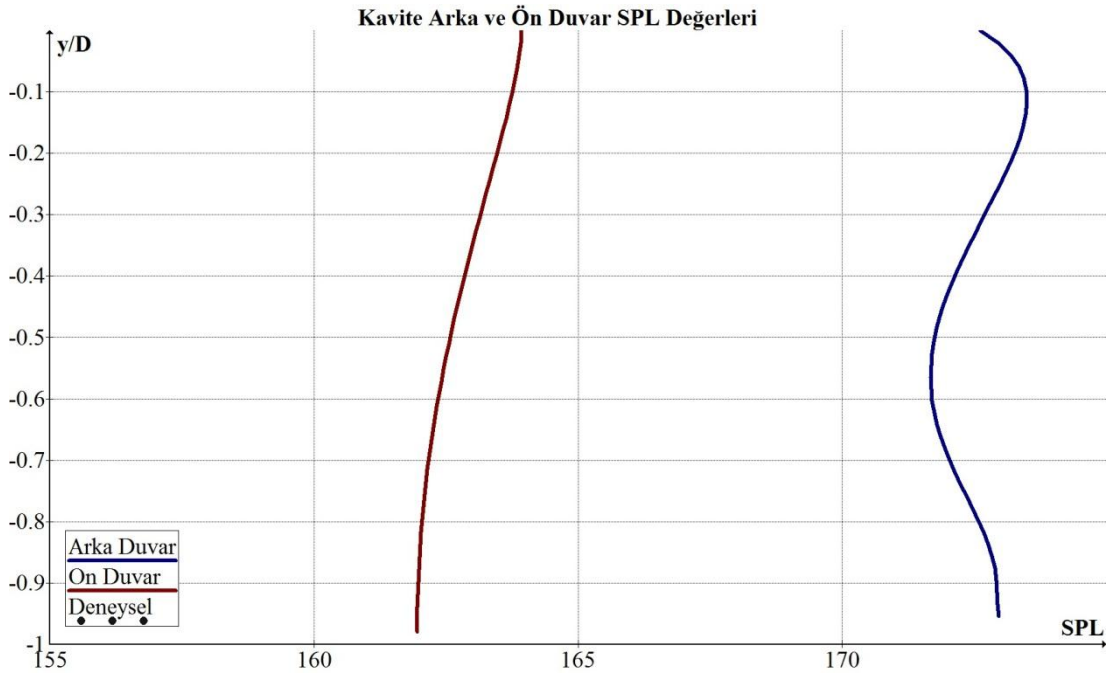


Şekil 3.14. Mach Sayısı Konturları

Şekil 3.10'da verilen frekans güç grafiğine göre sayısal olarak salınımların ilk frekansı 1037 Hz değerindedir, bu değer Rossiter formülasyonunda 1109 Hz deneysel olarak da yaklaşık olarak 1000 Hz civarında bulunmuştur.



Şekil 3.15. Kavite alt duvarı için SPL-konum grafiği



Şekil 3.16. Kavite arka ve ön duvarı için SPL-konum grafiği

### 3.5. Aynı Parametrelerdeki Üç Farklı Sayısal Çalışmanın Kıyaslanması

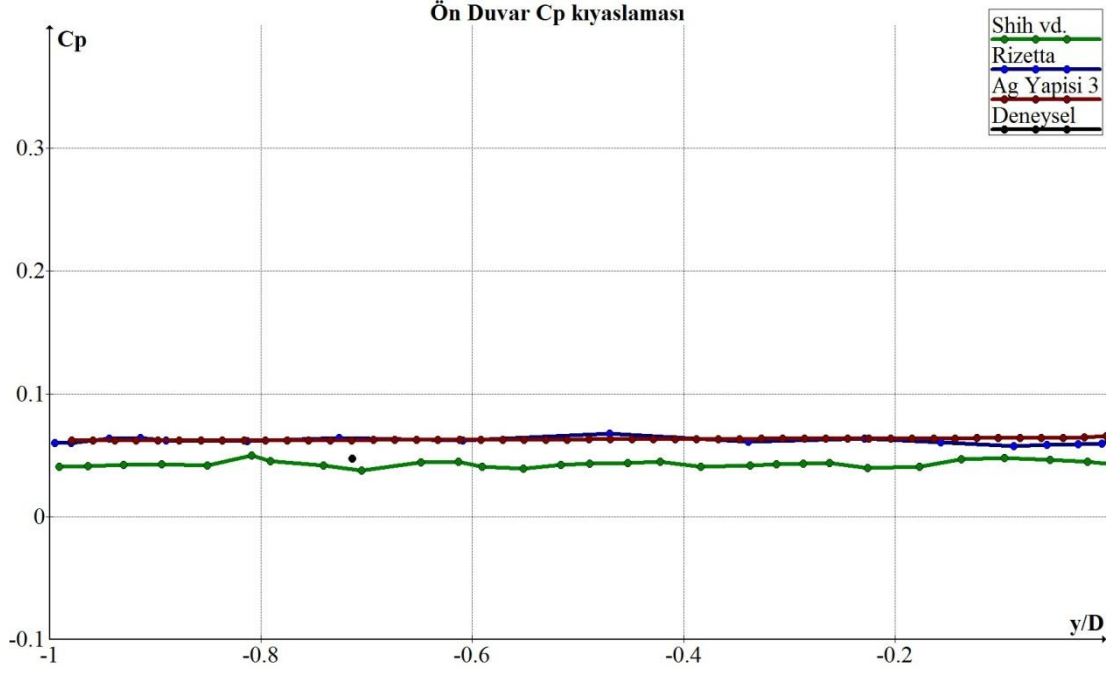
Shih vd.[18] ve Rizetta [20], iki boyutlu sayısal çalışmalarını aynı deneysel çalışma ile doğrulamıştır. Shih vd. geliştirdikleri sayısal algoritmada sonlu farklar yöntemi ile Navier-Stokes ve  $k-\varepsilon$  denklemleri eş zamanlı olarak düzensiz akış için çözümlenmiştir. Çalışmada zamanda ayrıklaştırma için ikinci dereceden kapalı yöntem, mekânda ayrıklaştırma için ikinci dereceden çözüm metodu kullanılmıştır. Sayısal kararlılığı sağlayabilmek ve çift-tek sayısal osilasyonların önlenmesi için denklemlere yapay yitim terimi eklenmiştir. Ağ yapısı kavite bölgesinde  $150 \times 51$ , kavite bölgesi üzerinde ve yan bölgelerde  $96 \times 40$  nokta içermektedir. Sınır tabakası içerisinde 28 nokta bulunmaktadır.  $y^+$  değeri ise 1.5'dur. Zaman adımı büyüklüğü  $2.5 \times 10^{-4}$  olarak alınmıştır.

Rizetta [20] aynı parametrelerdeki sayısal çalışma çözümlemesinde geliştirdiği kodda [66] Navier-Stokes ve  $k-\varepsilon$  türbülans denklemlerini ayrıklaştırılmış çözüm metodu kullanarak çözümlenmiştir. Ağ yapısı kavite bölgesinde  $150 \times 61$ , kavite bölgesi üzerinde ve yan bölgelerde  $96 \times 60$  nokta içermektedir.  $y^+$  değeri ise 0.6'dır. Zaman adımı büyüklüğü  $1.25 \times 10^{-4}$  olarak alınmış her zaman adımında 3 iç iterasyon yapılmıştır.

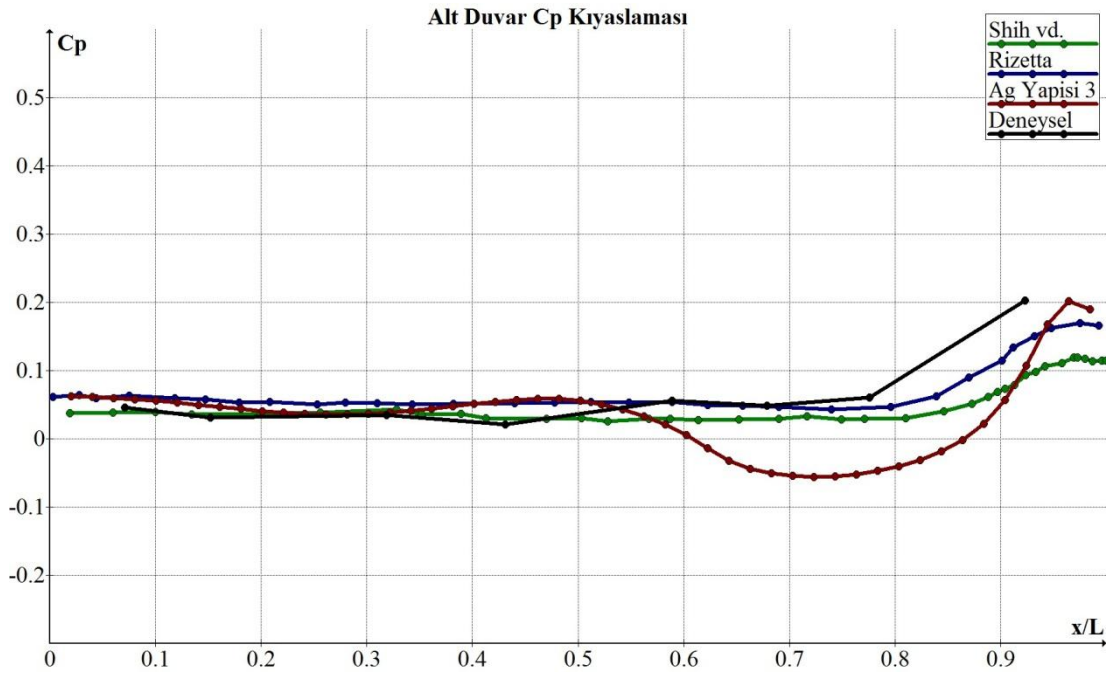
Shih vd. [18], Rizetta [20] tarafından gerçekleştirilen iki boyutlu simülasyonların ve bu tez kapsamında gerçekleştirilen iki boyutlu sayısal simülasyonların kıyaslaması SPL-zaman ve ortalama basınç kat sayısı ( $C_p$ )-konum grafikleri ile niceliksel, konturlar ile de niteliksel olarak yapılmıştır.

Şekil 3.17'de verilen ön duvar  $C_p$ - zaman grafiğine göre ortalama basınç kat sayısı üç çalışmada da tamamen sabit sayılabilir. Basınç değerlerindeki artış ve azalışların birbirlerini dengelemesi durumu ortalama basınç katsayısındaki sabite yakın dağılımın sebebidir. Kavite alt duvarı boyunca  $C_p$  değerleri büyük oranda sabit kalmakta ancak kavite sonunda yükselmektedir (Şekil 3.18). Bunun sebebi olarak kavite arka duvarı ile kesme tabakasının birleşmesi sonucunda kavite bölgesine giren kütlelerin basınç değerlerini yükseltmesi verilebilir. Ağ yapısı 3 için alt duvarda diğer

sayısal çalışmalardan ve deneysel çalışmadan farklı olarak  $C_p$  değeri önce düşmekte sonra yükselmektedir. Bu durum kesme tabakası ve arka duvarın birleştiği andaki ani basınç düşüşünü ve kütle girişiyle basınç değerlerinin yeniden yükselmesini doğrular niteliktedir.

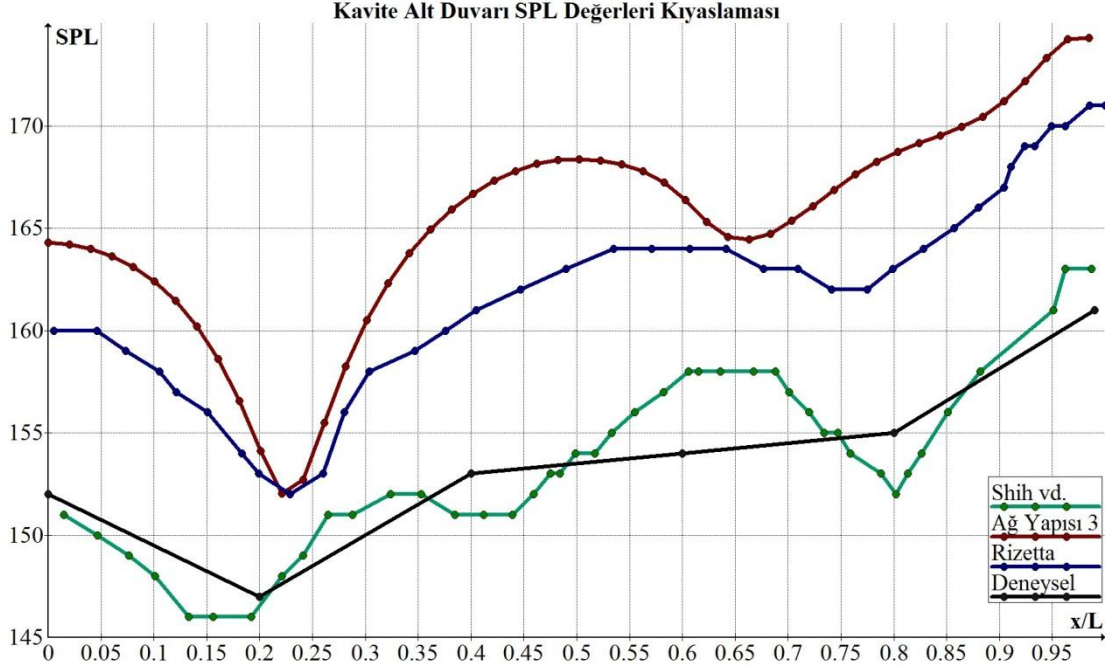


Şekil 3.17. Kavite ön duvar için  $C_p$ - konum grafiği



Şekil 3.18. Kavite alt duvar için  $C_p$ - konum grafiği

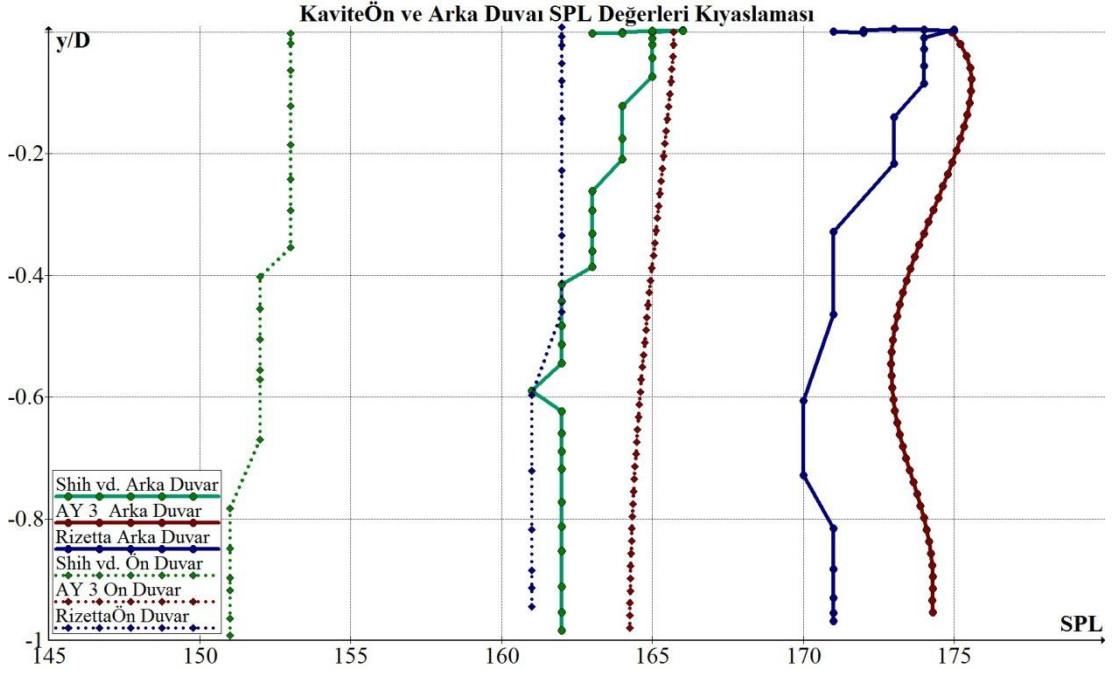
Alt duvar SPL değerleri grafiği incelendiğinde Shih vd.'nin [18] deneysel çalışma ile oldukça uyumlu sonuçlar yakaladığı görülmektedir. Rizetta'nın [20] çalışması şu andaki çalışma ile büyük oranda benzer bir sonuç yakalamıştır. Deneysel SPL değerlerinden yaklaşık 10 dB daha yüksek SPL değerlerine sahiptir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Kavite alt duvar için SPL- konum grafiği

Şekil 3.20'de verilen arka ve ön duvar için SPL değerlerine göre üç çalışmada da en yüksek SPL değerleri kavite arka duvarında ölçülmüştür. Shih vd.'nin [18] çalışması bütün duvarlarda en düşük SPL değerlerini yakalarken Rizetta [20] ve şu andaki çalışma üç duvar içinde oldukça yakın değerlerde SPL seviyeleri ölçülmüştür. Shih vd.'nin en düşük SPL değerlerini yakalamasının nedeninin korunum denklemlerine yitim terimi eklenmesi olduğu tahmin edilmektedir.





Şekil 3.20. Kavite ön ve arka duvar için SPL- konum grafiği

Üç çalışmada da akışın yapısı ve fiziği benzer şekilde ortaya konmaktadır. Girdap oluşumları, kesme tabakası kararsızlıkları, kesme tabakası- arka duvar etkileşimi üç çalışma ile de gözlemlenmiştir. Ancak farklı türbülans modellerinin farklı programlar ile çözülmesi, farklı ağ yapıları, zaman adımları ve üç boyut etkileri düşünüldüğünde bu üç çalışma arasında var olan farkların olağan olduğu düşünülmektedir.

## Tartışma

Bu bölümde yapılan zaman adımı, ağ yapısı ve türbülans modeli kıyaslaması çalışmaları sonuçlarına göre analizler;

- Ağ yapısı 3 ile
- $10^{-6}$  zaman adımında
- $k-\omega$  türbülans modeli ile gerçekleştirilecektir.

Seçilen sayısal parametrelerin doğruluğunu irdelemek amacıyla literatürde aynı parametreler ile çalışan iki araştırmacının [18, 20] sayısal sonuçları bu çalışma sonuçları ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak seçilen parametreler ile gerçekleştirilen analizlerde akış özelliklerinin yakalanabildiği diğer sayısal çalışmalar ve deneysel çalışmalar ile uyumlu sonuçlar alındığı gözlemlenmiştir.

#### 4. KAVİTE UZUNLUK/DERİNLİK ORANININ AKIŞ FİZİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİ

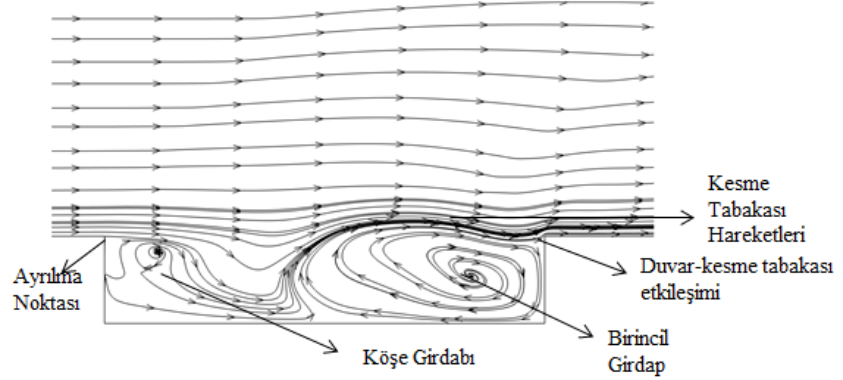
Nümerik çalışmalar, akışkanlar için ana denklemleri çözümlen hesaplamalı akışkanlar dinamiği programlarından FLUENT [46] kullanılarak yapılmıştır. Hesaplama sırasında kullanılan sayısal yöntemler ayrıntılı olarak Bölüm 2’de anlatılmıştır. Bölüm 3’de sayısal parametrelerin akış çözümlenmesine etkileri üzerine çalışmalar yapılmış, uygun ağ yapısı, zaman adımı ve türbülans modeli belirlenmiştir. Zaman adımı büyüklüğü  $10^{-6}$  olarak belirlenmiş her bir analiz k- $\omega$  türbülans modeli ile 22.000 zaman adımı için çözümlenmiştir. Belirlenen ağ yapısı (ağ yağısı 3) nokta sayısı değişen geometriler ile orantılı olarak değiştirilmiştir.

Bu bölüm çalışmalarında L/D oranı 1 ile 10 arasında değiştirilmiş ve kavite uzunluğunun akışa olan etkisi, akış görselleri ve akış alanı basınç ölçümleri ile incelenmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen simülasyonlardaki kavite uzunluk ve genişlik değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı L/D oranına sahip kavite geometrik özellikleri

İsimlendirme	L (m)	D(m)	L/D
<b>LD1</b>	0.0238	0.0238	1
<b>LD3</b>	0.0714	0.0238	3
<b>LD5</b>	0.12065	0.0238	5
<b>LD7</b>	0.180975	0.0238	7.6
<b>LD10</b>	0.2413	0.0238	10

Kavite L/D oranının 5 olduğu açık kavite akışı fiziği Bölüm 2’de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Bu kavite akışında sıkıştırılabilir kesme tabakası oluşumu, kesme tabakası kararsız hareketleri, akış-duvar, girdap-kesme tabakası, akustik dalgalar ile basınç dalgalarının etkileşimi, kavite bölgesinde birden fazla girdap oluşumu ve girdap hareketlenmeleri yakalanmıştır (Şekil 4.1) .

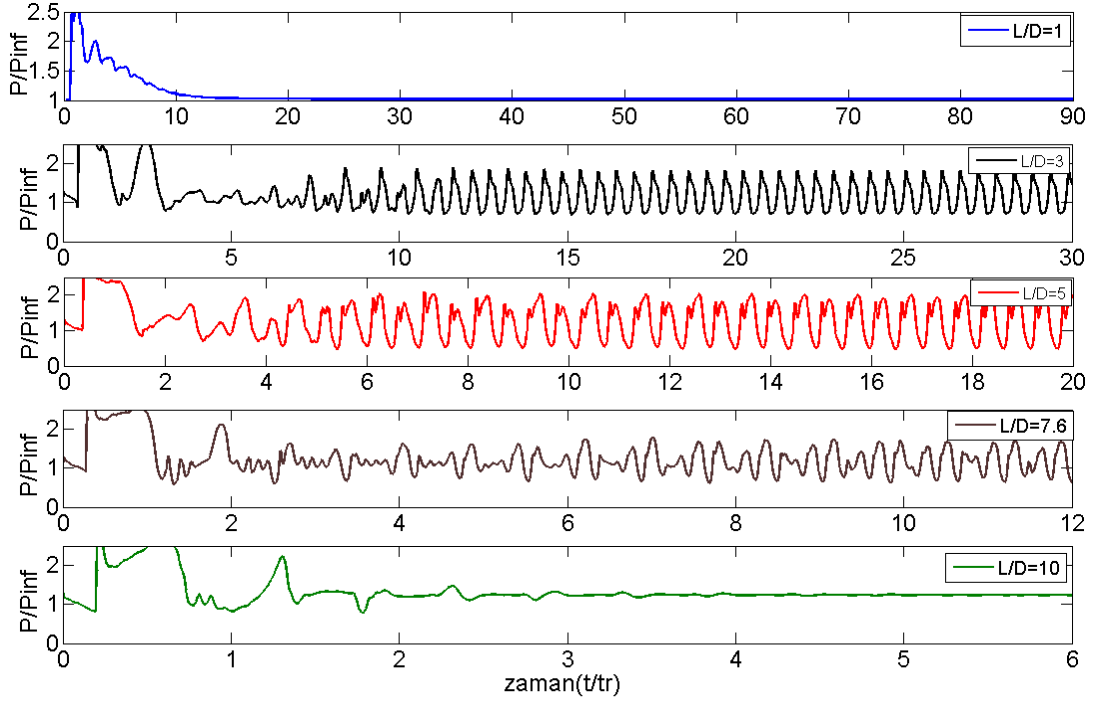


Şekil 4.1. LD5 kavite akışı için akış karakteristikleri

Kavite uzunluklarının değiştirilmesi ile açık kavite akış mekanizmasında değişimler gözlemlenmiş farklı uzunluklardaki kavitelere LD5 kavite konfigürasyonu ile elde edilen sonuçlardan farklı sonuçlar elde edilmiştir. Kavite uzunluğunun kavite akışını etkileyen önemli parametrelerin başında geldiği bu bölümde yapılan incelemeler sonucunda anlaşılmıştır.

Seçilen bütün konfigürasyonlar LD10 hariç açık kavite akışı aralığındadır; LD10 ise açık kavite akışından geçiş bölgesi akışına geçiş değeridir. Literatürlere göre LD1 kavite akışı derin kavite diğer konfigürasyonlar ise sıkı kavite akışıdır [7].

LD1 konfigürasyonunda basınç salınımları gözlemlenmemekte, kavite bölgesinde tek bir sirkülasyon bölgesi oluşmaktadır (Şekil 4.4). Dar kavite bölgesi nedeni ile oluşan girdap zayıftır ve girdap hareketlenmesi meydana gelmemektedir. Kavite üzerinde yeterli mesafe olmaması kesme tabakası hareketlenmelerini önlemektedir. Kesme tabakası hareketlerinin meydana gelmemesi, basınç salınımlarının oluşmaması ve kavite bölgesi etkileşimlerinin düşük seviyede kalmasını açıklamaktadır. Şekil 4.2, değişen  $L/D$  oranlarındaki serbest basınç değerleri ile boyutsuzlaştırılmış basınç değerlerine bağlı Rossiter periyodu ile boyutsuzlaştırılmış zaman grafiklerini vermektedir.



Şekil 4.2. Basınç- zaman grafiği (a)LD1 (b)LD3 (c)LD 5 (d)LD7 (e)LD 10 (kavite arka duvarı  $y/d=0.6$  konumu verileri kullanılmıştır)

Sığ kavitelere geçilmesi ile beraber (LD3) ortalama basınç değerleri serbest basınç değerlerinin 2 katına kadar çıkmaktadır. Bu basınç salınımları kesme tabakası hareketlerinin varlığına işaret etmekte ve kavite bölgesine kütle giriş çıkışı olabileceğini göstermektedir. Açık kavite akışlarında kavite giriş köşesinde ayrılan kesme tabakası kavite bölgesini kararsız hareketlenmeler ile aşmakta ve kavite çıkış köşesinde tekrar birleşmektedir. LD3, LD5 ve LD7 geometrileri açık kavite akışını temsil etmektedir ve açık kavite akışlarında beklenen oluşumlar bu konfigürasyonlarda meydana gelmektedir. LD3, LD5 ve LD7 kavitelerinde akış tam gelişmiş hale geldikten sonra periyodik salınımlar yapmaktadır. En yüksek mertebedeki salınımlar LD5 yapısında oluşmaktadır. LD1, LD3 ve LD5 dikkate alındığında kavite uzunluğunun artması, basınç salınımlarında ki artışı tetiklemektedir; ancak LD7 akışı da düşünüldüğünde bu konfigürasyonda periyodiklik bozulmuş ve salınımlar LD5'e göre daha düşük seviyededir. LD10'da ise akış salınımları büyük oranda sönümlenmiştir.

LD1 derin kavite özellikleri taşıdığından, LD10 ise geçiş bölgesi akışı olduğundan açık kavitelerin özelliği olan basınç salınımlarına sahip değildir. Uniform dağılıma yakın basınç değerleri bu konfigürasyonlarda tek mod gözlemlenmesine neden olmakta ve akış mekanizmasının diğer konfigürasyonlardaki kadar karmaşık ve güçlü olmayacağını göstermektedir. Kavite uzunluğunun artması ile beraber basınç salınımlarındaki periyodik yapı bozulmaktadır.

Çizelge 4.2. İlk üç Mod için frekans değerleri

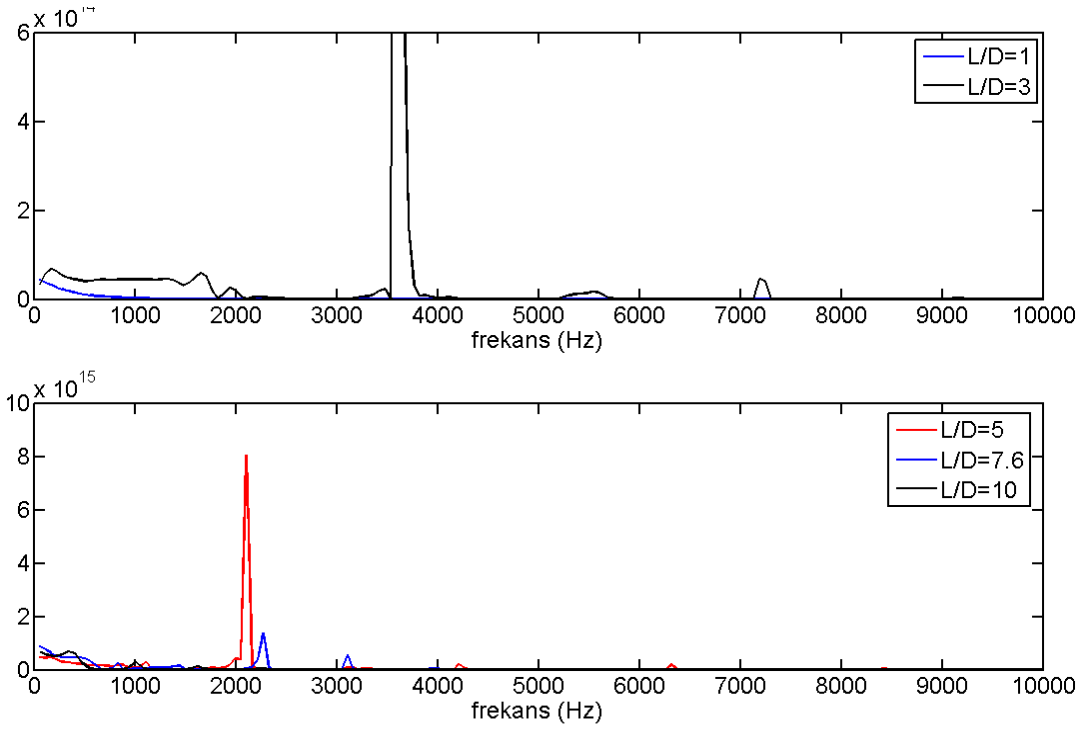
L/D	Frekans Modları	Sayısal Değerler (Hz)	Gelşt. Rossiter Form.( $k=0.55$ & $\alpha=0.25$ ) (Hz)	Rossiter Form. (Hz)	Fark (%) (Gelşt. Rossiter Form. ve Sayısal St değerleri)	Fark (%) (Rossiter Form. ve Sayısal St değerleri)
1	$f_1$	4823.0	4566.7	5622.2	5.6	14.2
1	$f_2$	10034.0	10656.0	11244.4	5.8	10.7
1	$f_3$	-	16744.0	16866.6	-	-
3	$f_1$	1940.0	1522.2	1663	27.0	16.7
3	$f_2$	3880.1	3551.8	3659	9.2	6.0
3	$f_3$	5559.2	5581.5	5488	0.4	1.3
5	$f_1$	1037.0	900.8	1109.1	15.0	6.5
5	$f_2$	2106.0	2102.0	2218.0	0.19	5.0
5	$f_3$	3160.0	3303.1	3327.0	4.5	5.0
7.6	$f_1$	609.8	600.55	739.4	1.5	17.5
7.6	$f_2$	1441.0	1401.3	1478.7	2.8	2.5
7.6	$f_3$	2273.0	2202.1	2218.1	3.2	2.5
10	$f_1$	388.0	450.41	554.5	13.7	30.0
10	$f_2$	1053.0	1051.0	1109.1	0.19	5.1
10	$f_3$	1663.0	1651.5	1663.5	0.71	0.1

Not: '-' işareti mod frekansının gözlemlenemediği anlamındadır.

Frekans değeri genliğinin en yüksek olduğu frekans değeri dominant frekans değeri olarak bilinmektedir. Bu dominant frekans değeri temel modda yakalandığında sistem tek bir moda sahiptir yani akışı etkileyen temel yapılar birinci modda yakalanmaktadır. Çoklu modlu sistemlerde en büyük genlikteki mod birinci modda oluşmamaktadır. Bu durum ise dominant mod öncesinde gelen modların yani daha küçük ölçekli türbülans yapılarının akış üzerinde daha fazla etkisi olduğunu göstermektedir. Mod frekans değerleri arka duvara ulaşan ve basınç dalgalarını yaratan akustik alana bağlıdır. LD1 ve LD10 akışlarında dominant frekans değerleri sırası ile 4823.0 Hz ve 388.0 Hz değerinde olup Şekil 4.3’de gözlemlendiği üzere ilk modda yakalanmaktadır (Çizelge 4.2). Kavite uzunluğunun artması ile beraber sistem çoklu modlara sahip olmaya başlamıştır.

LD3’deki düzensiz akış yapısının karmaşık doğası Şekil 4.2’de verilmiştir. Bu basınç salınımları incelendiğinde farklı aralıklarda farklı periyodik hareketler gözlemlendiğinden bir periyodluk sürecin başlangıç ve bitişini tanımlamak kolay değildir, dolayısıyla akışın birden fazla moda sahip olduğunu söylemek grafiğe bakarak bile mümkündür. Dominant mod değeri 2.mod’da 3880.1 Hz olarak gözlemlenmekte ancak bir diğer mod ise 1940.0 Hz değerindedir. LD5 akışında dominant mod 2106 Hz değerinde olup 2.modda oluşmaktadır. LD5 akışında dominant mod değeri olan 2106 Hz değerinden önce iki mod daha gözlemlenmiştir.

LD7 akışında 6. periyod itibariyle mod değişimi göze çarpmaktadır, akışın periyodikliği bozulmuş farklı bir periyodik hareketlenme gözlemlenmiştir ki bu durum çoklu modları tetiklemektedir (Çizelge 4.2). LD10 akışında ise sistem tek moda dönmüştür. Bu durum dikkate alındığında açık kavitelerde kavite uzunluğu artması ile beraber sistemin birden fazla moda sahip olduğunu söylemek mümkündür. Akışın çoklu modlara sahip olması ise akışı daha karmaşık bir hale getirmektedir ve kavitelerde meydana gelen etkileşimlerin artışına neden olmaktadır. Bu etkileşimlerin artışı ise çözümü daha da zor hale getirmektedir.



Şekil 4.3. Farklı L/D oranları için güç frekans grafikleri (kavite arka duvarı  $y/d=0.6$  konumu verileri kullanılmıştır)

Rossiter [8] tarafından geliştirilen yarı deneysel formülasyon ile elde edilen frekans değerleri, sayısal çalışma sonucunda elde edilen frekans değerleri ve Heller vd. [15], tarafından modifiye edilen Rossiter formülasyonu ile elde edilen frekans değerleri kıyaslaması Çizelge 4.2’de verilmiştir. Modifiye edilmiş Rossiter formülasyonunda literatürdeki çalışmalar göz önüne alınarak  $K=0.55$  ve  $\alpha=0.25$  olarak alınmıştır. Kavite uzunluğu değiştirmek  $k$  ve  $\alpha$  değerlerinin de değişimine neden olmaktadır. Bunun nedeni olarak ise kavite uzunluğu değişiminin basınç dalgalarının arka duvardan ön duvara ulaşma sürelerini, akustik dalga oluşma süresi gibi faktörleri etkilediği varsayılabilir. Modifiye edilmiş Rossiter formülasyonu ile elde edilen frekans değerleri sayısal sonuçlarla daha uyumlu ve en büyük fark LD3’te % 27 değerindedir.  $K$  ve  $\alpha$  değerleri bir çok parametreye ve farklı L/D oranlarına bağlı olarak değişim gösterdiğinden bu değerlerin değişmesi, farkları daha düşük hale getirebilecektir. Dolayısıyla bu kıyaslamada hangi modelin daha doğru olduğunu söylemek kolay olmasada modifiye edilmiş Rossiter Formülasyonun 1.5 Mach sayısı için Rossiter formülasyonuna oranla daha iyi bir yaklaşım yaptığı söylenebilir.



Birinci mod tahminleri iki formulasyonda birbirlerinden oldukça farklı sonuçlar vermiş, ilerleyen modlarda formulasyonlar arası fark azalmıştır. Her iki formulasyon ile kıyaslanan sayısal çalışma sonuçları büyük sapmalar göstermemektedir ve sayısal çalışmadaki salınım frekanslarının yarı deneysel değerlere yakın olduğu gözlemlenmektedir.

Kavite uzunluğunun artması ile birlikte frekans değerleri düşmektedir. Bir periyodluk zaman süresi kavite uzunluğu ile orantılı olarak artmaktadır. Çizelge 4.3'de Rossiter formülasyonu, modifiye edilmiş Rossiter formulasyonu ve sayısal çalışma sonucu elde edilen frekans değeri ile hesaplanan Strouhal sayıları kıyaslaması yapılmıştır. Bu tabloya göre her bir mod değerinde L/D oranından bağımsız olarak sabit Strouhal sayısı elde edilmektedir. Rossiter formulasyonunda bu teoriyi doğrulamaktadır. Strouhal sayısının artışı mod artışı ile doğru orantılıdır. Mod değeri arttıkça Rossiter Strouhal sayısı ile daha uyumlu sayısal Strouhal sayıları elde edilmiştir.

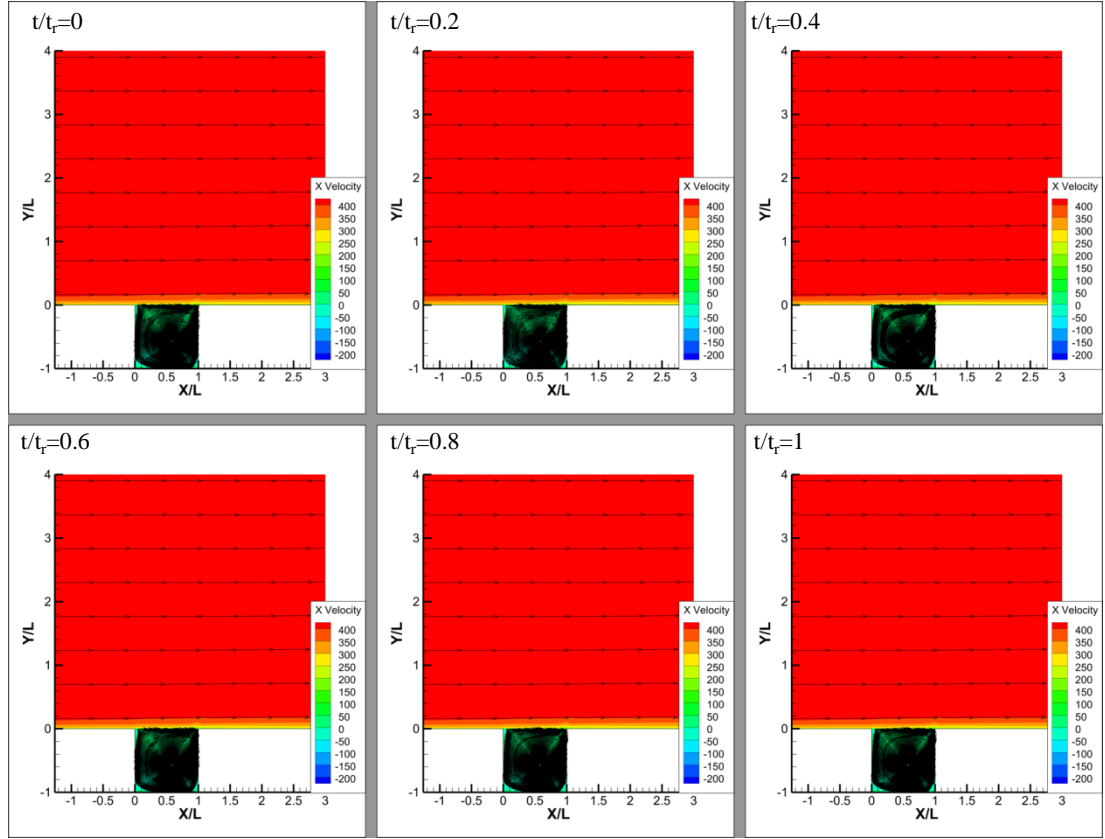
Çizelge 4.3. İlk üç Mod için Strouhal sayıları

L/D	Frekans Modları	Sayısal St değerleri	Gelşt. Rossiter Form. St. Değerleri	Rossiter Form. St değerleri	Fark (%) (Gelşt. Rossiter Form. ve Sayısal St değerleri)	Fark (%) (Rossiter Form. ve Sayısal St. Değerleri)
1	$f_1$	0.26	0.25	0.30	4.0	13.
1	$f_2$	0.54	0.57	0.60	5.2	10.0
1	$f_3$	-	-	0.90	-	-
3	$f_1$	0.31	0.25	0.30	24.0	3.4
3	$f_2$	0.62	0.58	0.60	6.8	3.4
3	$f_3$	0.89	0.89	0.90	0.0	1.2
5	$f_1$	0.28	0.24	0.30	16.6	6.6
5	$f_2$	0.57	0.57	0.60	0.0	5.0
5	$f_3$	0.86	0.89	0.90	3.4	4.5
7.6	$f_1$	0.25	0.24	0.30	4.2	16.7
7.6	$f_2$	0.59	0.57	0.60	3.5	1.7
7.6	$f_3$	0.93	0.9	0.90	3.3	3.4
10	$f_1$	0.21	0.24	0.30	12.5	30.0
10	$f_2$	0.57	0.57	0.60	0.0	5.0
10	$f_3$	0.90	0.90	0.90	0.0	0.0

Not: '-' işareti mod frekansının gözlemlenemediği anlamındadır.

Literatürden ve Bölüm 2 çalışmalarından bilindiği üzere kavite akışları (i) kavite bölgesinde girdap oluşumu ve hareketlenmeleri (ii) kesme tabakası kararsız hareketleri, basınç salınımları ve şok oluşumları (iii) Akustik, basınç dalgaları etkileşimi içermektedir. LD1 akışı (Şekil 4.4) derin kavite akışı olup, oluşumlar kesme tabakası yeterince uzun olmadığından kesme tabakası üzerinde değişim gösterememektedir. Şekil 4.4'de bir periyotluk zaman dilimi içerisinde altı farklı an için hız konturları üzerine akım çizgileri çizdirilmiştir. Basınç değerlerinin neredeyse

üniform olmasına bağlı olarak kavite bölgesinde zayıf bir düzensiz yapı gözlemlenmektedir. Kavite bölgesinde tek bir girdap oluşumu vardır ve kesme tabakası hareketleri gözlemlenmemektedir.

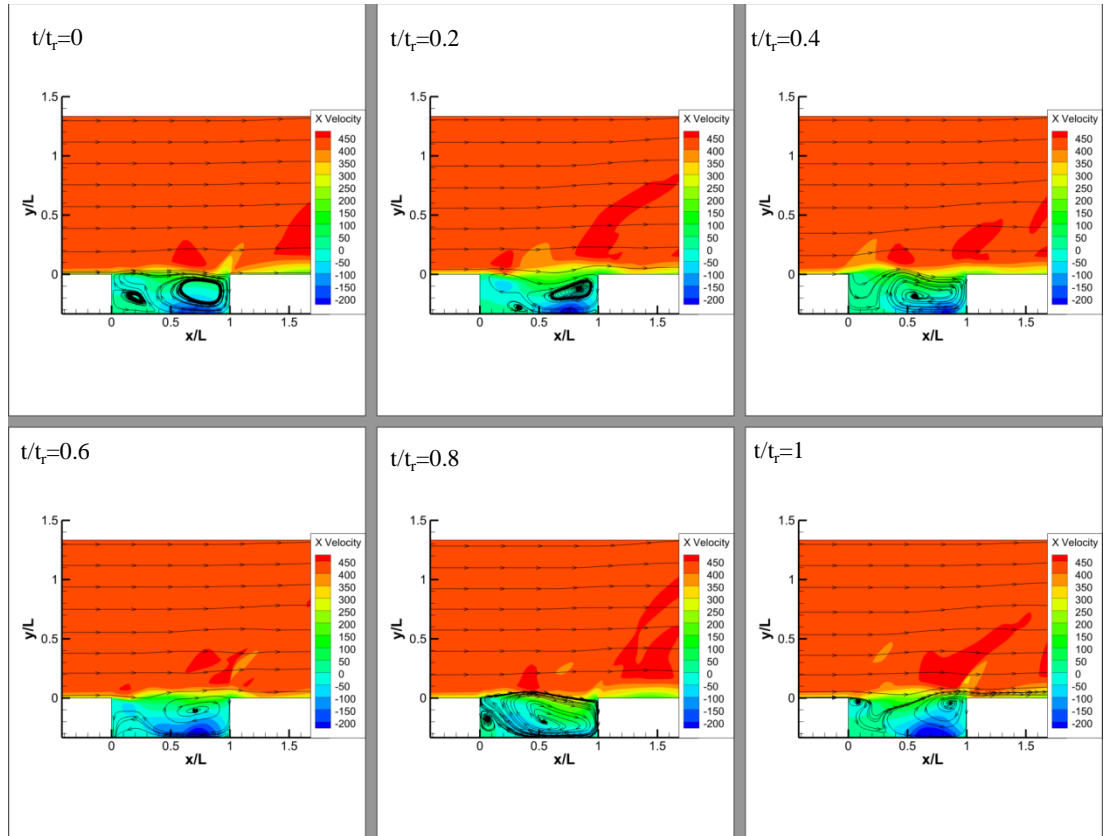


Şekil 4.4. LD1 için hız konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri

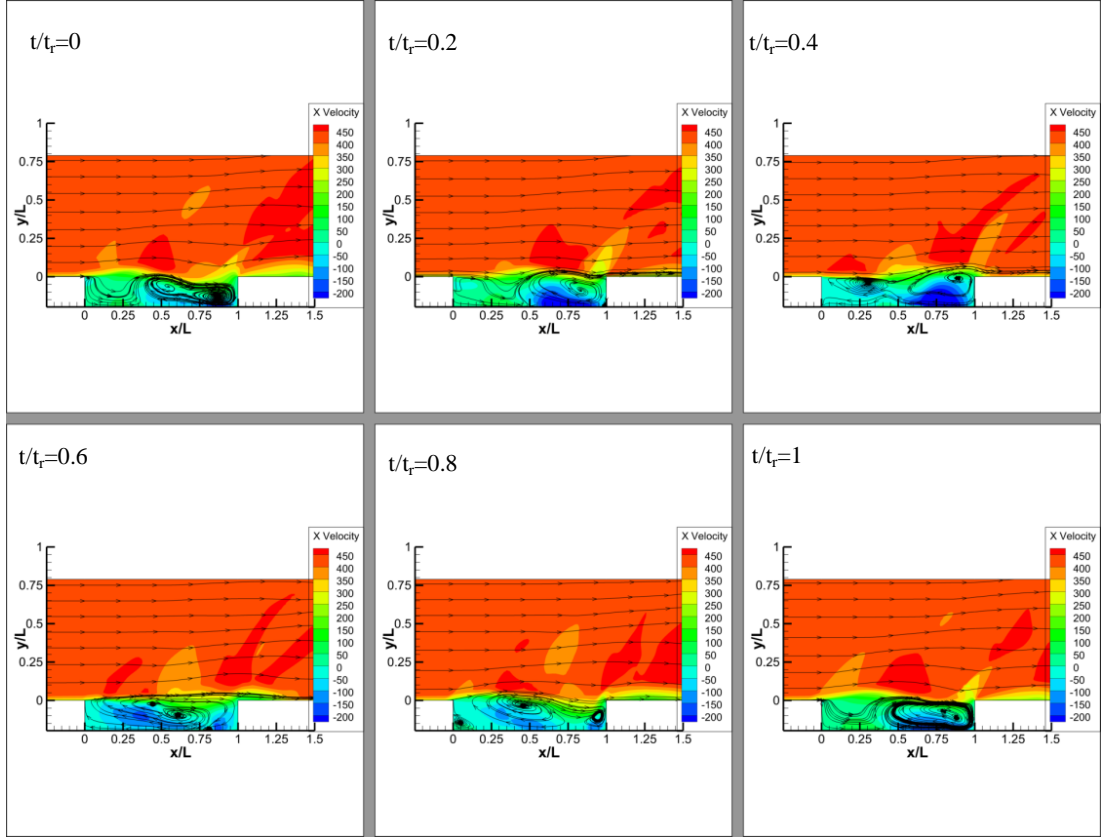
LD3 kavite akışı ile beraber kavite bölgesinde önemli etkileşimler ve değişimler oluşmaya başlamıştır. LD1’de oluşmayan şoklar ani basınç değişimlerine bağlı olarak LD3 konfigürasyonunda meydana gelmiştir. Açık kavite özellikleri olan bu oluşumlar Şekil 4.5’de verilen hız konturları ile gözlemlenebilmektedir. Kesme tabakası eğilme ve bükülmeleri kavite bölgesinde olabilecek bir kütle giriş çıkışı ihtimalini yükseltmekte, basınç salınımları da bu iddiayı desteklemektedir. LD1, LD3, LD5 ve LD7 kavite basınç salınımları ve konturları bir arada irdelendiğinde girdap hareketlerinin basınç salınımlarına neden olan bir faktör olarak gösterilmesi mümkündür. Girdap oluşumlarının ve hareketlerinin en kuvvetli olduğu LD5 akışı en büyük genlikteki basınç salınımlarına sahip iken, girdap sayısının az olduğu ve

girdapların güçsüz olduğu LD1 ve LD10 akışı neredeyse uniform bir basınç dağılımına sahiptir. Arka duvarda kavite bölgesine doğru kesme tabakası eğilmesi LD3, LD5 ve LD7 akışlarında gerçekleşmektedir; bu oluşum en kuvvetli olarak LD5 akışında gözlemlenmektedir. Bu durum kavite bölgesine en yüksek enerji miktarının LD5 akışında girdiğini göstermekte ve yüksek genlikteki basınç salınımlarını açıklamaktadır.

Kavite uzunluğunun artması ile beraber akış alanındaki oluşumlar artış göstermektedir. Zamana bağlı olarak değişen ve geçici (transient) karakteristikler akış yönünde değişim göstermektedir. Tek bir mod yerine akış bir çok moddan etkilenmektedir. Basınç değişimine bağlı olarak oluşan şoklar LD5'te LD3'e göre daha kuvvetlidir. Oluşan girdapların kavite bölgesinde zamana bağlı olarak ilerlemesi, kavite giriş köşesinde yeni girdap oluşumu çoklu moda sahip olan LD3, LD5 ve LD7 için çizdirilen hız konturlarında gözlemlenmektedir (Şekil 4.4-4.6).

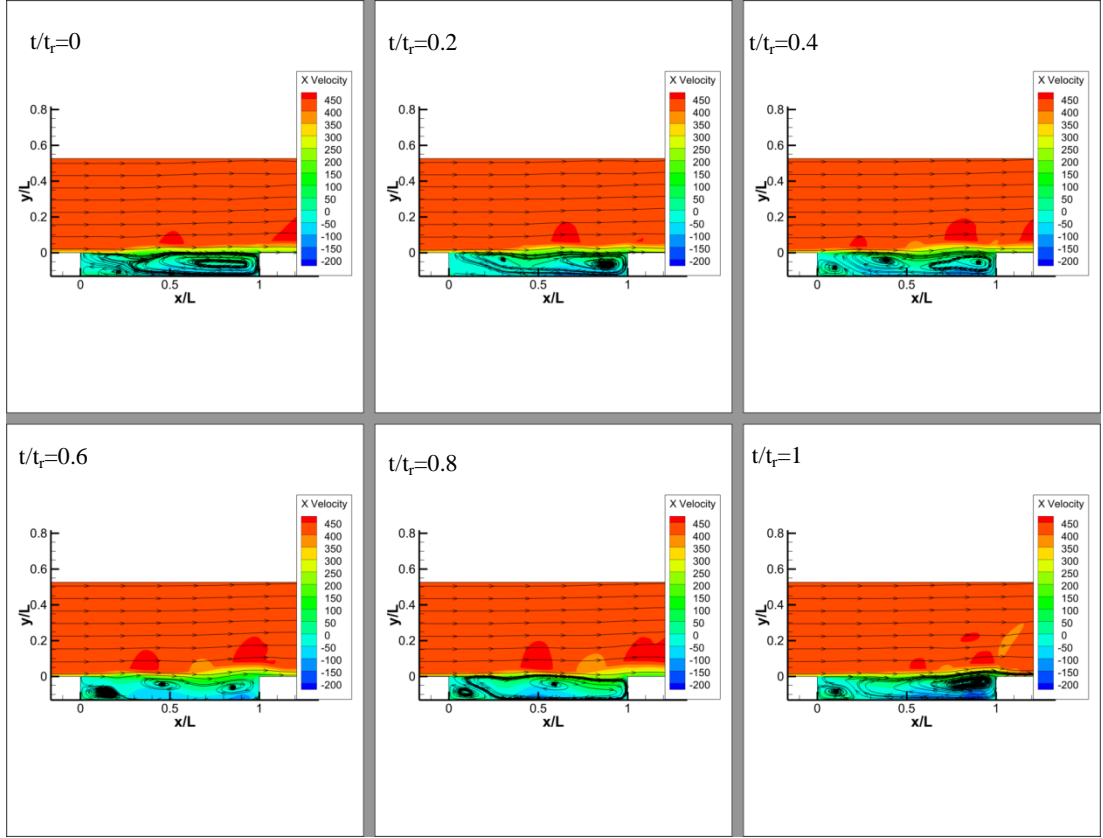


Şekil 4.5. LD3 için hız konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri



Şekil 4.6. LD5 için hız konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri

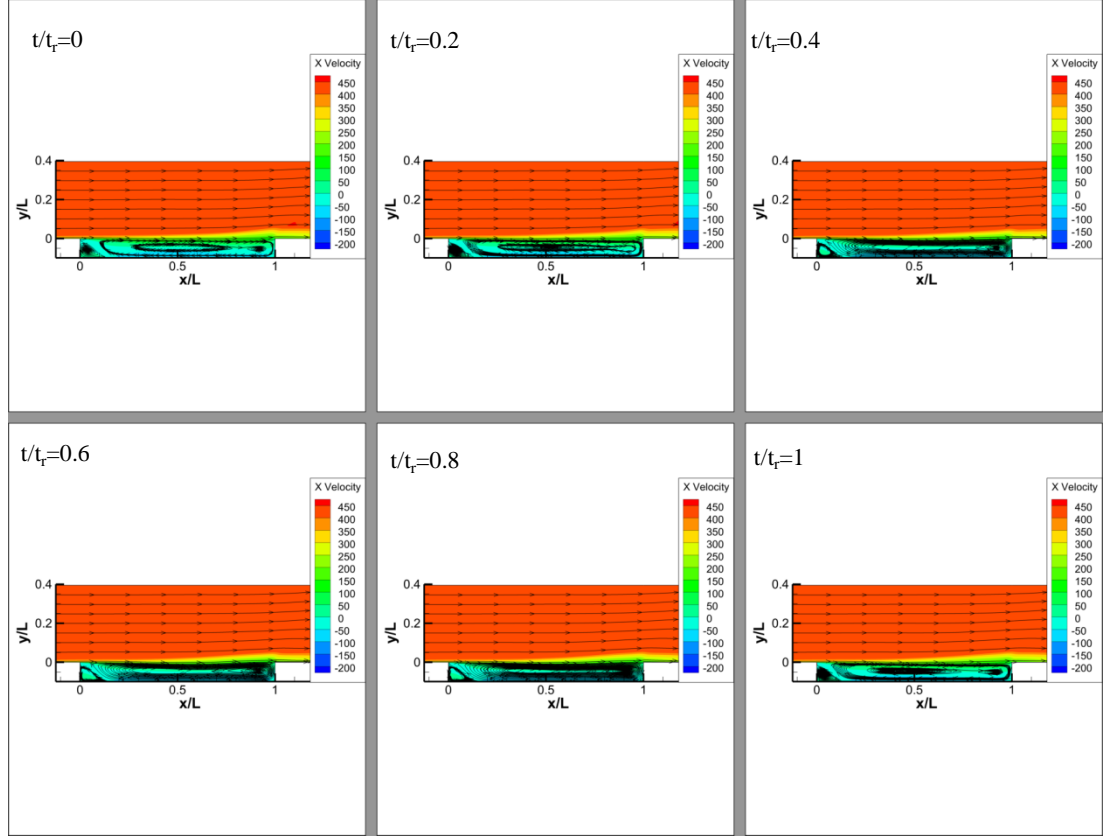
LD3 ve LD5 kavitelerinde kesme tabakası hareketleri bezner yapılarıdır. Kavite giriş köşesinde basınç artışından dolayı kesme tabakası kavite dışına bükülmektedir ve bu anda kaviteden kütle çıkışı olduğu varsayılmaktadır. Çoklu modlara sahip olan bu konfigürasyonlarda tekli moda sahip akıştan farklı olarak ikinci ve üçüncü girdap oluşumları, kesme tabakası hareketlenmeleri gözlemlenmektedir. Bu durumda çoklu modlu sistemlerde akışı etkileyen küçük ölçekli türbülanslı yapılar arasında köşe girdaplarının, kesme tabakası kararsız hareketlerinin olduğunu ve bu oluşumların akış üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 4.7. LD7 için hız konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri

LD10 kavitesi geçiş bölgesi kavite akışını temsil etmektedir. Geçiş bölgesi akışı açık ve kapalı kavite akışı arasındaki bölgedir.  $L/D$  oranının küçülmesi ile beraber geçiş bölgesi; açık kavite akışı özellikleri, bu oranın büyümesi ile birlikte kapalı kavite akışı özelliklerine yaklaşır. Kapalı kavite akışına yaklaşması ile beraber kesme tabakası özellikleri değişim gösterir. Açık kavite akışından farklı olarak kavite ön köşesinden ayrılan kesme tabakası kavite yerine çarpar bir süre sonra kavite yerinden tekrar ayrılır ve kavite arka duvarında tekrar birleşir. LD10 akışı açık kavite konfigürasyonuna yakın bir geçiş bölgesi akışı olduğundan kesme tabakası kavite ön köşesinde ayrılmakta ve kavite arka köşesinde tekrar birleşmektedir, ancak  $L/D$  oranının artışıyla beraber gözlemlenen kesme tabakası ve girdap hareketlenmeleri gözlemlenmemiştir. kavite bölgesini saat yönünde dönüş yapan büyük bir girdap ve küçük boyutlarda bir ön köşe girdabı oluşturmaktadır.

Basınç osilasyonlarından da gözlemlendiği üzere tek moda sahip olan bu akışta akışı etkileyen en önemli oluşum birincil girdap olarak düşünülmektedir.

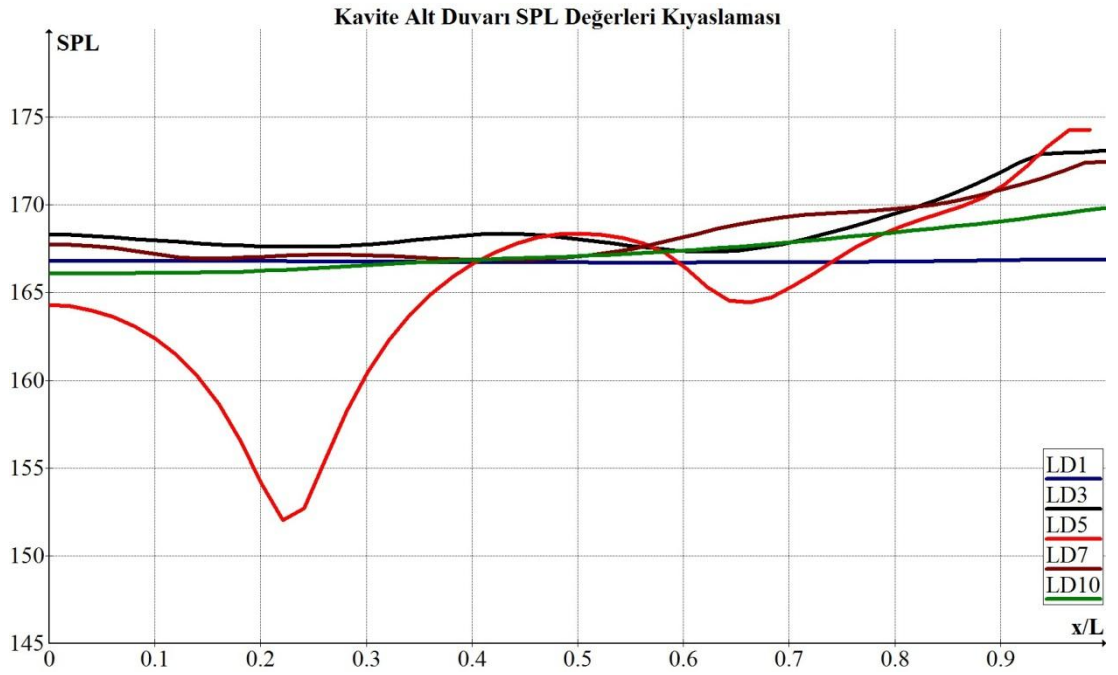


Şekil 4.8. LD10 için hız konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri

Kavite  $L/D$  oranının artışı ile beraber büyük girdap boyutunda da artış olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum Zhang ve Edwards [67] tarafından da aynı şekilde yorumlanırken, Dolling ve diğerleri [62],  $L/D$  değişiminin girdap boyutu değişimine etkisi olmadığını savunmaktadır.

Kavite arka duvarı  $y/d=0.6$  noktasından alınan basınç ölçümleri kullanılarak çizdirilen ses basınç seviyeleri grafikleri dikkate alındığında (Şekil 4.9-4.11) bütün konfigürasyonlarda en yüksek SPL değerleri kavite arka duvarında gözlemlenmiştir. Kavite uzunluğundan bağımsız olarak kesme tabakası duvar etkileşimi tüm konfigürasyonlarda meydana gelmiştir. Bu durum Rossiter [8], Heller ve Bliss [15]

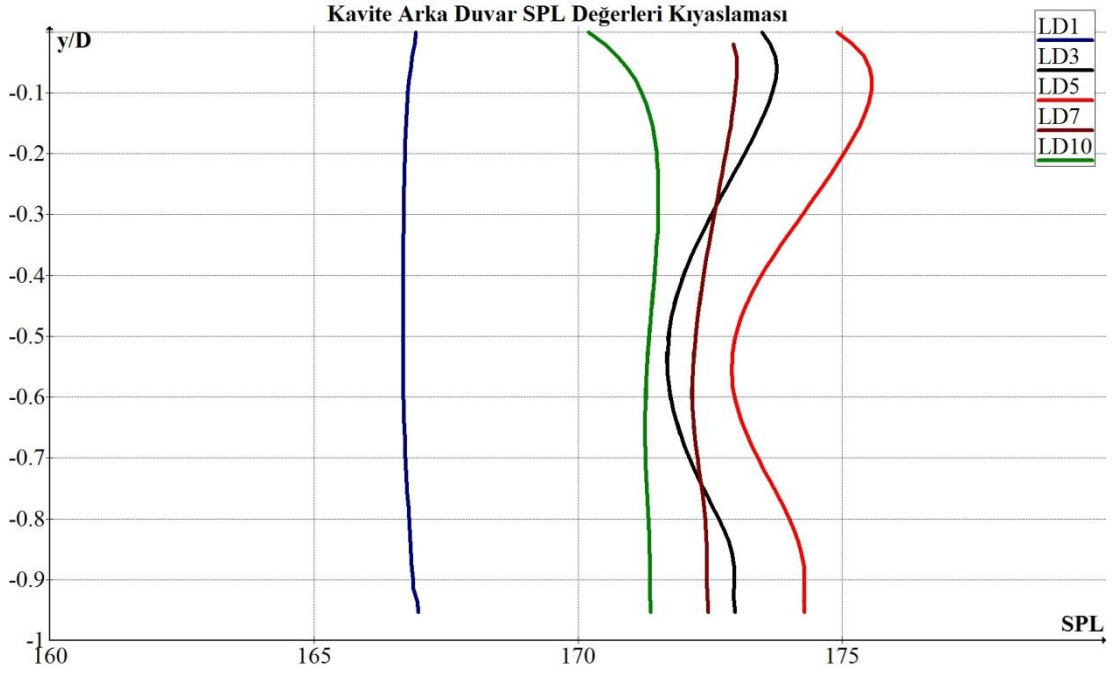
tarafından da öngürülen kesme tabakası duvar etkileşimi sonucu kavite bölgesine enerji aktarımını doğrular niteliktedir. Bu enerji aktarımı basınç salınımlarını yaratmakta ve kavite bölgesinde ses basınç seviyesi yükselmesine neden olmaktadır. LD1 kavitesi hariç bütün konfigürasyonlarda kavite alt duvarı ile arka duvarın birleştiği noktada (Şekil 4.9) SPL seviyelerinde artış göze çarpmaktadır. LD3, LD5 ve LD7 konfigürasyonlarında alt duvarda  $x/L=0.2$  noktası yakınlarında SPL değerlerinde düşüş göze çarpmaktadır. Bu üç geometri için benzer bir akış mekanizması bulunduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4.9. Kavite alt duvarı SPL-konum grafiği

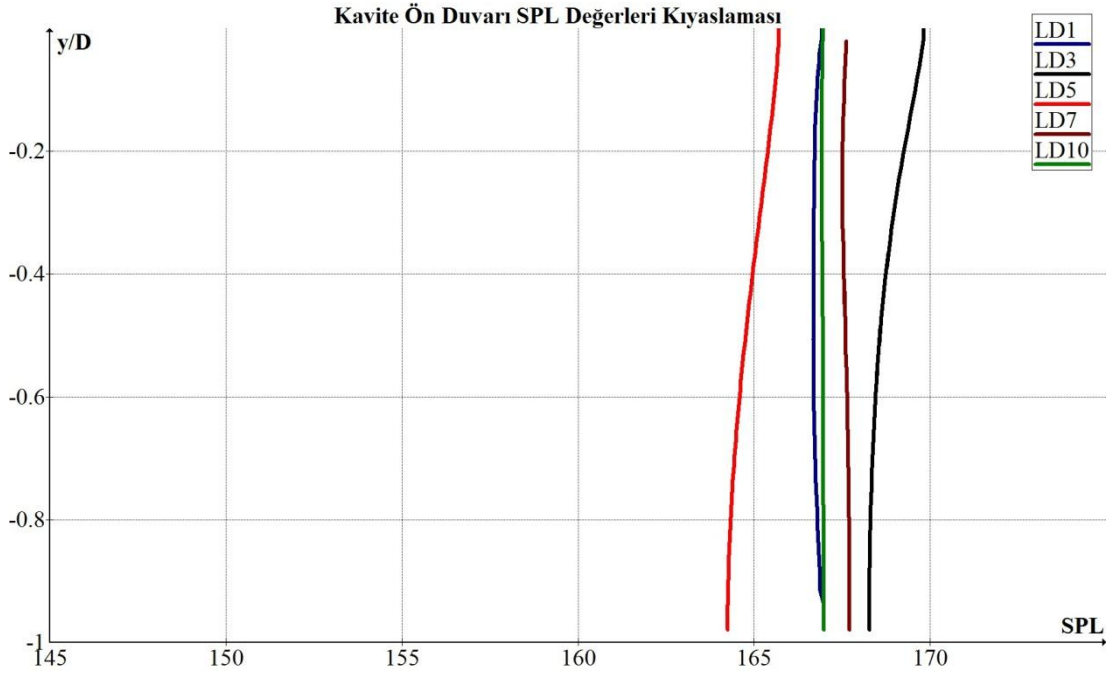
Kavite arka duvarı basınç salınımları (Şekil 4.2) genliği en yüksek değerlerine LD5 kavitesinde ulaştığından arka duvar SPL değerleri en yüksek değerlerini LD5 kavitesinde almaktadır. LD1 ve LD10 kavitesinde serbest basınç salınımlarının neredeyse uniform dağılım göstermesi her üç duvar için de sabite yakın SPL değerlerine neden olmaktadır (Şekil 4.9-4.11).





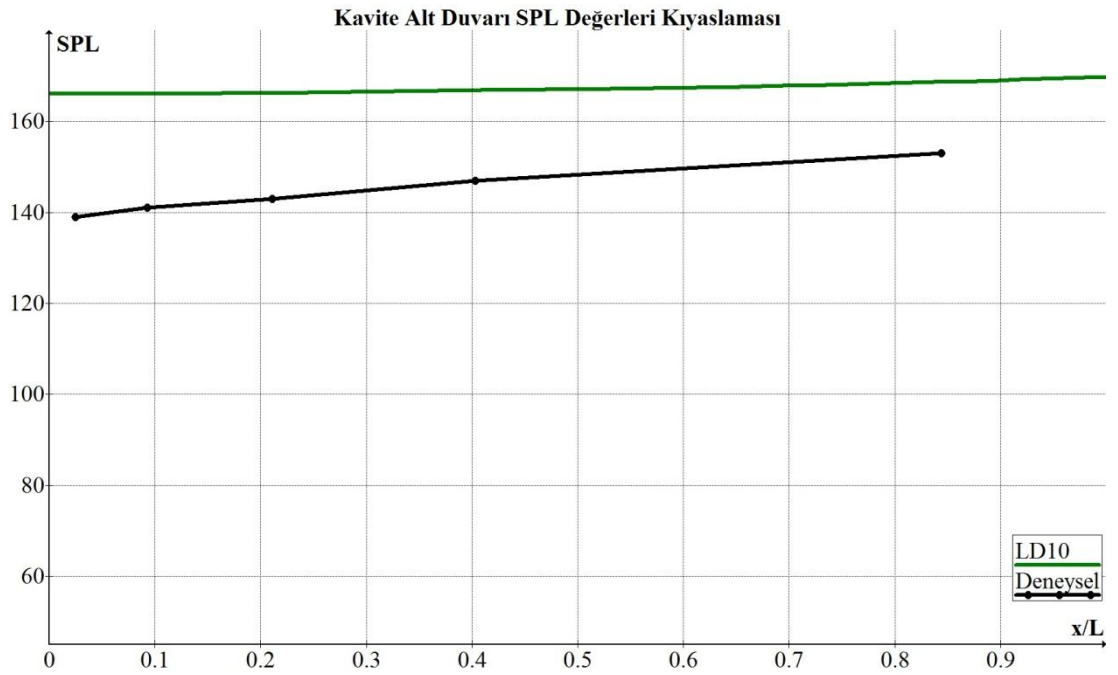
Şekil 4.10. Kavite arka duvarı SPL-konum grafiği

Kavite ön duvarında SPL dağılımları her geometri için neredeyse sabit bir dağılım gösterirken ön duvar giriş köşesinde artış olmaktadır. Bunun nedeni olarak serbest akış ile gelen sınır tabakasının giriş köşesinde ayrılması ve bu giriş köşesinde şok oluşması verilebilir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Kavite ön duvarı SPL- konum grafiği

LD10 kavitesi sayısal analiz sonuçları ile Kaufman'ın [14]  $L/D=9.9$  geometrisi için aynı parametrelerde gerçekleştirdiği deneysel çalışması ile kavite alt duvarı için SPL kıyaslaması yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12. LD10 ile deneysel çalışma ( $L/D=9.9$ ) arası SPL değerleri kıyaslaması

## **Tartışma**

Bu bölümde farklı kavite uzunluklarının kavite akışına etkisi beş farklı geometri ile incelenmiştir. Çalışma sonuçları baz alındığında kavite uzunluğu (L) değişiminin osilasyon frekanslarında önemli bir faktör olduğu rahatlıkla söylenebilir. Bu parametrelerde yapılan sayısal analizler göz önüne alındığında kavite uzunluğu ile SPL seviyeleri arasında bir orantı kurmak mümkün değildir. Açık kavite sınırları içerisinde kavite uzunluğu arttıkça tek moda sahip olan sistem çoklu modlara sahip bir akışa dönüşmektedir. Çoklu moda sahip konfigürasyonlarda akışı daha karmaşık bir hale gelmekte, akışı etkileyen yapılar artmakta ve küçük ölçekli olayların akış üzerindeki etkisini baskın hale gelmektedir.

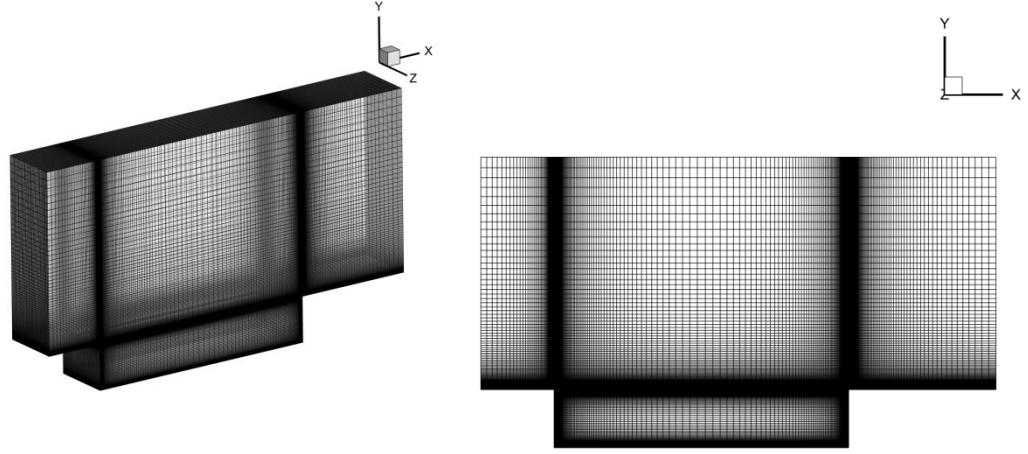
## 5. ÜÇ BOYUTLU AKIŞ SİMÜLASYONLARI VE İKİ BOYUTLU SİMÜLASYON SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde, Kaufman vd.'nin [13] deneysel çalışması ile aynı parametreler doğrultusunda yapılmış olan üç boyutlu nümerik çalışmalar bu deneysel çalışma ile doğrulanmıştır. Bölüm 3'de verilmiş olan iki boyutlu çalışma ile üç boyutlu çalışma kıyaslanmış, üç boyut etkileri araştırılmıştır. RANS ve DES yöntemleri üç boyutlu akış çözümlerinde kullanılmış ve türbülans yaklaşımlarının akışa olan etkileri incelenmiştir.

### 5.1. Akış Konfigürasyonu

Kaufman vd. [13] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma parametreleri Çizelge 2.1'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Mach sayısı 1.5, Reynolds sayısı  $1.09 \times 10^6$  1/m değerindedir. Serbest ortam statik sıcaklık değeri 218 K, serbest ortam statik basınç değeri 66.4 kPa değerindedir. Sınır tabakası kalınlığı 0.0051 m'dir. Kavite uzunluğu 0.12065 m, kavite genişliği 0.0635 m, kavite derinliği 0.0238 m'dir.

Üç boyutlu sayısal çalışmalarda kullanılan akış geometrisi Gambit [68] programında hazırlanmış, akış konfigürasyonu Şekil 2.4'de verilmiştir. Şekil 5.1.'de üç boyutlu yapısal olarak hazırlanan ağ yapısı gösterilmiştir. Kavite bölgesinde  $143 \times 81 \times 50$  hücre dış bölgelerde  $266 \times 93 \times 50$  hücre olmak üzere ağ yapısı 1.816.050 eleman barındırmaktadır. Akış alanı  $-0.24865 < x/L < 1.5$ ,  $-1.0 < y/D < 4.0$  ve  $0 < z/w < 0.5$  ölçülerindedir.



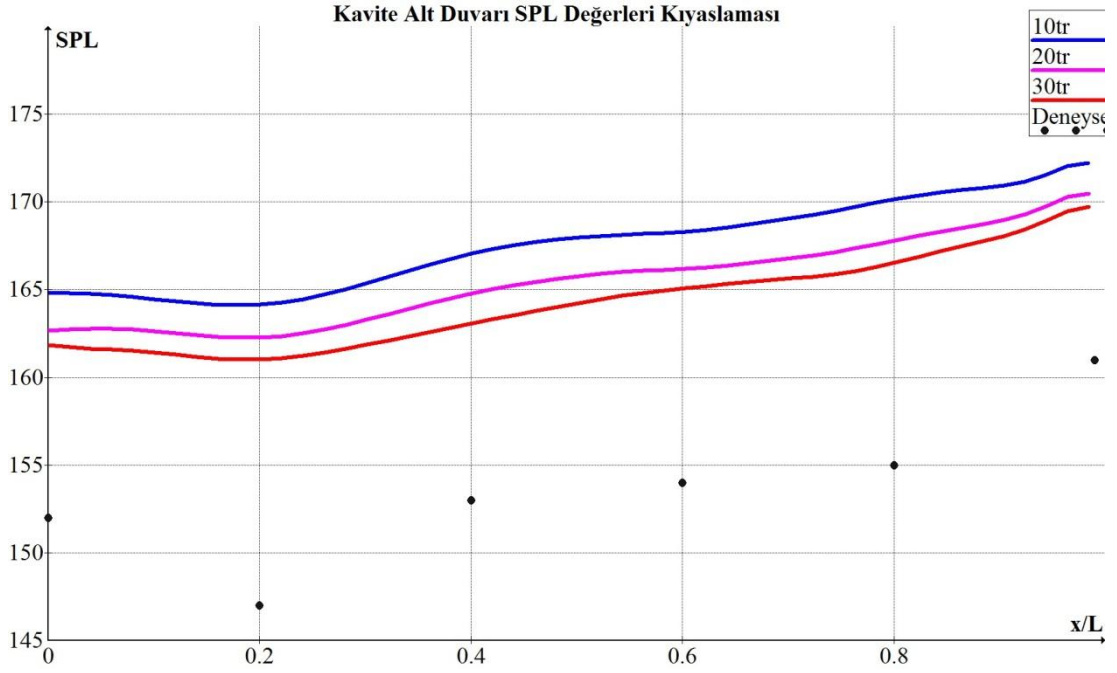
Şekil 5.1. Ağ yapısının 3D ve 2D görünüşleri

## 5.2. Sayısal Parametrelerin Akış Üzerine Etkileri

Sayısal analiz sonuçlarının fiziksel olduğundan emin olmak için akış üzerine etkisi olan nümerik parametreler üzerine çalışılmalıdır. Bu kapsamda gerçekleştirilen ağ yapısı, zaman adımı ve türbülans modeli çalışmaları bölüm 3'te anlatılmıştır. Bu bölümde DES ve RANS yöntemlerinin ve zamanda yakınsamanın akış üzerine olan etkilerinden bahsedilecektir.

### 5.2.1. Simülasyon Süresinin Yakınsama Üzerine Etkisi

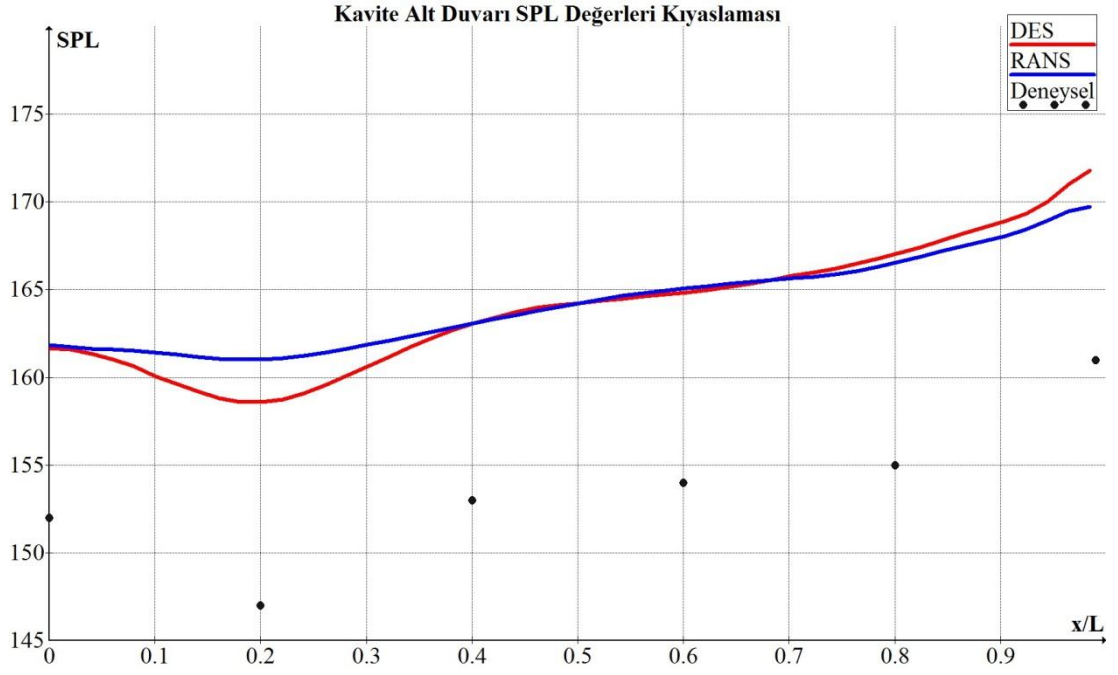
Üç boyutlu çalışmalar 30 Rossiter periyodu için gerçekleştirilmiştir. SPL- konum grafiği  $0 < t < 10t_r$ ,  $0 < t < 20t_r$ ,  $0 < t < 30t_r$  için Şekil 5.2'de verildiği gibi çizdirilmiştir. Simülasyon süresi uzadıkça deneysel değerlere daha yakın sonuçlar elde edilmiştir. İlk iki aralıkta fark % 2.1 mertebesinde iken ikinci ve üçüncü aralık için bu fark % 1.2 seviyelerine düşmüştür. Bu doğrultuda on Rossiter periyodu sonrasında yakınsamanın sağlandığı varsayılmıştır; ancak daha uzun süreli analizlerin deneysel değerlere daha yakın sonuç verme olasılığı vardır.



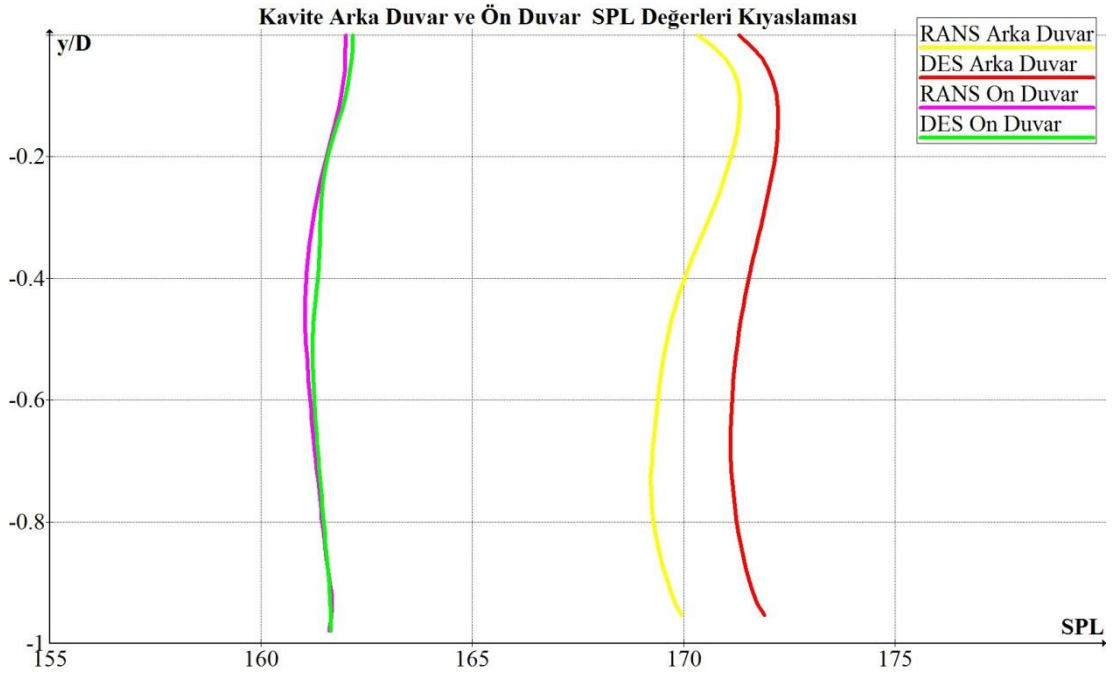
Şekil 5.2. Kavite Alt Duvarı SPL Seviyeleri Kıyaslaması

### 5.2.2. Türbülans Modellerinin Akış Üzerine Etkileri

Üç boyutlu simülasyonlar için DES ve RANS çözümleri yapılmıştır. DES, zamana bağlı değişen RANS ve LES yöntemlerinin birleşimi ile elde edilen LES kadar maliyetli olmayan bir yöntemdir. RANS yöntemi ise DES yöntemine göre daha düşük maliyetli bir metottur. Bölüm 1’de verildiği üzere literatürde her iki yöntem ile de yapılan çalışmalar mevcuttur ve her iki yöntem ile de süpersonik kavite akış fiziği yakalanabilmektedir. Bölüm 2’de bu yöntemlerin matematiksel modellemeleri anlatılmıştır. Şekil 5.3 ve 5.4’de sayısal çalışma sonuçları deneysel çalışma sonuçları ile SPL cinsinden kıyaslanmıştır.



Şekil 5.3. Kavite alt duvarı SPL seviyeleri kıyaslaması



Şekil 5.4. Kavite ön ve arka duvarı SPL seviyeleri kıyaslaması

Her iki yöntem ile de en yüksek SPL seviyeleri kavite alt duvarında, en düşük SPL seviyeleri kavite ön duvarında ölçümlenmiştir. Kavite alt duvarında iki model çözümü arasındaki en büyük fark % 2 civarındadır. Bölüm 2’de anlatıldığı üzere DES yönteminde LES ve RANS metodu çözümü bölgeleri, ağ yapısına ve geometriye bağlıdır, büyük ağ yapısı hücrelerinin daha yoğun olması daha fazla RANS çözümü bölgesi demektir. Bu çalışmada kullanılan ağ yapısı ile LES çözümü muhtemel olarak çok az bir bölgede etkili olmakta ve çözüm yoğun olarak RANS yöntemi ile gerçekleşmektedir. Dolayısıyla RANS ve DES yöntemleri büyük oranda benzer sonuçlar vermektedir.

Basınç- zaman verilerinin hızlı Fourier dönüşümüne tabi tutulması ile güç-frekans grafiği elde edilmiştir. Her iki yöntem ile de ilk üç mod için frekans değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. İlk mod tahmininde iki metot ve Rossiter formülasyonu arasında ciddi miktarda sapmalar gözlemlenmektedir. DES metodu ilk mod tahmininde yetersiz kalmıştır. İkinci ve üçüncü mod için sayısal tahminler Rossiter formülasyonu ile daha tutarlı sonuçlar vermektedir. Ayrıca ikinci ve üçüncü modlarda DES ve RANS yöntemleri de birbirlerine benzer frekans seviyeleri yakalamaktadır.

Çizelge 5.1. İlk üç Mod için frekans değerleri

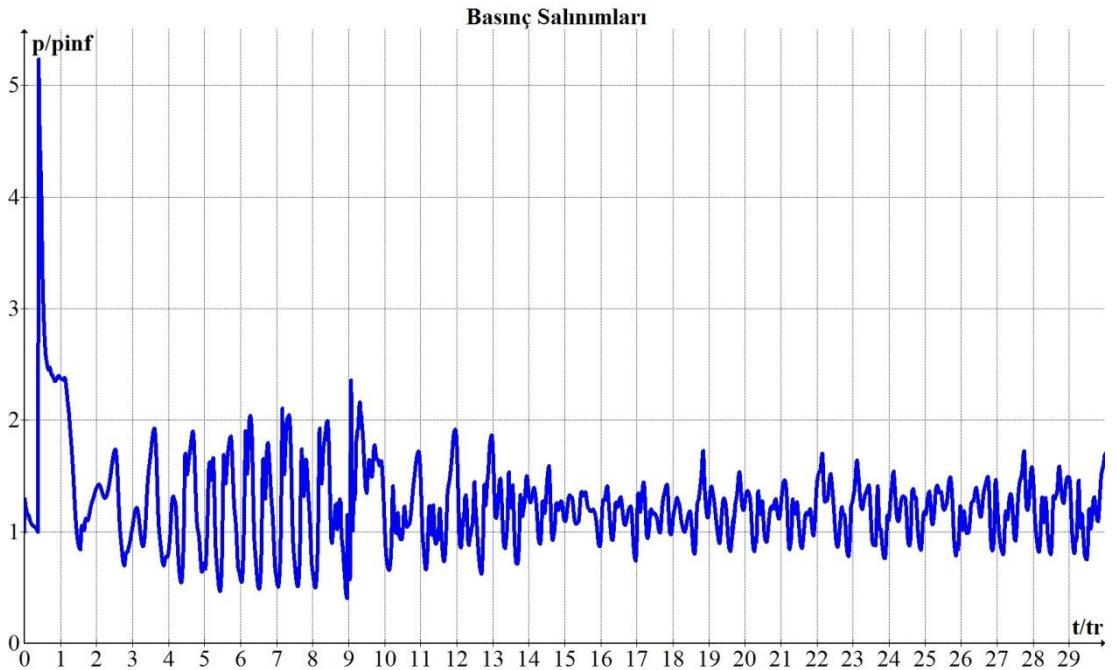
	<b>Frekans Modları</b>	<b>Sayısal Değerler (Hz)</b>	<b>Gelşt. Rossiter Form.(k=0.55 &amp; <math>\alpha=0.25</math>) (Hz)</b>	<b>Rossiter Form. (Hz)</b>	<b>Fark (%) (Gelşt. Rossiter Form. ve Sayısal St değerleri)</b>	<b>Fark (%) (Rossiter Form. ve Sayısal St değerleri)</b>
<b>RANS</b>	$f_1$	1094.0	900.8	1109.1	21.5	1.4
<b>RANS</b>	$f_2$	2105.3	2102.0	2218.0	0.16	5.1
<b>RANS</b>	$f_3$	3158.1	3303.1	3327.0	4.4	5.1
<b>DES</b>	$f_1$	821.7	900.8	1109.1	8.8	26.0
<b>DES</b>	$f_2$	2071.5	2102.0	2218.0	1.5	6.6
<b>DES</b>	$f_3$	3393.0	3303.1	3327.0	2.7	2.0



### 5.3. Üç Boyutlu Akış Yapısı

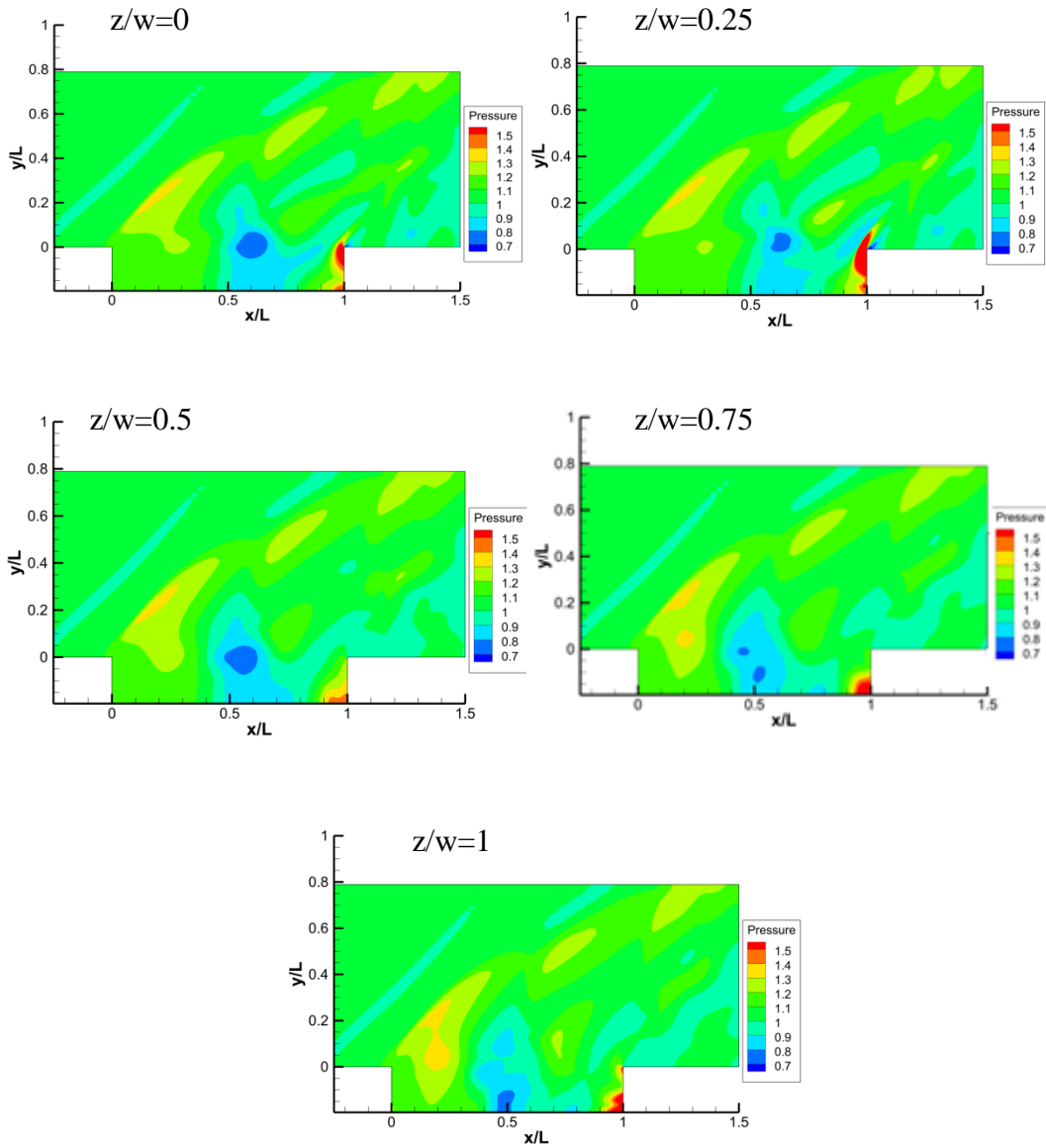
Üç boyutlu akışın irdelenmesi için akış konturları çizdirilmiş, deneysel çalışma ile kıyaslama yapabilmek amacı ile SPL-konum ve  $C_p$ -konum grafikleri hazırlanmıştır. Akıştaki oluşumların anlaşılabilmesi amacı ile güç spektrumları ve basınç dağılımları irdelenmiştir. Üç boyutlu çalışma sonuçları 30 Rossiter periyodu için elde edilmiştir.

Şekil 5.5’de verilen basınç zaman grafiği incelendiğinde ortalama basınç değerlerinin serbest basınç değerinin en fazla 2.3 katına kadar çıktığı gözlemlenmektedir. Akışın belirli bir periyotta salınım yapmadığı ve farklı zaman dilimlerinde farklı periyodik hareketlere sahip olduğu görülmektedir. Şekil 5.6’da  $p/p_{inf}$  konturları,  $t=0.0121$  anı için farklı genişlik düzlemlerinde verilmiştir. Bu konturlara göre kavite genişliğine bağlı olarak basınç değerlerinde değişimler olmaktadır. Özellikle kavite arka duvarında basınç değerleri genişliğe bağlı olarak değişmektedir. Bu durum ise akışı üç boyutlu ve düzensiz hale getirmektedir.

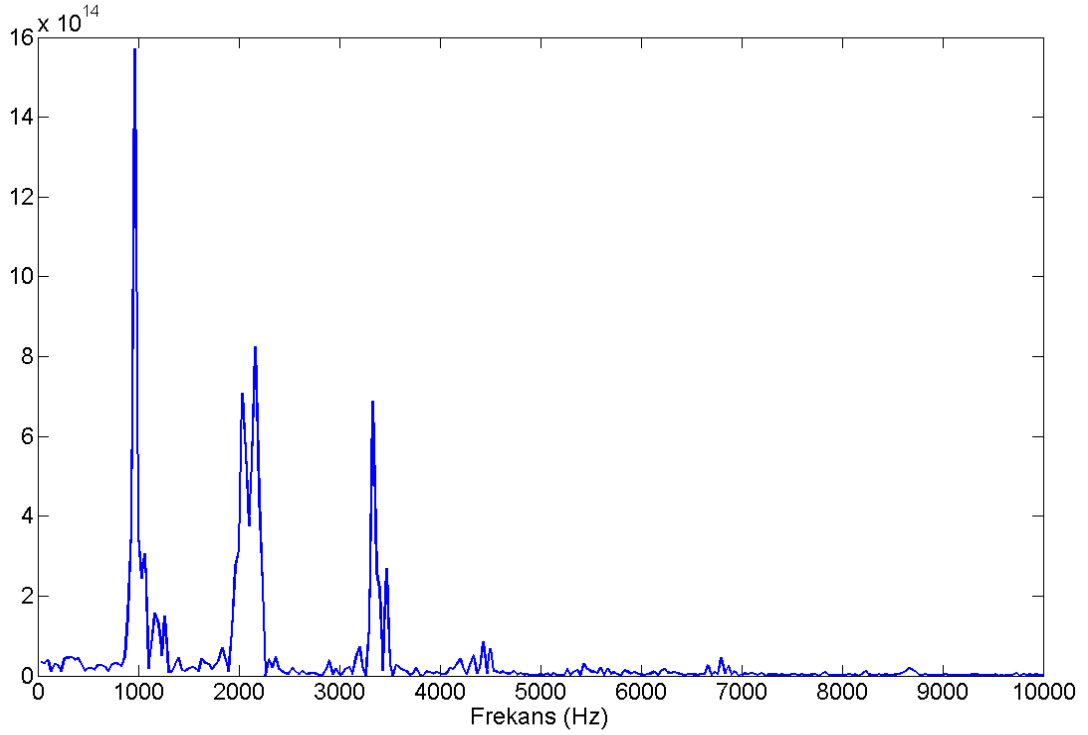


Şekil 5.5. Basınç- zaman grafiği (merkez düzlemden  $y/D=0.6$  konumundan alınan veriler kullanılmıştır)

Basınç verilerinin kullanılması ile elde edilen güç spektrumu Şekil 5.7'de verilmektedir. İlk mod ve ikinci mod için tepe değerleri sırası ile 1094 Hz ve 2105 Hz değerindedir. Gücün önemli bir kısmı birinci moda toplanmaktadır. Bu durumda akışın tek moda sahip olduğunun göstergesidir. Birinci ve ikinci mod değerleri Rossiter formülasyonundan sırası ile %1.3, % 5.1 fark etmektedir. İkinci ve üçüncü modun genlik değerlerinin fazla olmasının sebebi olarak akışın farklı zaman dilimlerinde farklı periyodik hareketlerden oluşması verilebilir.



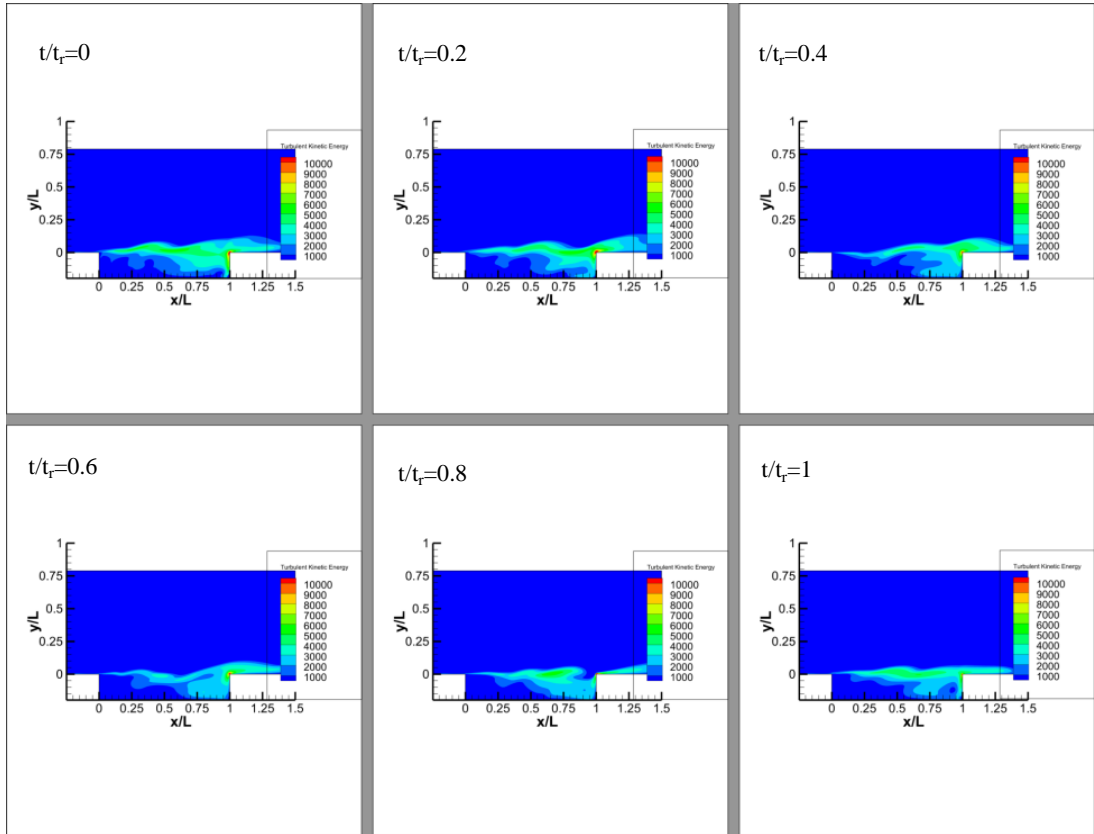
Şekil 5.6.  $t=0.0121$  anı için  $p/p_\infty$  konturları



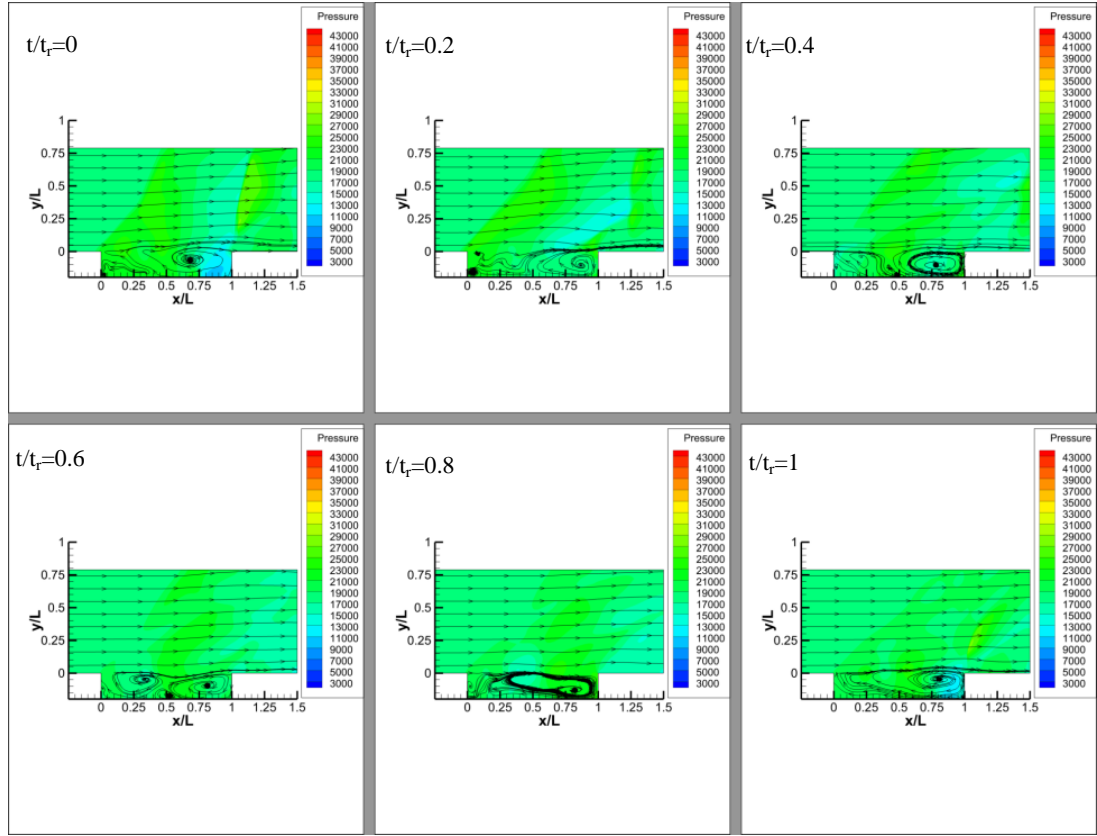
Şekil 5.7. Güç-frekans grafikleri (merkez düzlemden  $y/D=0.6$  konumundan alınan veriler kullanılmıştır)

Şekil 5.8-5.10 arası merkez düzlemden alınan ( $z/w=0.5$ ) kinetik enerji, basınç ve hız konturları verilmiştir. Bu konturlar bir Rossiter periyodu için çizdirilmiştir. Şekil 5.8'de verilen kinetik enerji konturlarında kavite bölgesi ve dış bölge arasındaki farklı hız, basınç ve yoğunluk değerleri nedeni ile oluşan ara yüzey net bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu ara yüzey üzerinde girdap oluşumlarından bahsetmek mümkündür. Kesme tabakası adı verilen bu ara yüzeyde Kelvin- Helmholtz kararsız yapısı vardır.  $t/t_r=0.2$  anında kavite arka kenar köşesinde kavite bölgesinde enerji artışı belirgin şekilde göze çarpmaktadır (Şekil 5.8). Hız konturları da dikkate alındığında bu zaman anında kavite arka köşesinde kesme tabakası içeri doğru bükülmekte ve kavite bölgesine enerji girişi olmaktadır (Şekil 5.10). Şekil 5.10'da gözlemlendiği üzere  $t/t_r=0.2$  anında kaviteye giren kütle  $t/t_r=0.4$  anında daha belirgin hale gelmiş ve kavite boyunca ilerlemeye başlamıştır. Kavite boyunca ilerleyen bu girdap yapısı  $t/t_r=0.8$  anında ise kavitenin büyük kısmını kaplamış durumdadır.

Bu kütle, kavite çıkış köşesinde oluşmuş ve öne doğru ilerleyen yeni kütle tarafından sıkıştırılmakta ve kavite giriş köşesinde kesme tabakasının dışa doğru bükülmesi ile kavite dışına atılmaktadır. Kütle kavite dışına atılmasına bağlı olarak kinetik enerji konturlarında gözlemlendiği üzere (Şekil 5.8) kavite giriş köşesi üzerinde enerji artışı olmaktadır. Kavite bölgesine giren ve kavite bölgesinden çıkan kütle farklı enerjilere sahip olma nedeni olarak giren kütle kavite bölgesinde ilerlerken yitimli süreçler tarafından yavaşlatılması ve giren kütle kavite dışına atılmaması olduğu düşünülmektedir. Kavite dışına atılmayan kütle ise yeni bir girdap yapısı oluşturmaktadır. Bu mekanizma basınç salınımları da dikkate alındığında kendi kendini sürekli olarak tekrar etmektedir.

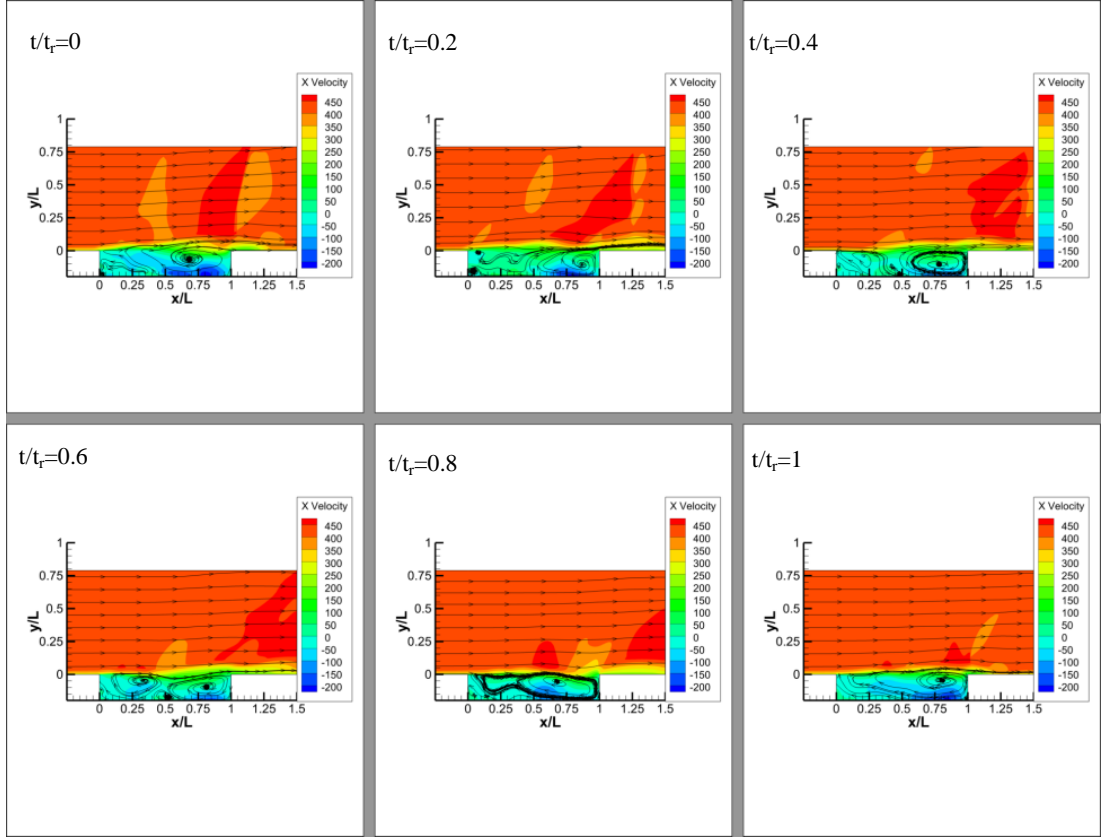


Şekil 5.8. Üç boyutlu akış için kinetik enerji konturları



Şekil 5.9. Üç boyutlu çalışma için basınç konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri

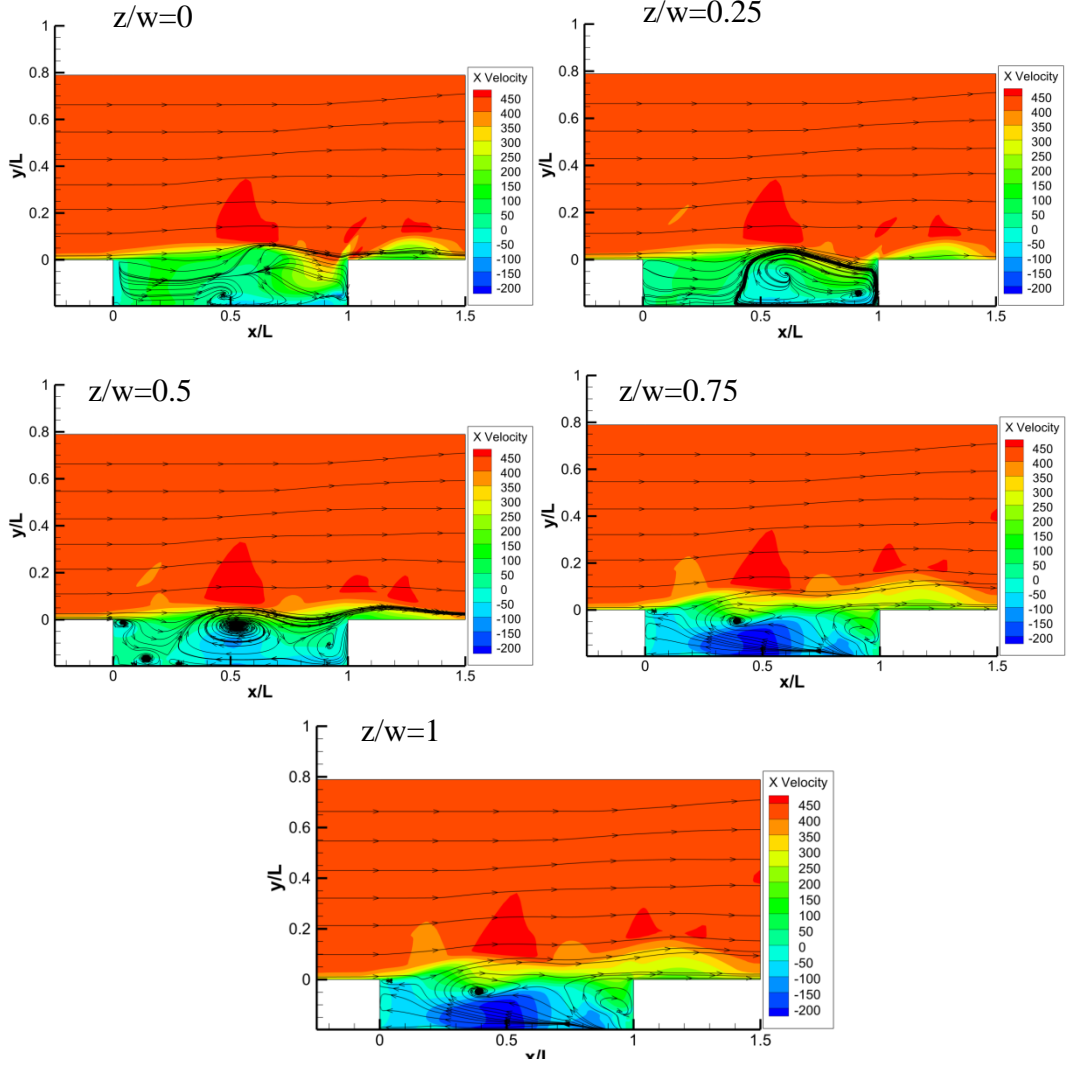
Şekil 5.10'da kesme tabakasının kavite arka köşesi ile etkileşiminin şok oluşumuna neden olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'de verilen SPL-konum grafikleri de dikkate alındığında kavite arka duvar köşesinde kesme tabakasının kavite köşesine çarpması ve kavite bölgesine kütle girişine bağlı olarak SPL seviyelerinde yükselme göze çarpmaktadır. Kavite ön duvarında en düşük SPL seviyelerinin ölçülmesi nedeni bu duvarda meydana gelen etkileşimlerin arka duvar ve alt duvara göre daha az olması ve ön duvar yakınında kavite dışına kütle atılması olarak tahmin edilmektedir.



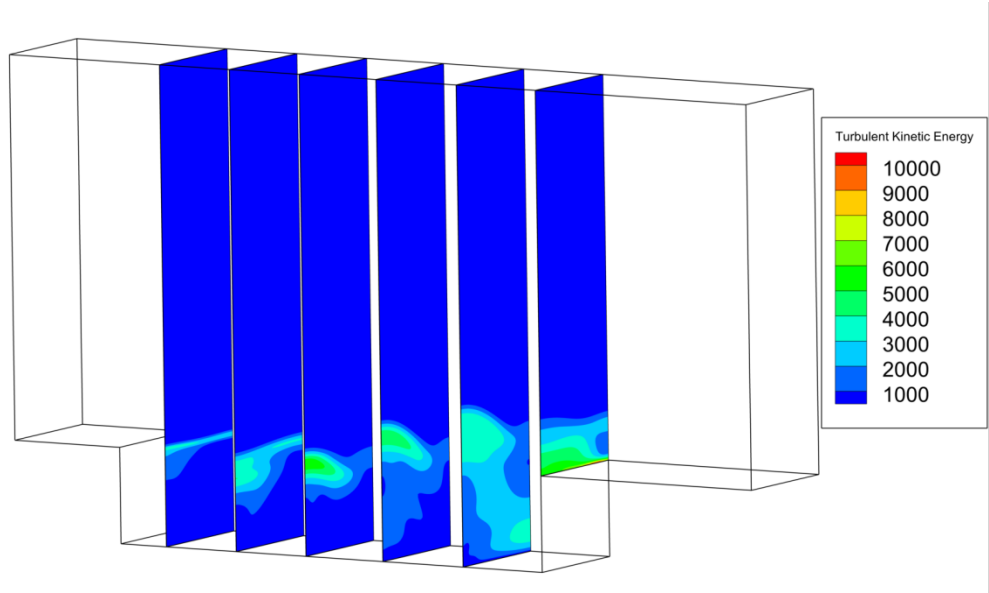
Şekil 5.10. Üç boyutlu çalışma için hız konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri

Üç boyutlu olan kavite akışının doğasının anlaşılması ve üçüncü boyutun akış üzerinde ne gibi değişikliklere neden olduğunun anlaşılması amacı ile farklı düzlemlerde (farklı  $z/w$  değerlerinde) hız konturları ve basınç cinsinden akış şeritleri çizdirilmiştir. Şekil 5.11’de verilen hız konturları incelendiğinde orta düzlemde (merkez düzlemde) oluşan girdap sayısı diğer düzlemlerden daha fazladır. Diğer düzlemlerde ise  $z/w=0.5$  düzleminde var olan küçük girdaplar yok olmuştur. Bu durumda  $z$  eksenindeki akışın, akışı basitleştirdiği, bazı oluşumların yok olmasına neden olduğu söylenebilir. Dolayısıyla üç boyutlu kavite akışının tek bir düzlemde inceleme yaptığımız iki boyutlu akışlara göre daha basit yapılar içermesi, daha düşük SPL seviyeleri ölçülmesi beklenmektedir. Ayrıca oluşan birincil girdabın farklı düzlemlerde farklı boyutlarda olduğu göze çarpmaktadır. Bu durumda girdapların genişliğe bağlı olarak da değişim göstermektedir. Akışa dik doğrultuda ki kinetik enerji konturları şekil 5.12’de verilmiştir. Bu konturlara göre kesme tabakası

hareketlenmeleri ve bu tabaka üzerindeki enerji miktarları akışa dik doğrultuda da değişim göstermektedir. Şekil 5.11 ve 5.12 göz önüne alındığında bu akışın düzensiz ve üç boyutlu olduğu rahatlıkla söylenebilir.



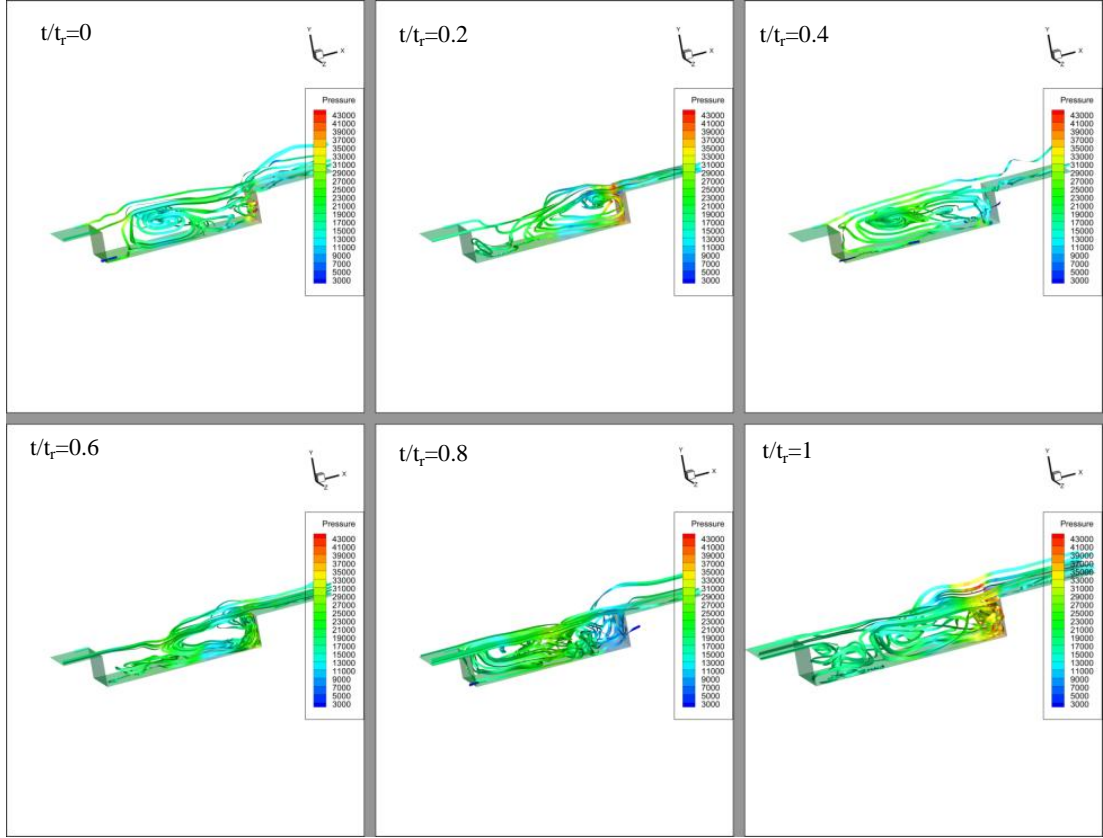
Şekil 5.11.  $t=0.0121$  anı için hız konturları üzerine çizdirilmiş akım çizgileri



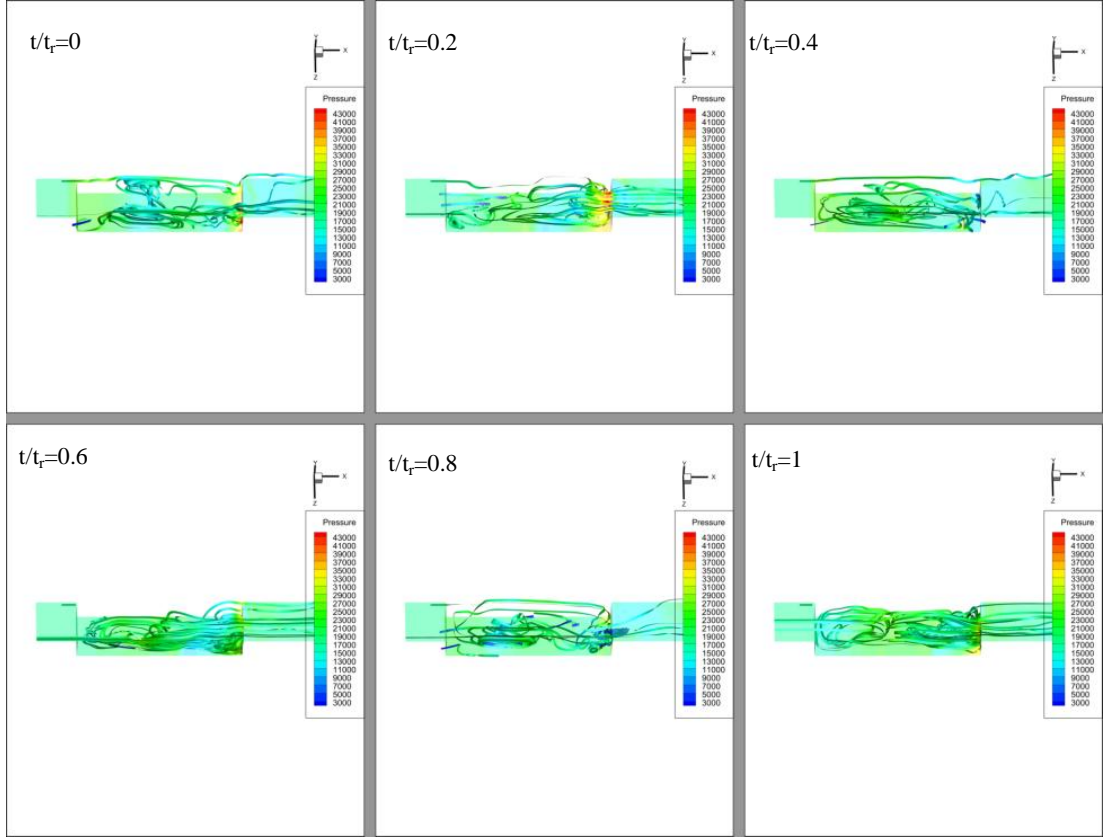
Şekil 5.12.  $t=0.0123$  anı için akışa dik yöndeki kinetik enerji konturları

Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’de verilen akış şeritleri irdelendiğinde zamana bağlı olarak boyutunda değişimler olan birincil girdabın akışa dik yönde değişim göstermediği söylenebilir. Kavite de oluşan birincil girdap ile kavite köşesinde oluşan köşe girdabının birbirleri ile etkileşimi sonucu iki girdap arasında yeni bir yapılanma meydana gelmektedir; ancak bu oluşum akış yönünde gelişebilecek alana sahip olmadığından akışa dik doğrultuda gelişmektedir. Bu oluşum Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’de  $t/t_r=0.2$  anında gözlenmektedir. Bu oluşan yeni girdap yapısı kavite genişliğinin tamamını kapsamamakta, kavite ortasında oluşmakta ve genişliğe bağlı olarak yok olmaktadır. Akışa eklenen z eksenindeki bu yeni yapılanmalar ise akışın periyodikliğini bozmaktadır. Tüm kavite genişliği için kavite arka duvarında basınç artışı ( $t/t_r=1$  anında) gözlemlenmektedir. Şekil 5.13’e göre beklendiği üzere girdap yapıları içerisinde farklı basınç değerleri oluşmaktadır. Akışa dik yönde oluşan yapılanmalar tüm kavite genişliğini kaplayamamakta ve kaybolmaktadır. Dolayısıyla üçüncü boyutun akışı basitleştirdiği ve iki boyuttaki karmaşık oluşumların bir kısmını söndürdüğü söylenebilir.





Şekil 5.13. Basınç konturu üzerine çizdirilmiş akış şeritlerinin önden görünüşü



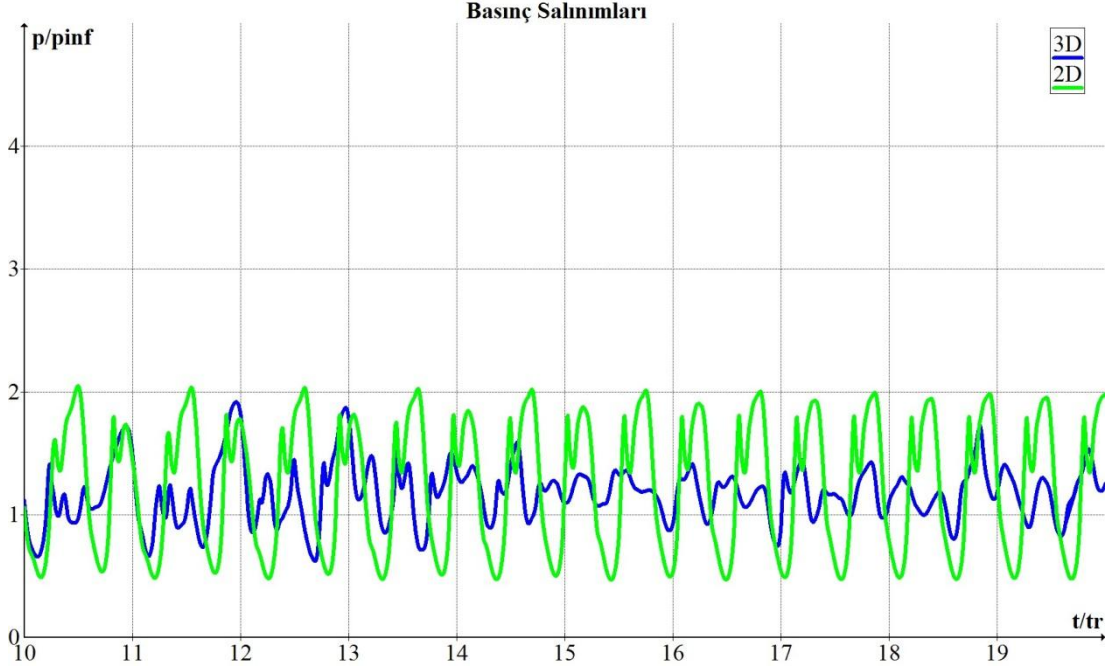
Şekil 5.14. Basınç konturu üzerine çizdirilmiş akış şeritlerinin üstten görünüşü

#### 5.4. İki Boyutlu ve Üç Boyutlu Simülasyon Sonuçlarının Kıyaslanması

İki boyutlu ve üç boyutlu simülasyonların kıyaslanması 10.ve 20 Rossiter periyodları arasında gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu çalışmanın merkez düzleminde alınan konturlar ile iki boyutlu çalışma konturları akış yapısının kıyaslanması için kullanılmıştır. Basınç- zaman grafikleri ve frekans-güç spektrumu her iki durum içinde irdelenmiştir. SPL- konum ve  $C_p$ -konum grafikleri, deneysel çalışma ile iki ve üç boyutlu sayısal çalışmanın irdelenmesi için kullanılmıştır.

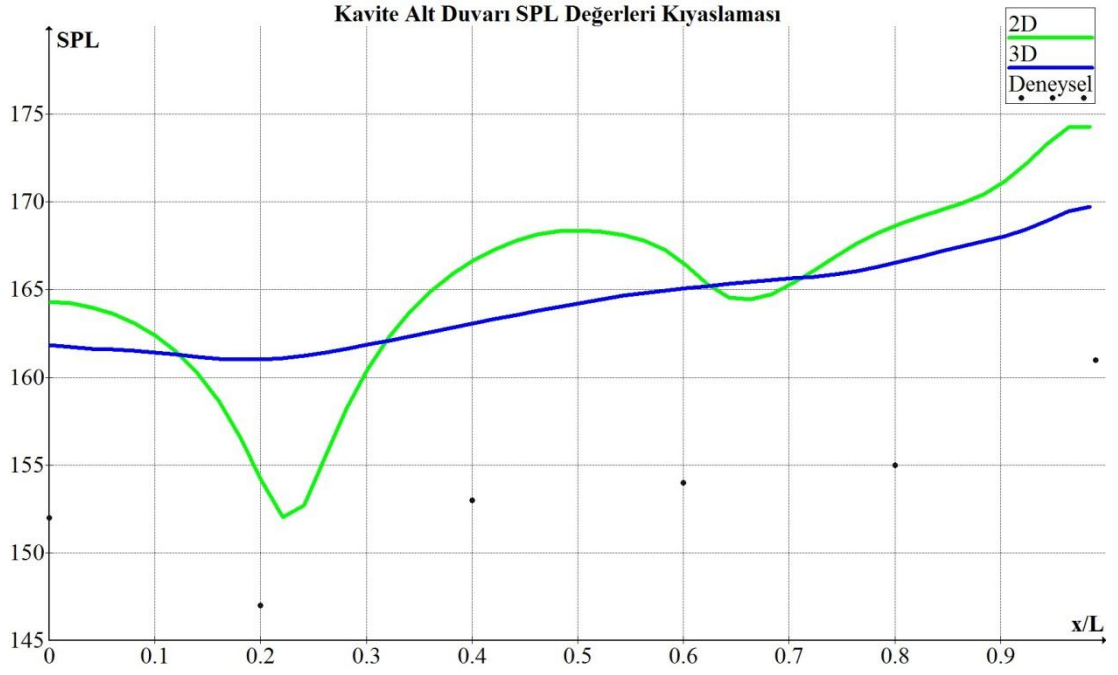
Her iki durum için de basınç-zaman grafiği Şekil 5.15’de verilmiştir. Bu grafiğe göre iki boyutlu çalışmada salınımlar serbest basınç değerinin 2 katına kadar ulaşırken üç boyutlu çalışmada salınımlar serbest basınç değerinin 1.5 katına kadar çıkmaktadır.

İki boyutlu çalışma üç boyutlu çalışmaya göre daha periyodik basınç salınımlarına sahiptir. Üç boyutlu salınımlarda periyod değişimi göze çarpmaktadır.

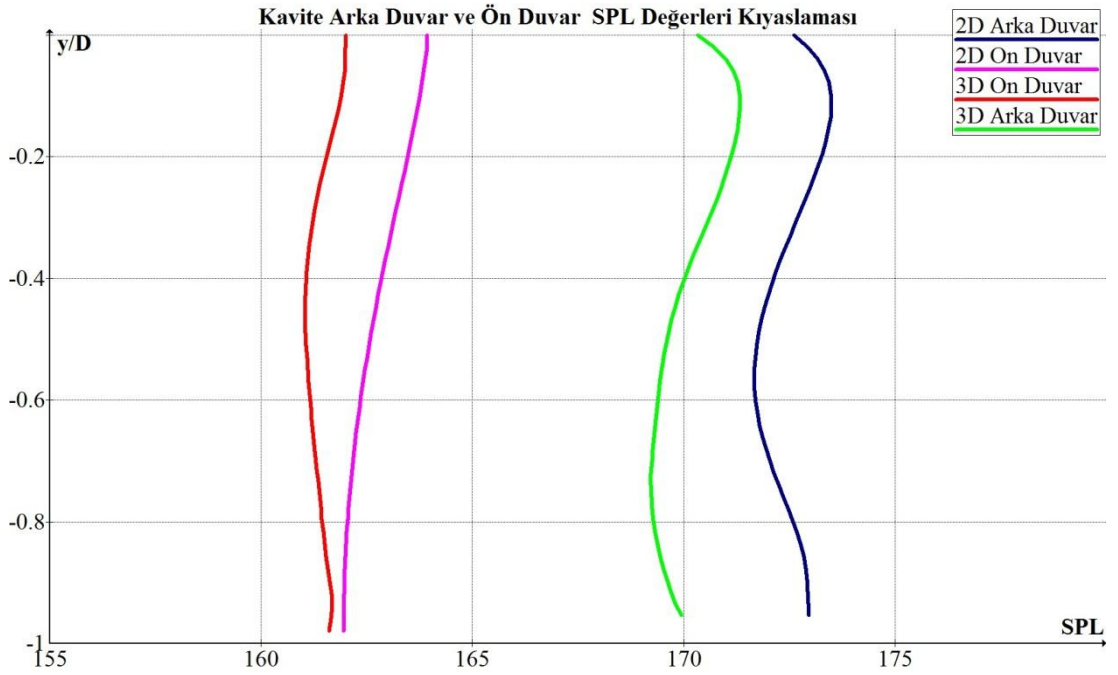


Şekil 5.15. Basınç salınımları kıyaslaması ( $y/D=0.6$  konumundan alınan veriler kullanılmıştır)

Basınç salınımları arası bu fark SPL konum grafiklerinde de gözlemlenebilmektedir (Şekil 5.16, 5.17). İki boyutlu çalışmada daha yüksek SPL değerleri ölçümlenmekte iken üç boyutlu çalışmada deneysel değerlere daha yakın olan daha düşük SPL değerleri ölçümlenmiştir. Her iki çalışmada da en düşük SPL değerleri kavite ön duvarında gözlemlenirken, en yüksek SPL değerleri kavite arka duvarındadır. Kesme tabakası duvar etkileşimi sonucu SPL seviyelerinde meydana gelen artış her iki çalışmada da gözlemlenmiştir; ancak bu artış iki boyutlu çalışmada daha keskin olarak gözlemlenmektedir. Üç boyutlu simülasyonlarda daha düşük basınç salınım genliklerinin ve SPL seviyelerinin ölçümlenmesinin sebebi üç boyut etkilerinin kesme tabakası oluşumlarını zayıflattığı varsayımına dayanmaktadır.

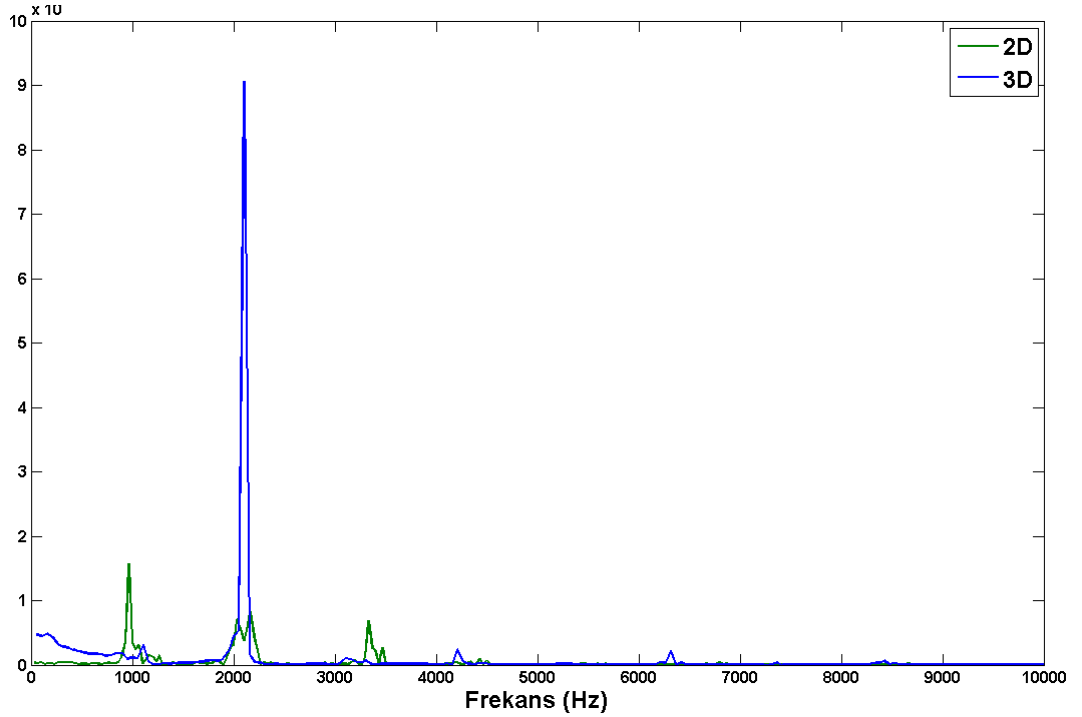


Şekil 5.16. Kavite alt duvarı için SPL kıyaslaması



Şekil 5.17. Kavite ön ve arka duvarı için SPL kıyaslaması

Basınç zaman verileri kullanılarak elde edilen güç-frekans grafiği Şekil 5.18'de verilmiştir. İlk üç mod için frekans değerlerinin Rossiter formulasyonu frekans değerleri ile karşılaştırılması iki ve üç boyutlu analizlerin frekans değerlerinin kıyaslanması için Çizelge 5.2 hazırlanmıştır. İki boyutlu ve üç boyutlu çalışma arasındaki temel fark dominant frekans değeri üç boyutlu analizlerde 1094 Hz civarında iken iki boyutlu simülasyonlarda 2106 Hz civarında olmasıdır. İki boyutlu çalışmada akış çoklu modlara sahip iken üç boyutlu çalışmada tek moda sahiptir. Çoklu modlu sistemlerin daha karmaşık yapılar içerdiği varsayımına dayanarak kesme tabakası oluşumlarının iki boyutlu çalışmada daha güçlü olduğu, üç boyutlu çalışmada ise üçüncü boyut etkisi ile birlikte bu yapıların zayıfladığı ve dolayısıyla akışın tek moda sahip daha basit bir akış haline geldiği düşünülmektedir. Üç boyutlu analizler Rossiter formulasyonundan birinci ve ikinci mod için sırasıyla %1.4 ve %5.1 miktarında değişiklik göstermektedir.

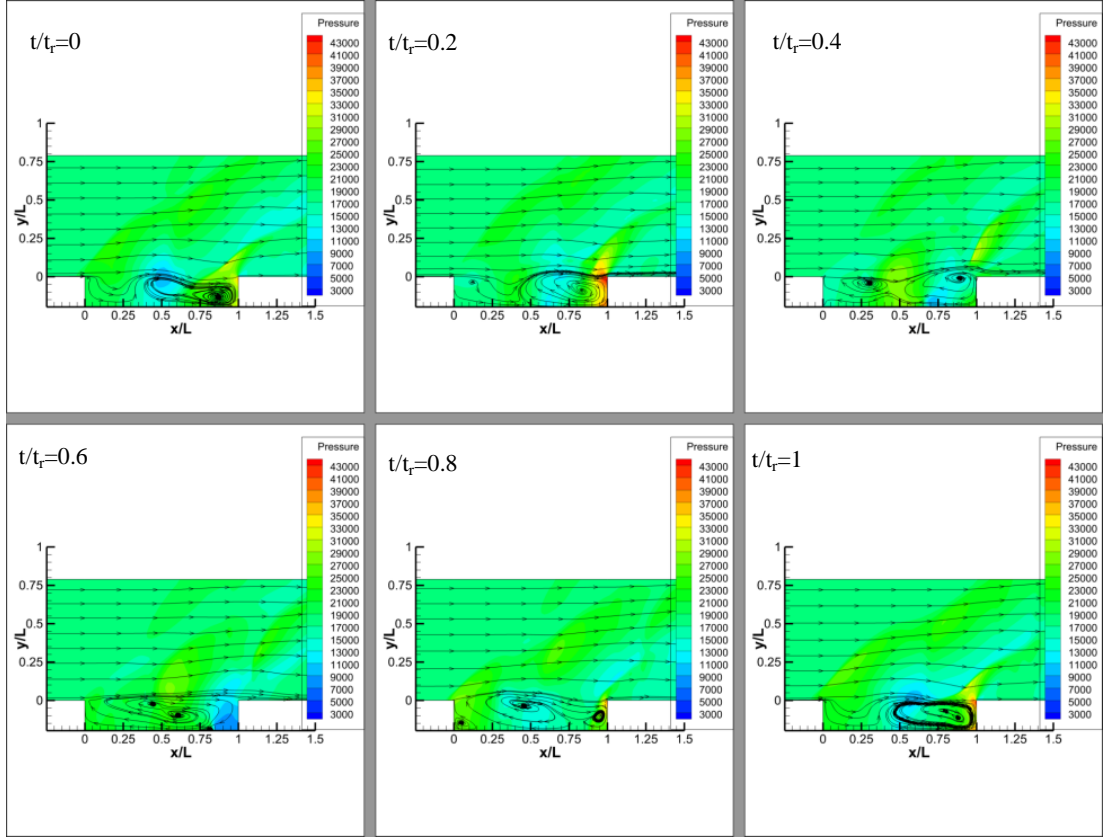


Şekil 5.18. Güç-frekans grafiği ( $y/D=0.6$  konumundan alınan veriler kullanılmıştır)

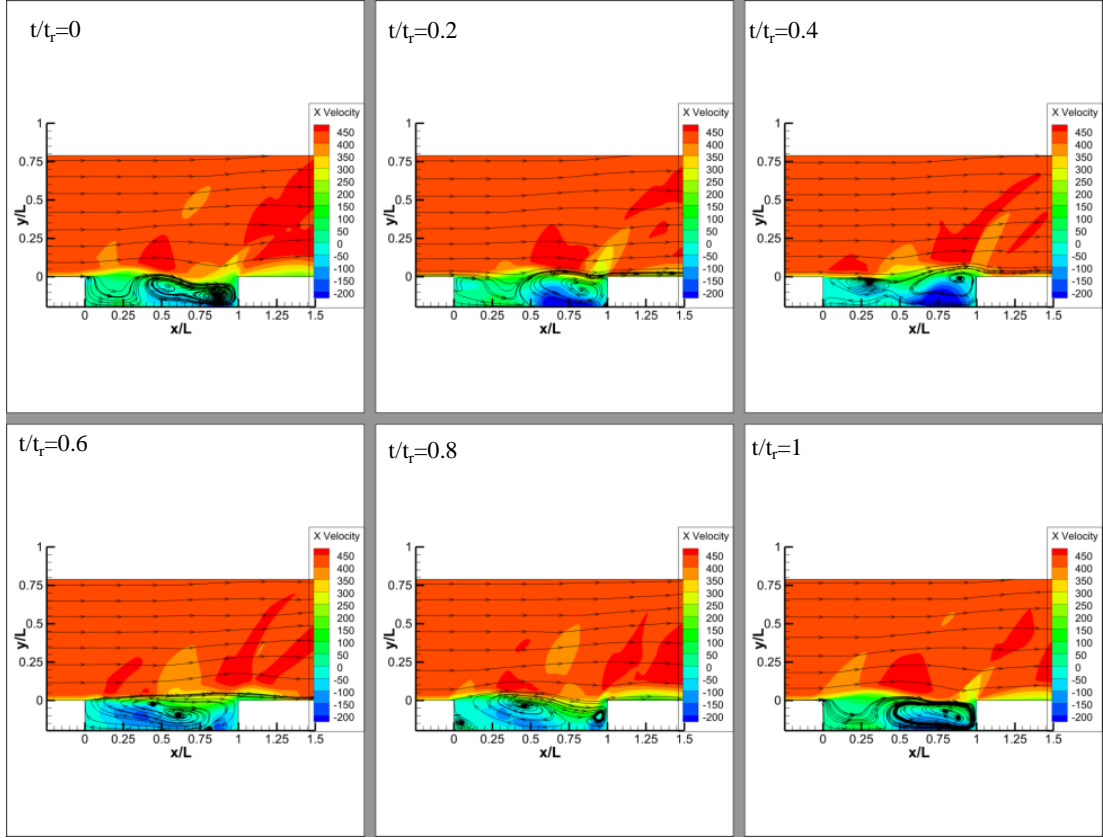
Çizelge 5.2. İlk üç mod için frekans değerleri

	Frekans Modları	Sayısal Değerler (Hz)	Gelşt. Rossiter Form.( $k=0.55$ & $\alpha=0.25$ ) (Hz)	Rossiter Form. (Hz)	Fark (%) (Gelşt. Rossiter Form. ve Sayısal St değerleri)	Fark (%) (Rossiter Form. ve Sayısal St değerleri)
<b>3D</b>	$f_1$	1094.01094	900.8	1109.1	21.5	1.4
<b>3D</b>	$f_2$	2105.3	2102.0	2218.0	0.16	5.1
<b>3D</b>	$f_3$	3158.1	3303.1	3327.0	4.4	5.1
<b>2D</b>	$f_1$	1037.0	900.8	1109.1	15.0	6.5
<b>2D</b>	$f_2$	2106.0	2102.0	2218.0	0.19	5.0
<b>2D</b>	$f_3$	3160.0	3303.1	3327.0	4.5	5.0

Akışın doğasını anlayabilmek, iki boyutlu ve üç boyutlu çalışma arası kıyaslama yapabilmek için Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de verilen akım çizgileri çizdirilmiştir. Bu konturlara göre iki boyutlu çalışmada kavite arka duvarında basınç artışları ( $t/t_r=0.2$ ) ve basınç düşüşleri ( $t/t_r=0.6$ ) üç boyutlu çalışmaya oranla daha fazladır (Şekil 5.9, Şekil 5.18). Akışın çoklu modlara sahip olduğu durum olan iki boyutlu akışta kesme tabakası hareketlerini etkileyen küçük ölçekte farklı oluşumlardan söz edilebilir. Bu küçük ölçekli türbülanslı yapıların akışın üzerinde baskın etkiye sahip olması ise akışı çoklu modlara sahip daha zor bir akış haline getirmektedir. Bu doğrultuda konturlar incelendiğinde iki boyutlu çalışmada ( $t/t_r=0.8$ ) kavite köşelerinde küçük ölçekte girdap oluşumları vardır ve kesme tabakası hareketlenmeleri iki boyutlu çalışmada daha net gözlemlenmektedir (Şekil 5.19). Birincil girdabın oluşum yerleri iki çalışma için de çok benzerdir, bunun sebebi olarak frekans modlarının uyumlu olması verilebilir.



Şekil 5.19. İki boyutlu çalışma için basınç konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri



Şekil 5.20. İki boyutlu çalışma için hız konturu üzerine çizdirilmiş akım çizgileri

## Tartışma

Bu bölümde akış fiziğinin ve yapısının anlaşılması amacı ile üç boyutlu kavite akışı simülasyon sonuçları irdelenmiştir ayrıca iki boyutlu ve üç boyutlu simülasyon sonuçları kıyaslanmıştır. Bu çalışmalara göre süpersonik kavite akışı probleminde üç boyut etkileri ihmal edilmemelidir, bu durum literatürdeki çalışmalarda da bu şekilde gözlemlenmiştir [16, 69, 70]. Akışa dik doğrultuda meydana gelen oluşumlar akışı basitleştirmekte, girdaplar bu doğrultu üzerinde kaybolmaktadır. Dolayısıyla üç boyutlu simülasyonlarda basınç salınımları genlikleri düşmektedir. İki boyutlu basınç salınımlarından farklı olarak akış periyodikliğini kaybetmektedir. Bunun nedeni ise üçüncü boyuttan kaynaklanmaktadır. Güç spektrumunun iki ve üç boyutlu çalışmalarda benzer sonuç verdiği gözlemlenmiştir. SPL seviyeleri üç boyutlu çalışmada iki boyutlu çalışmaya göre daha düşük ölçümlenmiştir. Sonuç olarak iki



boyutlu çalışmalar akışın yönündeki oluşumlar ile ilgili bilgi vermekte, güç spektrumu tahminini deneysel ve Rossiter formulasyonu ile uyumlu bir şekilde yapmaktadır; ancak  boyutlu çalışmalar yapılmadan akışın gerçek fiziğinin anlaşılması mümkün değildir.

## 6. SONUÇLAR VE YORUMLAR

### 6.1. Sonuçların Yorumlanması

Bu çalışmada, süpersonik kavite akışı sayısal olarak incelenmiştir. Kaufman v.d'nin [14] aynı parametreler ile gerçekleştirilen deneysel çalışması ile iki boyutlu ve üç boyutlu akış analizleri kıyaslanmıştır. İlk olarak analiz sonuçlarının fiziksel olduğundan emin olmak amacı ile sayısal parametrelerin akış çözümlemesi üzerine etkileri incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda zaman adımı büyüklüğü ve türbülans modeli etkileri incelenmiş, ağ yapısı çalışması gerçekleştirilmiştir.

Sayısal parametrelerin belirlenmesinin ardından iki boyutlu akış simülasyonları irdelenmiş, deneysel sonuçlarla ve aynı parametreler ile gerçekleştirilen iki farklı iki boyutlu sayısal çalışma ile kıyaslanmıştır. Üç boyutlu akış simülasyonlarının gerçekleştirilmesinin ardından iki boyutlu ve üç boyutlu analiz sonuçları kıyaslanmış, üç boyut etkileri araştırılmıştır. Ayrıca kavite uzunluk/genişlik oranının değişiminin akış fiziği üzerine olan etkileri irdelenmiştir.

Altı farklı ağ yapısı ile ağ yapısı çalışması gerçekleştirilmiştir. Kavite akışının en önemli yapısı olan kesme tabakası oluşumunun gözlemlenebilmesi için y yönünde yapılan iyileştirmenin esas olduğu tespit edilmiştir. İki farklı zaman adımı ile analizler gerçekleştirilmiş,  $10^{-5}$  s zaman adımı büyüklüğü ile akış özelliklerinin yakalanamadığı,  $10^{-6}$  s zaman adımı büyüklüğü ile kavite akışının karakteristik özelliklerinden olan basınç salınımlarının olduğu gözlemlenmiştir. k- $\epsilon$  ve k- $\omega$  modelleri ile gerçekleştirilen iki boyutlu kavite analizleri sonuçlarına göre k- $\omega$  modeli akış fiziğini daha iyi yakalamıştır. Birinci mod değeri Rossiter formülasyonundan k- $\epsilon$  modelinde % 9.8 ve k- $\omega$  modelinde % 6.5 fark ile tahmin edilmiştir.

İki boyutlu akış analizleri  $10^{-6}$  s zaman adımı büyüklüğü için, k- $\omega$  türbülans modeli ile 20 Rossiter periyodu için gerçekleştirilmiştir. Kavite bölgesinde kavite arka duvarı-kesme tabakası, girdap-girdap, girdap-duvar etkileşimleri gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmada olduğu gibi en yüksek SPL seviyeleri kavite arka duvarında

hesaplanmıştır. Periyodik basınç-zaman grafiğine göre akış sürekli olarak kendini tekrar etmektedir. Güç spektrumundan elde edilen değerlere göre ilk mod iki boyutlu çalışmada 1037 Hz değerindedir. Bu değer Rossiter formulasyonunda 1109 Hz olarak hesaplanmaktadır, deneysel olarak da 1000 Hz civarında bulunmuştur. Kavite alt duvarı SPL dağılımları ise deneysel dağılım ile uyumludur.

Kavite akışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olan L/D oranları kavite uzunluğunun değiştirilmesi ile çeşitlendirilmiş ve sonuçlar birbirleri ile kıyaslanmıştır. LD3, LD5 ve LD7 geometrileri analizlerinde periyodik basınç salınımları oluşmuştur. Derin kavite geometrisinde olan LD1 akışında basınç salınımları gözlemlenmemiş, dar kavite alanı nedeniyle basınç salınımlarının başlıca nedenlerinden olan kesme tabakası hareketlenmeleri oluşmamıştır. Geçiş bölgesi akış aralığında olan LD10 geometrisinde de basınç salınımları yakalanmamıştır. Basınç salınımlarının olduğu konfigürasyonların çoklu modlara sahip olduğu gözlemlenmiştir. Çoklu modlara sahip olan bu akışlarda kavite bölgesi etkileşimleri tek moda sahip LD1 ve LD10 konfigürasyonlarına göre daha yoğundur ve kesme tabakası hareketleri daha net gözlemlenmektedir. Sonuç olarak çoklu moda sahip olan sistemlerin küçük ölçekli birçok yapı içerdiği ve daha karmaşık bir akış bölgesine sahip olduğu, tek moda sahip sistemlerin ise daha basit bir akış bölgesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Her mod için Strouhal sayısı hesaplanmıştır ve bu irdlemeye göre her bir mod değerinde L/D oranından bağımsız olarak sabit Strouhal sayısı elde edilmiştir. Bütün konfigürasyonlarda en yüksek SPL değerleri kavite arka duvarında gözlemlenmiştir. Bu durum kesme tabakası duvar etkileşimi nedeniyle L/D oranından bağımsız olarak tüm açık kavite akışları için aynı şekilde gerçekleşmektedir. LD10 geometrisi analiz sonuçları Kaufman vd'nin [14] LD9.9 geometrisi ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanmış ve benzeri bir dağılım olduğu gözlemlenmiştir.

Üç boyutlu simülasyonlar iki boyutlu simülasyon parametreleri kullanılarak 30 Rossiter periyodu için yapılmıştır. Üç boyutlu simülasyonlar DES ve RANS türbülans yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SPL seviyeleri iki metotla da yaklaşık aynı seviyelerde ölçümlenmiştir. Bu durumun nedeni ağ yapısının yeterince sıkı olmaması dolayısıyla DES çözümünde çözüm alanının büyük bir kısmının

RANS ile çözümlenmiş olması olarak düşünölmüştür. Üç boyutlu akış analizlerinde akışa dik yönde hız ve basınç değışimlerinin olduğu gözlemlenmiştir. Girdap sayısı akışa dik yönde değışim göstermiştir. En fazla girdap merkez düzlemde gözlemlenmiştir. Bu girdaplar akışa dik düzlemde ilerledikçe etkisini kaybetmekte ve yok olmaktadır. Birinci ve ikinci mod değeri Rossiter formülasyonundan sırası ile %1.3, % 5.1 fark etmektedir. İki boyutlu analizlerde çoklu mod gözlemlenirken üç boyutlu analizlerde deneysel çalışmada olduğu gibi tek mod gözlemlenmiştir. Bu durumda üçüncü boyutun akışı basitleştirdiğini ve kavite bölgesindeki küçük ölçekli türbölans oluşumlarının azalmasına yol açtığını söylemek mümkündür. İki boyutlu analiz sonuçlarından farklı olarak üç boyutlu çalışmada basınç salınımları periyodik değildir. Bunun sebebi olarak üç boyut etkisi olarak düşünölmektedir. İki boyut ve üç boyut sonuçları kavite ortasında benzeri sonuçlar vermiş; ancak diğer düzlemlerde iki ve üç boyutlu analiz sonuçları türbölans davranışları açısından ciddi miktarlarda fark göstermektedir.

Üç boyutlu analiz sonuçlarının niceliksel ve niteliksel incelemelerinin yapılması akıştaki oluşumların yorumlanmasında yardımcı olmuştur. Serbest akış ile gelen sınır tabakasının kavite giriş köşesine gelince ayrıldığı, kavite üzerinde kararsız hareketlenmeler gerçekleştirerek kavite arka köşesinde tekrar birleştiği gözlemlenmiştir. Bu birleşmeye bağlı olarak kavite içerisindeki basınç değeri kavite dış ortamı basınç değerlerinden daha düşük kalmakta ve kesme tabakası kavite içerisine doğru bükölmektedir. Bu bükölme ile kavite bölgesine kütle girişı olmaktadır. Kavite bölgesine aktarılan bu enerji kavite ön köşesine doğru ilerlemekte ve kavite iç basıncının artmasıyla beraber kavite dışına atılmaktadır. Bu enerji çıkışı kesme tabakasının kavite dışına doğru eğilmesine neden olmaktadır. Bu mekanizma sürekli olarak kendini tekrar etmektedir.

## 6.2. Gelecek Çalışmalar için Öneriler

Bu çalışmada zaman ve maliyet kısıtından dolayı analiz süreleri ve ağ yapıları belirli limitlerle sınırlanmıştır. Bu çalışmanın devamında üç boyutlu çalışmalarda z ekseninde ağ yapısı iyileştirilmesi yapılarak DES türbülans modeli ile çalışılabilir. Böylece DES modelinin etkisini efektif bir şekilde görmek mümkün olacaktır. Analiz sürelerinin uzatılmasının deneysel değerler ile daha uyumlu SPL seviyelerinin alınmasına yardımcı olacağı düşünülmektedir. Kavite genişlik etkilerinin incelenmesi amacı ile farklı genişliklerde kavite analizleri yapmakta yararlı bir çalışma olabilir.

110M539 kodlu TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiş olan bu HAD analizleri sonucunda elde edilen veri toplulukları, projenin devamında hava araçlarının yapısına zarar veren basınç dalgalarının önüne geçilebilmesi ve indirgenebilmesi için lazer enerjisi bırakım yöntemi çalışmalarında kullanılacaktır. Ayrıca bu veriler akış yapısını çözümlemede yardımcı olacak olan Dikgen ayrıştırma yönteminde de kullanılacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] J.R.J. Dover et al., Aerodynamics and Aero-Acoustics of Rectangular Planform Cavities, Part I: Time-Averaged Flow, Datasheet, Engineering Science Data Unit 02008, 2005.
- [2] Syed, A., 2012, Detached Eddy Simulation of Turbulent Flow Over an Open Cavity With and Without Cover Plates, *Yüksek Lisans Tezi, Wichita State University*, Aerospace engineering department, America.
- [3] “Aerospace Web” erişim adresi: “Aerospace Web” erişim adresi: <http://www.aerospaceweb.org/question/history/q0185.shtml>, erişim tarihi: 24 Nisan 2012
- [4] “War New Updates” erişim adresi: [http://warnewsupdates.blogspot.com/2009\\_01\\_01\\_archive.html](http://warnewsupdates.blogspot.com/2009_01_01_archive.html), erişim tarihi: 24 Nisan 2012
- [5] Tracy, M.B., Plentovich, B., Cavity Unsteady Pressure Measurements at Subsonic and Transonic Speeds, NASA Technical Paper 3669, Springfield, U.S.A., 1997.
- [6] Block, P.J.W., Noise Response of Cavities of Varying Dimensions at Subsonic Speeds, NASA Technical Report, TN D-8351, U.S.A., 1976.
- [7].Garner H.C et al., Drag of a rectangular platform Cavity in a Flat Plate with a Turbulent Boundary Layer for Mach Numbers Up to 3. Part II: Open and Transitional Flows, Technical Report, Engineering Science Data Unit 00007, 2000.
- [8] Rossiter, J., Wind Tunnel Experiments on the Flow over Rectangular Cavities at Subsonic and Transonic Speeds, Technical Report 64037: Royal Aircraft Establishment, UK, 1964.
- [9] Rossiter, J., The Effects Of Cavities On The Buffeting Of Aircraft, Technical Memorandum AERO.754, Royal Aircraft Establishment, UK, 1962.
- [10] Rossiter, J., A Preliminary Investigation into Armament Bay Buffet at Subsonic and Transonic Speeds, Technical Memorandum AERO.679, Royal Aircraft Establishment, UK, Ağustos 1960.
- [11] Rossiter, J., Kurn, A., A Wind Tunnel Measurements Of The Unsteady Pressures In And Behind A Bomb Bay, Technical Note AERO.2677, Royal Aircraft Establishment, UK, 1963.
- [12] Ahuja, K.K., Mendoza, J., Effects of Cavity Dimensions, Boundary Layer and Temperature on Cavity Noise with Emphasis on Benchmark Data to Validate Computational Aero acoustics Codes, NASA Contractor Rep. 4653, U.S.A., 1995.
- [13] Barakos, G.N., Lawson, S.J., Stejil R. and Nayyar P., Numerical Simulations of High-Speed Turbulent Cavity Flows, *Flow Turbulence Combust*, 83(4), 569-585, 2009.
- [14] Kaufman, L.G., Maciulaitis A., Clark, R.L., Mach 0.6 To 3.0 Flows Over Rectangular Cavities, Air Force Wright Aeronautical Labs., AFWAL-TR-82-3112, New York, U.S.A., Kasım 1993.
- [15] Heller, H.H., Bliss D.B., The physical mechanism of flow-induced pressure fluctuations in cavities and concepts for their suppression, AIAA Paper, 1975-0491., Hampton, U.S.A., Mart 1975.

- [16] Shieh, M.C., Morris, P., Comparison of Two and Three Dimensional Turbulent Cavity Flows, 39<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit,0511, Reno,NV, Haziran 2001.
- [17] Plentovich, E.B., Three Dimensional Cavity Flow Fields at Subsonic and Transonic Speeds, NASA Technical Memorandum 4209, Hampton, USA, 1990.
- [18] Shih, S.H., Hamed, A., Yeuan, J.J., Unsteady Supersonic Cavity Flow Simulations Using Coupled k-epsilon and Navier-Stokes Equations, AIAA Journal, 1994, 32(10), 2015-2021, 1994.
- [19] Ashcroft, G. and Zhang, X., A Computational Investigation of the Noise Radiated by Flow Induced Cavity Oscillations, 39<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit,0511, Reno,NV, Haziran 2001.
- [20] Rizzetta, D.P., “Numerical Simulation of Supersonic Flow Over a Three Dimensional Cavity,” AIAA Journal, 26(7), 799-807, Temmuz 1988.
- [21] Zhang, X., Edwards, J.A., Analysis Of Unsteady Supersonic Cavity Flow Employing An Adaptive Meshing Algorithm, Computers & Fluids, 25(4), 373–393,1996.
- [22] Spalart P.R., Jou, W.H., Strelets, M., Allmaras S.R., Comments on the Feasibility of LES for Wings, and on a Hybrid RANS/LES Approach, First AFOSR International Conference on DNS/LES, Ruston, USA,1997.
- [23] Peng S.H., Simulation of Turbulent Flow Past a Rectangular Open Cavity Using DES and Unsteady RANS, AIAA, 2827, 2006.
- [24] Basu D., Hamed, A., Das, K., DES, Hybrid RANS/LES and PANS Models For Unsteady Separated Turbulent Flow Simulations, Proceedings of FEDSM, ASME, U.S.A., Haziran 2005.
- [25] Driver, D.M., Seegmiller, H.M., Features of a Reattaching Turbulent Shear Layer in Divergent Channel Flow, AIAA Journal, 23(2), 163-171, 1985.
- [26] Hamed, A., Basu, D., Das, K., Effect of Reynolds Number On the Unsteady Flow and Acoustic Fields Of Supersonic Cavity, Proceedings of FEDSM, ASME, U.S.A., Haziran 2003.
- [27] Barakos, G.N., Lawson, R., Steijl, R. and Nayyar, P., Numerical Simulations of High-Speed Turbulent Cavity Flows, Flow Turbulence Combust, 83(4), 569-585, UK, 2009.
- [28] Ross, J.A., Cavity Acoustic Measurements at High Speeds, Technical Report DERA/MSS/MSFC2/TR000173, UK, Aralık 2000.
- [29] Rizetta ,D.P., Visbal, M.R., Large Eddy Simulation of Supersonic Cavity Flowfields Including Flow Control, AIAA 41(8), 2003.
- [30] “Wikipedia Foundation” erişim adresi:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Direct\\_numerical\\_simulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Direct_numerical_simulation), erişim tarihi: 25 Nisan 2012.
- [31] Hamed, A., Basu, D., Das, K., Numerical Simulation of Transonic Flow Acoustic Resonance in Cavity, Proceedings of ICFDP7, Cairo, Egypt, Aralık 2001.
- [32] Bres, G.A., Colonius, T., Direct Numerical Simulations of Three Dimensional Cavity Flows, Journal of Fluid Mechanics: 599, 309-339, Cambridge, UK, Mart 2008.
- [33] Bueno, P.C., Unalmis, Ö.H., Clemens, N.T., Dolling, D.S., The Effects of Upstream Mass Injection on a Mach 2 Cavity Flow, 40<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, Temmuz 2002,

- [34] Unalmis, O.H., Clemens, N.T., Dolling, D.S., “Experimental Study of Shear Layer/ Acoustics Coupling in Mach 5 Cavity Flow,” *AIAA Journal*, 30(2), 242-251, 2001.
- [35] Perng, S.W.,1996, Passive Control of Pressure Oscillations in Hypersonic Cavity Flow, *Doktora Tezi, University of Texas at Austin*, Dept. of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics, Austin, Texas, USA.
- [36] Kegerise, M.A., 1999, An Experimental Investigation of Flow-Induced Cavity Oscillations, ” *Doktora Tezi, Syracuse University*, U.S.A.
- [37] Lazar, E., Elliot, G., Glumac, N., Control of the Shear Layer above a Supersonic Cavity Using Energy Deposition, *AIAA Journal*, 46(12), 2987-2993, Aralık 2008.
- [38] Williams, D.R., Cornelius, D., Rowley C.W., Closed-Loop Control of Linear Supersonic Cavity Tones, 37<sup>th</sup> AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Miami, U.S.A.,2007.
- [39] Williams, D.R., Cornelius, D., Rowley C.W., Supersonic Cavity Response to Open Loop Forcing, *Proceedings of the First Berlin Conference on Active Flow Control* ,Eylül 2006.
- [40] Stallings, R.L., Store Separations from Cavities at Supersonic Flight Speeds, *J. Spacecraft and Rockets*, 20(2), 129-132,1983.
- [41] Chung, K.M., Characteristics of Compressible Rectangular Cavity Flows, *Journal of Aircraft*, 37(3), 463-468, 2000.
- [42] Heller, H., Holmes, H., Covert, E.E., Flow Induced Pressure Oscillations in Shallow Cavities, *Journal of Sound and Vibration*, 18(4), 545-545.1970.
- [43] Disimile, P.J., Toy, N., Acoustical Properties Of A Long Rectangular Cavity Of A Constant Cross-Section Immersed In A Thick Boundary Layer, *Journal of Mechanical Science*, 44, 1827-1844, 2004.
- [44] Zhuang, N., Alvi, S.,F., Shih, C., Another Look at Supersonic Cavity Flows and Their Control, 11<sup>th</sup> AIAA Aero acoustics Conference, California, Mayıs 2005.
- [45] Faure, T.M., Adrianos, P., Lusseyran, F., Pastur, L., Visualizations of the Flow Inside an Open Cavity at Medium Range Reynolds Number, *Experiments in Fluids*, 42:169-184, 2007.
- [46] Heigermoser, C., Scarno, F., Onorato, M., Torino, P. and Delft, TU., Investigation Of The Flow in the Rectangular Cavity Using Tomographic and Time Resolved PIV,2<sup>6th</sup> International Congress of the Aeronautical Sciences, USA, 2008.
- [47] Fluent’s User Manual. Fluent Ver. 6.3.26. Fluent Inc.
- [48] Apaçoğlu, B.,2010, Silindir Üzerindeki Laminer Ve Türbülanslı Akışın Kontrolsüz Ve Kontrollü Had Analizleri, Yüksek Lisans Tezi, TOBB ETÜ,Fen Bilimleri Enstitüsü, Amkara, Türkiye.
- [49] Wilcox, D.C., Turbulence Modeling For CFD, DCW Industries Inc., La Canada, 1993,CA.
- [50] Özsoy, E.,2010, Numerical Simulation Of Incompressible Flow Over a Three Dimensional Rectangular Cavity, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [51] Hinze, J.O., Turbulence, McGraw-Hill, New York, 1975.
- [52] Wolfshtein, M., Some Commentson Turbulence Modelling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 4103-4107, 2009.
- [53] Tennekes, H., and Lumley,, J.L., A First Course in Turbulence, MIT Press, 1983.



- [54] Kolmogorov, A.N., Equations of Turbulent Motion of an Incompressible Fluid, *Izvestia Academy of Sciences, USSR; Physics*, 6, 56-58, 1942.
- [55] Launder, B.E., Spalding, D.B., *Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, 25(4), 169-172, 1972.
- [56] Menter, F.R., Two Equation Eddy Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, *AIAA*, vol 32, 1994.
- [57] Stanek, M.J., Visbal, R.M., Rizetta, D.P., Rubin, S.G., Khosla, P.K., On a Mechanism of Stabilizing Turbulent Free Shear Layers in a Cavity Flow, *Computers & Fluids*, 36, 1621-1637, 2007.
- [58] Tecplot 360 Scripting Guide, 2011.
- [59] Matlab Tutorial Manual, The MathWorks, Inc., 3 Apple Hill Drive Natick, Massachusetts 01760 USA, 2009.
- [60] "Graph Version 4.3" erişim adresi: <http://www.padowan.dk/graph/>, erişim adresi: 15 Mayıs 2012.
- [61] Badcock, K.J., Richards, B.E., Woodgate, M.A., *Elements Of Computational Fluid Dynamics On Block Structured Grids Using Implicit Solvers*, *Progress in Aerospace Engineering*, 36, 351-392, 2000.
- [62] Dolling, D.S., Perng, S.W., Leu, Y.L., "An Experimental Study of Passive Control of Hypersonic Cavity Flow Oscillations," Final Report Grant F49620-95-1-0001 The University of Texas, Austin, 1997.
- [63] Kim, H., Aradag, S., Knight, D., Two and Three Dimensional Simulations of Supersonic Cavity Flow," 12th AIAA Aeroacoustics Conference, Cambridge, Massachusetts, Mayıs 2006.
- [64] Aradag, S., Knight, D., Simulation of Supersonic Cavity Flow Using 3D RANS Equations, *AIAA Paper* 2004.
- [65] Aradag, S., *CFD for High Speed Flows in Engineering*, *VDM Verlag Dr.Müller Altengesellschaft and Co. Kg*, Saarbrücken, Germany, 2008.
- [66] Rizzetta, D.P., Visbal, M.R., "Comparative Numerical Study of Two Turbulence Models for Airfoil Static and Dynamic Stall," *AIAA Paper* 92-4649, Ağustos 1992.
- [67] Zhang, X., Edwards, J. A., Computational analysis of unsteady cavity flows driven by thick shear layers, *The Aeronautical Journal*, 92(919), 350-373, Kasım 1988.
- [68] *Gambit User Manual*, Ver 2.3.16. Fluent Inc.
- [69] Aradag, S., 2006, *A Critical Evaluation of Numerical Algorithms and Flow Physics in Complex Supersonic Flows*, Doktora Tezi, Rutgers University, New Jersey, USA.
- [70] Aradag, S., Knight, D., Simulation of Supersonic Flow Over a Cavity, *AIAA* 2005-0848, Haziran 2005.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AYLI, Ülkü Ece  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 11.09.1989, Ankara  
Medeni hali : Bekar  
Telefon : 0 (555) 822 74 52  
e-mail : ueayli@etu.edu.tr

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2012
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2010
Lise	TED Ankara Koleji Vakfı Özel Lisesi	2006

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010–2012	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi
2010	Nuhun Ankara Makarnası A.Ş.	Stajyer
2009	TAV Havalimanları Holding A.Ş.	Stajyer
2007	Gama Güç Sistemleri Mühendislik ve Taahhüt A.Ş.	Stajyer

## **Yabancı Dil**

İngilizce (ileri düzeyde), Almanca (temel düzeyde)

## **Uluslararası Yayınlar:**

1. Yılmaz, I., **Ayli, E.**, Aradağ, S “Control Methods for Supersonic Cavity Flows and Feasibility of Laser Energy Deposition as an Actuator” International Journal of Flow Control (*gönderildi, inceleme aşamasında*).

## **Uluslararası Kongre Bildirileri:**

1. **Ayli, E.**, Türk, C., Aradağ, S., " Computational Analysis of Cooling of Electronic Systems with Vortex Promoters", ASME 7th International Conference on Computational Heat and Mass Transfer, İstanbul, Türkiye, Temmuz 2011.

2. **Ayli, E.**, Yılmaz, I., Aradağ, S.,, “Numerical Analysis of Supersonic Cavity Flow”, Sixth International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications, İstanbul, Türkiye, Mayıs 2012.

3. Yılmaz, I., **Ayli, E.**, Aradağ, S.,, ” Control of Supersonic Cavity Flow” Sixth International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications, İstanbul, Türkiye, Mayıs 2012.

## **Ulusal Kongre Bildirileri:**

1. **Ayli, E.**, Aradağ, S., "İki Boyutlu Süpersonik Kavite Akışı Simülasyonu", ULIBTK'11 18. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Zonguldak, Türkiye, Eylül 2011.