

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MACH 1.5 SÜPERSONİK KAVİTE AKIŞININ AÇIK KAYNAK YAZILIMLA  
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZLERİ VE SONUÇLARIN  
TİCARİ YAZILIM SİMÜLASYONLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elçin Ceren YALDIR**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Selin ARADAĞ ÇELEBİOĞLU**

**TEMMUZ 2018**



Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....  
**Prof. Dr. Osman EROĞUL**  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....  
**Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ**  
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 161511073 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Elçin Ceren YALDIR**'ın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**MACH 1.5 SÜPERSONİK KAVİTE AKIŞININ AÇIK KAYNAK YAZILIMLA HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZLERİ VE SONUÇLARIN TİCARİ YAZILIM SİMÜLASYONLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI**" başlıklı tezi **16.07.2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Selin ARADAĞ ÇELEBİOĞLU** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ (Başkan)** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Doç. Dr. Mehmet Bülent ÖZER** .....  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi



## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Elçin Ceren YALDIR



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### MACH 1.5 SÜPERSONİK KAVİTE AKIŞININ AÇIK KAYNAK YAZILIMLA HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZLERİ VE SONUÇLARIN TİCARİ YAZILIM SİMÜLASYONLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Elçin Ceren YALDIR

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selin ARADAĞ ÇELEBİOĞLU

Tarih: TEMMUZ 2018

Bu çalışmanın odak noktası açık kavite üzerindeki yüksek hızlı akışların anlaşılmasıdır. Uçakların mühimmat taşımaya için kullanılan, gövdenin iç kısmında yer alan depolama bölgeleri simülasyonlarda dikdörtgen kavite boşluğu olarak modellenmiştir. Bu bölgeler mühimmatı içte taşımaya olanak sağlayarak uçağın radar görünürlüğünü, sürüklenme kuvvetini ve aerodinamik ısınmayı azaltır. Bu nedenle mühendislik uygulamaları açısından ses üstü kavite akışının anlaşılması büyük önem taşır. Açık kavite üzerindeki ses üstü akışlar düzensiz, sıkıştırılabilir ve tübülanslı olması nedeniyle son derece karmaşık özelliklere sahiptir. Akışın fiziğini ve doğasını anlamak, zaman içerisinde akışın özelliklerinde meydana gelen değişiklikleri tahmin edebilmek ve çoğunlukla uçuş sırasında bu akışı kontrol edebilmek son derece kritik

olduğu için havacılık uygulamalarında bu karmaşıklığın çözülmesi ciddi önem taşımaktadır.

Bu çalışmada ses üstü hızlarda açık kavite üzerindeki akışın simülasyonları açık kaynak kodlu bir yazılım olan OpenFOAM kullanılarak gerçekleştirilmiştir. OpenFOAM yazılımının bu problemi çözmedeki kabiliyeti ve limitlerini belirleyebilmek amacıyla simülasyon sonuçları, ticari bir yazılım olan ANSYS-Fluent yazılımı simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Simülasyonlarda akış koşulları düzensiz, sıkıştırılabilir ve türbülanslı olarak belirlenmiş ve sonuçlar kavite duvarlarındaki ses basınç seviyeleri, hızlı Fourier dönüşümü (FFT) ve zamana bağlı değişkenlik gösteren basınç salınımları cinsinden yorumlanmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları, kavite geometrisinin taban duvarındaki ses basınç seviyeleri açısından deneysel veriler ile de kıyaslanmıştır. Deneysel veriler sayesinde, hem açık kaynak kodlu yazılımın güvenilirliği hem de iki yazılım türünün birbiri ile kıyaslanması durumundaki becerileri üzerine yorum yapmak mümkün olmuştur. OpenFOAM yazılımını daha iyi anlamak adına kullanılan sayısal şemalar, zaman ayrıklaştırma metotları, tolerans ve ardışık iterasyonlar arasındaki farkın kısıtlamaları gibi çalışmalar da yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre OpenFOAM ses üstü hızlarda açık kavite üzerindeki akış probleminde deneysel bulgulara ANSYS-Fluent yazılımından daha çok yaklaşmıştır. Ancak OpenFOAM çok daha ince atılmış ağ yapısı gerektirmektedir. OpenFOAM'un üçüncü boyut etkilerini yakalama yeteneğini de incelemek adına üç boyutlu kavite geometrisi simülasyonu yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Süpersonik kavite akışı, Açık kaynaklı yazılım, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği.



## **ABSTRACT**

Master of Science

### **COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS ANALYSIS OF MACH 1.5 SUPERSONIC CAVITY FLOW BY OPEN SOURCE SOFTWARE AND COMPARISON OF SIMULATION RESULTS WITH COMERCIAL SOFTWARE**

Elçin Ceren YALDIR

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Selin ARADAĞ ÇELEBİOĞLU

Date: JULY 2018

The focus of this research is high-speed flow over open cavities. Internal carriage of stores on aircrafts is modeled as a rectangular cavity, which is crucial from an engineering perspective, since internal carriage of bombs and stores decreases the radar signature of the aircraft and aerodynamic heating. Supersonic flow through an open cavity can cause extremely complex flow characteristics. In the cavity region, flow field is compressible, unsteady and turbulent, so it is quite important for aerospace applications to be able to predict the nature of the flow and the characteristics over time, mostly to be able to control it during flight.

In this study, supersonic open cavity flow simulations are performed with commercial and open source software, separately, in order to compare the simulation results and determine the capabilities and limits of OpenFOAM for supersonic flow as an open

source software. Unsteady, compressible and time dependent flow conditions are utilized. Simulation results are compared by considering sound pressure levels on cavity walls, Fast Fourier Transform (FFT) results and pressure fluctuations for the time dependent nature of the flow. The simulation results are also compared with experimental data in terms of sound pressure levels on the bottom wall of the cavity geometry. Under favour of experimental data at the bottom wall of the cavity it is possible to comment on the reliability of the data from both software. The effects of numerical scheme, time discretization, tolerance and residual restrictions on the results are investigated, as well. Three dimensional cavity geometry is also analyzed, in order to examine the ability of OpenFOAM in capturing the effects of the third dimension. According to simulation results, the results for supersonic flow over a rectangular cavity are closer to experimental findings with OpenFOAM when compared to commercial ANSYS-Fluent software, which makes open source codes promising for supersonic flows, although OpenFOAM requires much finer mesh structure than Fluent.

**Keywords:** Supersonic cavity flow, Open source software, Computational fluid dynamics.

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardımları ve katkıları ile beni yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Selin ARADAĞ'a teşekkür ederim.

Tez jürisi üyeleri Doç. Dr. Mehmet Bülent ÖZER'e ve Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ'a zaman ayırıp tezimi değerlendirdikleri ve jürimde buldukları için teşekkür ederim. Ayrıca yönlendirmeleri ve ilgisi için Dr. Kutay ÇELEBİOĞLU'na teşekkür ederim.

Tez yazım sürecinde destekleriyle yanımda olan proje arkadaşım Kübra Asena GELİŞLİ'ye, ofis arkadaşlarım Burak ALTINTAŞ, Fevzi BÜYÜKSOLAK, Özgür ÇÖLLÜ, Ferdi BESNİ ve Mustafa TUNCER'e teşekkür ederim.

Hayatım boyunca aldığım her kararımda arkamda olan ailem Ayşegül YALDIR ve Erdiñ YALDIR'a çok teşekkür ederim.

Her koşulda desteğini hiç esirgemeyip her daim yanımda olan Umut Can ÖNEL'e çok teşekkür ederim. İhtiyaç anında hep bir telefon uzağında olan Öykü Özlem ÇAKAL'a, iyi dileklerini hep hissettiğim arkadaşlarım Can KÖKSAL, Onur ŞANAL, Sinem ULUOCAK ve Erdem DİNÇER'e çok teşekkürler.

Burs imkanı sağladığı için TOBB ETÜ'ye, çalışmalarım sırasında imkanlarından faydalandığım TOBB ETÜ Su Türbini Tasarım ve Test Merkezine ve TM2041 no'lu TAI projesine teşekkür ediyorum. Bu tez çalışması TM2041 no'lu Süpersonik Kavitelerin HAD ile Aerodinamik Analizleri, Aktif ve Pasif Kontrol Çalışmaları adlı TAI projesi kapsamında yapılmıştır.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	viii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	ix
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	x
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	xii
<b>KISALTMALAR</b> .....	xiii
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	xiv
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı.....	1
1.2 Kavite Akışı.....	2
1.3 Literatür Taraması.....	5
1.3.1 Kavite çalışmaları.....	5
1.3.2 OpenFOAM çalışmaları.....	8
<b>2. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ</b> .....	<b>13</b>
2.1 Navier-Stokes Denklemleri.....	13
2.2 Türbülans.....	14
2.3 Türbülans Modellemesi ve Sayısal Yaklaşımlar.....	16
2.4 Sıkıştırılabilir Akış.....	19
2.5 Sayısal Yöntemler.....	20
2.5.1 Sonlu hacimler yöntemi.....	20
2.5.2 Ses basınç seviyesi ve hızlı Fourier dönüşümü.....	21
2.5.3 Ayırıklaştırma yöntemleri.....	22
<b>3. OPENFOAM YAZILIMI</b> .....	<b>25</b>
<b>4. OPENFOAM YAZILIMININ DÜZ LEVHA SİMÜLASYONLARI İLE DOĞRULANMASI</b> .....	<b>29</b>
<b>5. İKİ BOYUTLU KAVİTE SİMÜLASYONLARI VE DOĞRULAMASI</b> .....	<b>35</b>
5.1 Sınır ve Başlangıç Koşulları.....	36
5.2 Ağ Yapısı Çalışması.....	39
5.3 Zamanda Ayırıklaştırma Yönteminin Akışa Etkileri.....	43
5.4 Ayırıklaştırma Yöntemlerinin Akışa Etkileri.....	47
5.5 Rahatlatma Faktörünün Akışa Etkileri.....	50
5.6 Tolerans Büyüklüğünün Akışa Etkileri.....	52
5.7 Sonuçların Ticari Yazılımla Kıyaslanması.....	54
<b>6. ÜÇ BOYUTLU KAVİTE SİMÜLASYONLARI</b> .....	<b>61</b>
<b>7. SONUÇLAR VE YORUMLAR</b> .....	<b>69</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>73</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>75</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : (a) Kapalı kavite (b) Açık kavite .....	3
Şekil 1.2 : Rossiter mekanizması .....	4
Şekil 2.1 : Euler şeması veri noktaları .....	22
Şekil 2.2 : Crank Nicolson şeması veri noktaları .....	22
Şekil 3.1 : OpenFOAM dosya yapısı .....	25
Şekil 4.1 : Deney düzeneği .....	29
Şekil 4.2 : (a) 120000 Elemanlı ağ yapısı, (b) Duvar dibindeki ağ yapısı .....	30
Şekil 4.3 : Düz plaka geometrisi .....	31
Şekil 4.4 : Sınır tabaka kalınlığı sonuçlarının deneyle kıyası .....	31
Şekil 4.5 : Sürtünme katsayısı sonuçlarının deneyle kıyası .....	32
Şekil 4.6 : Logaritmik boyutsuz hız ve y uzunluğu sonuçlarının deneyle kıyası .....	33
Şekil 5.1 : Kavite geometrisi .....	36
Şekil 5.2 : Hız – duvardan uzaklık grafiği .....	37
Şekil 5.3 : Çözüm alanı hız başlangıç tahmin konturu .....	39
Şekil 5.4 : (a) Ağ yapısı 1 (b) Ağ yapısı 2 (c) Ağ yapısı 3 .....	40
Şekil 5.5 : Ağ yapılarının deney ile alt duvar ses basınç seviyesi kıyası .....	41
Şekil 5.6 : Ay yapısı çalışması güç spektrumu kıyaslaması .....	42
Şekil 5.7 : Kavite arka duvarında 0.6 noktası basınç-zaman grafiği .....	44
Şekil 5.8 : ddtScheme çalışması kavite alt duvarı SPL kıyaslaması .....	45
Şekil 5.9 : ddtScheme çalışması güç spektrumu kıyaslaması .....	46
Şekil 5.10 : divScheme çalışması kavite alt duvarı SPL kıyaslaması .....	48
Şekil 5.11 : Kavite arka duvarında 0.6 noktası basınç-zaman grafiği .....	48
Şekil 5.12 : divScheme çalışması güç spektrumu kıyaslaması .....	49
Şekil 5.13 : Rahatlatma faktörü çalışması kavite alt duvarı SPL kıyaslaması .....	51
Şekil 5.14 : Rahatlatma faktörü çalışması güç spektrumu kıyaslaması .....	51
Şekil 5.15 : Tolerans büyüklüğü çalışması kavite alt duvarı SPL kıyaslaması .....	53
Şekil 5.16 : Tolerans büyüklüğü çalışması güç spektrumu kıyaslaması .....	53
Şekil 5.17 : Kavite alt duvarı ses basınç seviyesi kıyaslaması .....	54
Şekil 5.18 : Kavite arka duvarı ses basınç seviyeleri kıyaslaması .....	56
Şekil 5.19 : Kavite ön duvarı ses basınç seviyeleri kıyaslaması .....	56
Şekil 5.20 : Güç spektrumu kıyaslaması .....	57
Şekil 5.21 : Kavite akışı akım çizgileri ve basınç dağılımı [Pa] .....	58
Şekil 5.22 : Kavite akışı yoğunluk dağılımı [kg/m <sup>3</sup> ] .....	59
Şekil 5.23 : Kavite akışı sıcaklık dağılımı [K] .....	60
Şekil 6.1 : Ağ yapısının üç boyutlu görüntüleri .....	61
Şekil 6.2 : Kavite alt duvarı ses basınç seviyeleri kıyaslaması .....	62
Şekil 6.3 : Kavite ön duvarı ses basınç seviyeleri kıyaslaması .....	63
Şekil 6.4 : Kavite arka duvarı ses basınç seviyeleri kıyaslaması .....	63

Şekil 6.5 : Güç spektrumu kıyaslaması .....	64
Şekil 6.6 : Üç boyutlu kavite akışı akım çizgileri ve basınç dağılımı [Pa] .....	66
Şekil 6.7 : Üç boyutlu kavite akışı yoğunluk dağılımı [kg/m <sup>3</sup> ] .....	67





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 1.1 : $\alpha$ sabitinin L/D ile değişimi [1].....	4
Çizelge 2.1 : k- $\omega$ türbülans model sabitleri.....	18
Çizelge 3.1 : Zamanda ayırıklaştırma şemaları.....	27
Çizelge 3.2 : Gradyan şemaları.....	27
Çizelge 3.3 : İraksama şemaları.....	28
Çizelge 3.4 : İnterpolasyon şemaları.....	28
Çizelge 4.1 : Deney detayları.....	29
Çizelge 5.1 : Deney koşulları.....	35
Çizelge 5.2 : Kavite geometrisi sınır koşulları.....	38
Çizelge 5.3 : Ağ yapıları ile ilgili bilgiler.....	40
Çizelge 5.4 : İlk mod için frekans değeri kıyaslaması.....	42
Çizelge 5.5 : Ağ yapıları simülasyon süreleri.....	43
Çizelge 5.6 : İlk mod için geliştirilmiş Rossiter formülasyonu ile frekans değeri kıyaslaması.....	46
Çizelge 5.7 : Rahatlatma faktörü çalışması simülasyon süreleri.....	52
Çizelge 5.8 : Simülasyon sonuçları ile deney bulguları arasındaki fark.....	55
Çizelge 5.9 : İki yazılımın ilk mod için geliştirilmiş Rossiter formülasyonu ile frekans değeri kıyaslaması.....	57
Çizelge 6.1 : İki simülasyonun ilk mod için geliştirilmiş Rossiter formülasyonu ile frekans değeri kıyaslaması.....	65



## KISALTMALAR

<b>HAD</b>	:Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
<b>RANS</b>	:Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes)
<b>DES</b>	:Ayrık girdap benzeşim yöntemi (Detached Eddy Simulation)
<b>LES</b>	:Büyük ölçekli benzeşim yöntemi (Large Eddy Simulation)
<b>1B</b>	:Bir boyutlu
<b>2B</b>	:İki boyutlu
<b>3B</b>	:Üç boyutlu
<b>SPL</b>	:Ses basınç seviyesi (Sound Pressure Level)
<b>FFT</b>	:Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
<b>DAY</b>	:Dikgen Ayrıştırma Yöntemi



## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
L	Kavite uzunluğu
D	Kavite derinliği
f	Frekans
m	Mod sayısı
M	Mach sayısı
U	Hız
$\alpha$	Rossiter formulasyonu deneysel sabiti
K	Rossiter formulasyonu deneysel sabiti
W	Kavite genişliği
St	Strouhal sayısı
$\rho$	Yoğunluk
$\tau_{ij}$	Stres tensörü
$q_j$	Isı akısı
$c_p$	Sabit basınçta özgül ısı
$c_v$	Sabit hacimde özgül ısı
$S_{ij}$	Açısal deformasyon
$\delta_{ij}$	Kroncker delta
$\lambda$	İkincil viskozite terimi
$\mu$	Dinamik viskozite
$\mu_t$	Türbülanslı dinamik viskozite
Re	Reynolds sayısı
Pr	Prandtl sayısı
k	Türbülanslı kinetik enerji
$\omega$	Türbülans yitim hızı
$\beta$	Türbülans modeli sabiti
$\sigma$	Türbülans modeli sabiti
$\Omega$	Dönme deformasyon tensörü
Db	Desibel
Hz	Hertz
$\gamma$	Rahatlatma faktörü



## 1. GİRİŞ

Günümüzde havacılık alanında önemli uygulamalarda yer alması sebebiyle yüksek hızlarda kavite üzerindeki akış konusu araştırmalar arasında popürlüğünü arttırmaktadır. Bu uygulamalar, yüksek hızlı kargo uçakları ve gövdenin iç kısmında yük veya mühimmat taşıyan askeri uçaklardır. Akış alanında meydana gelen karmaşık yapılar bu uygulamalarda önemli sorunlar meydana getirmektedir. Türbülanslı akışlarda meydana gelen basınç dalgalanmaları bu geometride yapıya zarar verebilecek şiddette rezonans oluşumlarına yol açabilmektedir. Fakat mühimmatı iç bölgelerde taşımanın avantajları nedeniyle vazgeçilemez bir uygulama alanı oluşturmaktadır. Bu doğrultuda kavite fiziğinin anlaşılması ve oluşan basınç dalgalanmalarının önlenmesi için birçok çalışma yapılmaktadır.

Bu çalışmada, kavite üzerindeki yüksek hızlı akışın anlaşılabilmesi için açık kaynak kodlu bir yazılım olan OpenFOAM kullanılmıştır. Açık kaynak kodlu yazılımların kaynak kodunun okunabilir, geliştirilebilir, araştırmanın çözmeye çalıştığı koşullara göre özelleştirilebilir olması nedeniyle son yıllarda kullanıcısı artmaktadır. Bunun yanı sıra ücretsiz ve ulaşılabilirliği kolay olan yazılımlar olduğu için popürlüğünü arttırmaktadır. Popürlüğünün artması ile birlikte bu yazılımın güvenilirliğinin doğrulanması amacıyla simülasyon sonuçlarının birçok deneysel bulgu ve ticari yazılım sonuçlarıyla kıyaslandığı çalışmalar yapılmıştır ve yapılmaya devam edilmektedir.

### 1.1 Tezin Amacı

Bu tezin amacı süpersonik kavite akışını açık kaynaklı OpenFOAM yazılımını kullanarak HAD analizlerini gerçekleştirirken, yazılımı öğrenmek, yazılımdaki değişkenlerin sonuçlara olan etkilerini saptamak ve simülasyon sonuçlarını ticari yazılım olan FLUENT ile kıyaslamaktır.

Bu amaç doğrultusunda öncelikle OpenFOAM'un kullanımını öğrenmek için basit bir geometri olan düz plaka kullanılmıştır. Akış koşulları bu temel geometride sağlanabildikten sonra öğrenilenler kavite geometrisine uyarlanmıştır. Çözüm yöntemlerinde bazı değişkenlerin çözüme olan etkisi araştırılarak yazılım daha iyi tanınmaya çalışılmıştır. Sonuçlar kavite duvarlarında elde edilen ses basınç seviyeleri, hızlı Fourier dönüşümleri, basınç salınımları gibi veriler üzerinden Fluent sonuçları ile kıyaslanarak OpenFOAM'un doğrulanması yapılmıştır. Ayrıca akışın iki ve üç boyutlu analizleri OpenFOAM kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçları birbirleri ile kıyaslanmıştır. Böylelikle yazılımın üçüncü boyut etkilerini çözüm yeteneği de gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan akım çizgileri, basınç, yoğunluk ve sıcaklık konturları çizdirilerek akışın fiziği ve doğası anlaşılmaya çalışılmıştır.

## 1.2 Kavite Akışı

1950'lerden beri araştırma konusu olan kavite akışı hala çoğunlukla belirsizliğini korumaktadır. Özellikle geçtiğimiz yıllarda kavite akışının gerçekleştiği uygulamaların artması ile zamana bağlı olarak değişen süpersonik kavite akışlarının incelenmesi hem akışkanlar mekaniği hem de mühendislik uygulamaları açısından oldukça önemlidir. Bu uygulamalar mühimmatı iç bölgelerde taşıyan askeri uçaklar veya yüksek hızlı kargo uçakları ile örneklendirilebilir. Mühimmatın içte taşınmasının getirdiği birçok olumlu sonucu vardır. Bunlar;

- Uçağın radara yakalanma ihtimalinin azalması,
- Aerodinamik ısınmanın daha az görülmesi,
- Sürüklenme kuvvetinin azalması,
- Manevra yeteneğinin artması,
- Hedef üzerinde daha kısa süre harcama,
- Uçuş diyagramının genişlemesi olarak sayılabilir.

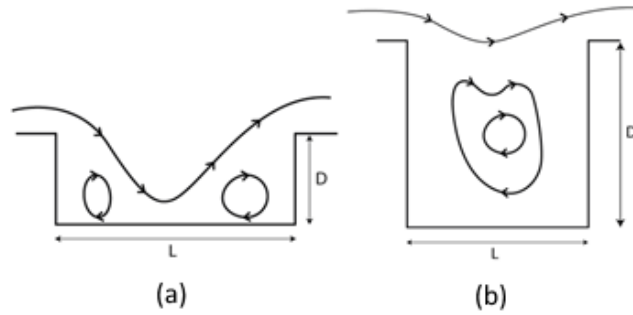
Fakat bunların yanı sıra akışın karmaşıklaşmasından ötürü getirdiği olumsuzluklara çözüm üretilmesi gerekir. Öncelikle kavite akışından kısaca bahsetmek gerekirse, gelen akışta hücum kenarında ayrılmalar gözlenir, bu ayrılmalar kayma tabakasını oluşturur. Gelen akışın diğer bir kısmı ise kavite içine doğru ilerleyerek dönmeye ve



büyük boyutlarda girdapların oluşmasına neden olur. Fırar kenarında ise akustik dalgalar meydana gelir. Bazı koşullar altında frekans ve akustik dalgaların fazı uyuştığında rezonans gözlenir. Bu durum ciddi bir düzensizlik ve yüzeylerdeki akustik kuvvetlerin çok yüksek olması gibi sonuçlar doğurur. Hatta yeterince güçlü bir rezonans ve yüksek basınç dalgalanmaları kavite geometri yapısına fiziksel zararlar verebilir. Yüksek hızlarda meydana gelen kavite akışında ise şok dalgaları ve yüksek basınç değişimleri ve dalgalanmaları oluşur.

Akışın karmaşıklığı sebebiyle literatürde farklı özellikleri temel alınarak sınıflandırılmıştır. Geometriye göre sınıflandırılmada  $L/D$  oranı dikkate alınmıştır. Kavitenin boyu  $L$ , deriliği ise  $D$  olarak simgelenmiştir.

$L/D$  oranı 13'den büyük olanlara kapalı kavite akışı, 10'dan küçük olanlara ise açık kavite akışı denilmektedir. Açık ve kapalı kavite akışları Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



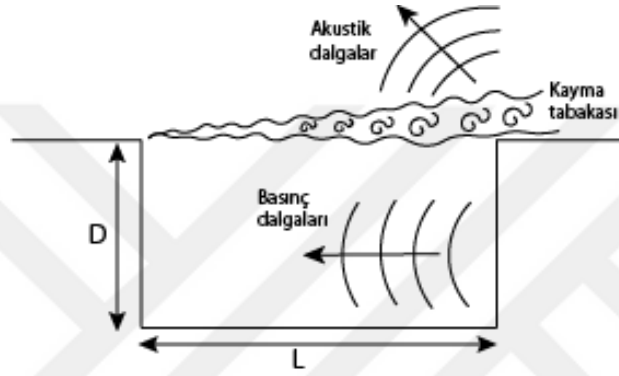
Şekil 1.1 : (a) Kapalı kavite (b) Açık kavite.

Kapalı kavite akışında kayma tabakası öncelikle yere bağlanır daha sonra fırar kenarına ulaşır bu arada birden fazla girdap yapısı gözlenirken, açık kavitede kayma tabakası doğrudan fırar kenarı ile birleşerek bir tane kuvvetli girdap yapısı oluşturur.

Konunun öncülerinden olan Rossiter[1], yaptığı deneyler sonucunda kavite içerisindeki akışı dörde ayırmıştır. İlkinde ön duvarda oluşan girdaplar arka duvara doğru ilerlerler. İkinci kısımda girdaplar arka duvarın kenarına çarparlar ve akustik dalgalar oluştururlar. Üçüncü kısımda akustik dalgalar ayrılmaya başlar bir kısmı kaviteden uzaklaşırken akustik alan oluştururken geri kalanı kavite içerisinde basınç dalgalarını meydana getirirler. Son kısımda ise, basınç dalgaları ön duvara çarpar ve bunun

sonucunda yeni girdaplar oluşturur. Bu geribildirim döngüsüne Rossiter mekanizması denir.

Mekanizma Şekil 1.2’de gösterilmiştir. Mekanizma içerisinde Girdap-duvar, girdap-girdap gibi etkileşimden ötürü bazı modlar meydana gelir. Bunlara Rossiter modu denir. Rossiter yaptığı deneyler sonucunda basınç dalgalanmalarının modlarının tahmini için ampirik bir formül geliştirmiştir. Bu formül (1.1) numaralı denklemde gösterilmiştir ve Rossiter’in 0.4-1.4 Mach sayısı aralığında gerçekleştirdiği deneylerden elde edilmiştir.



Şekil 1.2 : Rossiter mekanizması.

Bu denklem içindeki  $m$  mod numarasını,  $f_m$  ise o mod numarasında, modun frekansını temsil etmektedir.  $U_\infty$  serbest akış hızı,  $L$  kavitenin uzunluğu,  $M_\infty$  serbest ortam Mach sayısı,  $\alpha$  ise kavitenin uzunluğunun derinliğine olan oranına bağlı bir deneysel sabittir ve değişimi Çizelge 1.1’de verilmiştir. 0.55 olarak alınan  $K$  değeri  $K = c_1/U_\infty$  olarak hesaplanır ve  $c_1$  önden giden dalga hızının yayılım hızıdır [2].

Çizelge 1.1 :  $\alpha$  sabitinin  $L/D$  ile değişimi [1].

<b>L/D</b>	<b><math>\alpha</math></b>
4	0.25
6	0.38
8	0.54
10	0.58

$$f_m = \frac{(m - \alpha)U_\infty}{L(M_\infty + K^{-1})} \quad (1.1)$$

Formülasyon zaman içerisinde başka araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Heller ve Bliss [3] tarafından modifiye edilen Rossiter formülasyonundan literatür çalışması kısmında bahsedilmiştir.

Formülasyondaki değişkenler orijinal Rossiter formülündekiler ile aynıdır. Bu çalışmada iki yöntemle hesaplanmış sonuçlar kıyaslanacaktır.

### **1.3 Literatür Taraması**

Tez kapsamında yapılan literatür taramasının en önemli amacı OpenFOAM yazılımının hangi alanlarda ne kadar gerçeğe yakın sonuçlar verdiğini öğrenmek ve süreçte karşılaşılabilecek problemler, eksiklikler gibi konularda bilgi sahibi olmaktır. Bunun yanı sıra kavite akışı ile ilgili yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiş sonuçları irdelemek ve akışın fiziği hakkında bilgi sahibi olmak elde edilen sonuçları doğru yorumlayabilmek için oldukça önemlidir. Literatürde kavite akışı ile ilgili hem deneysel hem sayısal birçok çalışma bulunmaktadır. Ayrıca araştırmacılar OpenFOAM yazılımını geniş bir yelpazede doğrulama çalışmaları ile uğraşmışlardır. Ancak bu tezde daha çok sıkıştırılabilir akış üzerine yapılan çalışmalar üzerinde durulmuştur.

#### **1.3.1 Kavite çalışmaları**

Block [4], yaptığı çalışmalara göre L/W oranının 1'den küçük olduğu durumlarda akış iki boyutlu olarak düşünülebilirken, 1'den büyük olduğu durumlarda üç boyutlu olarak düşünölmelidir.

Zamana bağlı değişen karmaşık kavite akışının anlaşılması adına literatürde hem deneysel hem de sayısal çalışmalar bulunmaktadır. Kavite akışı üzerine yapılan deneyler, hava tünellerinde ve uçuş testlerindeki çalışmaları kapsamaktadır. Deneylerde veri elde etmek adına kullanılan donanımların yüksek maliyetli olması sebebiyle literatürdeki sayısal çalışmalar deneysel çalışmalara göre daha fazladır.

Rockwell ve Naudascher [5], kararsız kavite akışını deneysel olarak incelemiştir. Akışkanın dinamik karakterinin kayma tabakasındaki kararsızlıktan oldukça etkilendiği öne sürülmüştür. Başlangıç koşullarının ve kavite hücum kenarındaki akışın laminer ya da türbülanslı oluşunun basınç salınımlarının genliğini etkileyen en önemli parametreler olduğu belirtilmiştir. Kavite salınımlarının frekansının, sadece teori temelli yollarla bazı durumlarda öngörülebildiği; yarı deneysel yarı teori temelli yollarla ise tüm durumlarda öngörülebildiği genellemesi yapılmıştır.

Daha önce bahsedilen Rossiter'in formülasyonu daha sonra Heller ve Bliss [3], tarafından modifiye edilmiş ve tüm Mach sayılarında kullanılabilir hale getirilmiştir. Modifiye edilmiş formülasyon (1.2) numaralı denklemde gösterilmiştir.  $St$ , Strouhal sayısıdır ve bu boyutsuz sayı kavite rezonans frekans değerlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Akıştaki modlar bu formülasyon ile tahmin edilebilse de basınç salınımlarının genlik tahminlerinde kullanılacak analitik bir formül literatürde bulunmamaktadır.

$$f_m = \frac{St * U_\infty}{L} = \frac{U_\infty * (m - \alpha)}{L * \left[ M_\infty \left( 1 + \left[ \frac{\alpha-1}{2} \right] M_\infty^2 \right)^{-1/2} + K^{-1} \right]} \quad (1.2)$$

Kaufman ve Clark [6], farklı kavite geometrilerini kullanarak, Mach sayısı 0.6 ile 3 arasında değişen deneyler gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirilen bu deneyler sonucunda subsonik akışlardan süpersonik akışlara kadar geniş bir aralık için aerodinamik ve akustik veri tabanı oluşturulmuştur. Açık ve kapalı kavite akışları için elde edilen statik basınç verilerine göre süpersonik hızlarda kavite arka duvarında serbest statik basınç değeri aşılmış ve bu durum sürüklenme kuvvetinin artmasına sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Artırılan Reynolds sayısına göre ses basınç seviyelerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Chung [7], sıkıştırılabilir akışlar üzerinde Mach sayısının ve kavitenin geometrik özelliklerinin etkilerini araştırmak için deneysel çalışmalar yapmıştır. Deneyler sonucunda kavitenin derinliğinin sınır tabakası kalınlığına oranının akış için önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir. Kavite içinde oluşan karmaşık akışın ana sebebi olarak kayma tabakası ile kavite arka duvarının etkileşimi gösterilmiştir. Ayrıca kapalı

ve geçiş tipi kavite akışlarının, açık kavite akışlarına göre serbest akış koşullarından daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Basınç salınımlarını genliği açık kavite akışında arka duvara doğru artarken, kapalı kavite akışında kavite tabanının orta noktasında bir tepe noktası gözlenmiştir. Mach sayısı arttıa geçiş tipi ve açık kavite akışlarında arka duvarda gözlemlenen basınç salınımlarının genliğinin arttığı sonuçlarına ulaşılmıştır.

Faure vd. [8], laminer sınır tabaka ve açık kavite akışının etkileşimini deneysel olarak araştırmıştır. Bu bağlamda farklı L/D değerlerinin ve Reynolds sayılarının akışa etkisi incelenmiştir. Kavite içinde geometrik özelliklere bağlı olarak değişen 3 girdap oluşumundan bahsedilmiştir. Bunlar; arka duvar önünde oluşan ana girdap, n duvara yakın olan ikincil girdap ve köşe girdabıdır.

Literatürdeki sayısal çalışmalarda zamana bağlı değişen karmaşık kavite akışını anlamak adına çeşitli nümerik yöntemler kullanılmıştır. Bunlar; Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS), Detached Eddy Simulations (DES), Large Eddy Simulations (LES)'tir.

Aradag [9-13], Süpersonik kavite akışını incelemek adına zaman bağlı değişen RANS simülasyonlarını  $k-\omega$  türbülans modelini kullanarak gerçekleştirmiştir. Kavite içindeki basınç salınımlarının sebebinin kayma tabakasının kavite içinde oluşturduğu girdap yapıları olduğu belirtilmiştir. İki boyutlu ve üç boyutlu simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Sonuçlara göre akıştaki üçüncü boyutun etkisi oldukça fazladır. Kavitenin genişliği boyunca farklı düzlemlere bakıldığında akış alanının girişindeki sınır tabakadan daha kalın kayma tabakası oluşumlarına rastlanmıştır. İki boyutlu ve üç boyutlu simülasyonlar; akım çizgileri, girdap oluşumu, güç spektrumu ve basınç salınımları incelendiğinde farklı sonuçlar vermektedir. Üç boyutlu simülasyonlarda iki boyutlu simülasyonlara göre; girdap yapılarının daha basitleştiği ve basınç salınımlarının genliğinin daha düşük olduğu grlmştir. Bununla birlikte, üç boyutlu simülasyonlarda basınç salınımlarının daha karmaşık bir yapıya sahip olduğu da grlmştir. İki boyutlu simülasyonların akışın genel karakterini anlamak adına bir fikir verdiği fakat problemin fiziğini tam olarak anlamak için yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır.

Ayli [14], süpersonik kavite akışının 2 boyutlu ve 3 boyutlu simülasyonlarını RANS ile gerçekleştirmiştir ve kıyaslamıştır. Süpersonik kavite akışının incelenmesinde üç boyut etkilerinin ihmal edilmemesi gerektiğini belirtmiştir. Farklı L/D değerlerine sahip kavite akışı simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca üç boyutlu simülasyonlar RANS ve DES yöntemleri ile gerçekleştirilmiş ve türbülans yaklaşımlarının akışa olan etkileri incelenmiştir. İki yöntemin arasındaki farkların iyi görülebilmesi için ağ yapısının oldukça sıkı olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

### **1.3.2 OpenFOAM çalışmaları**

OpenFOAM, 2004 yılından beri öncelikle OpenCFD Ltd. tarafından piyasaya sürülen ve geliştirilen, ücretsiz, açık kaynaklı HAD yazılımıdır. Hem ticari hem de akademik kuruluşlardan mühendislik ve bilim alanlarında geniş bir kullanıcı tabanına sahiptir. OpenFOAM, kimyasal reaksiyonlar, türbülans ve ısı transferini içeren karmaşık akışkanlardan akustik, katı mekaniğe ve elektromanyetizma kadar her şeyi çözmek için geniş bir yelpazeye sahiptir [15].

OpenFOAM kullanımının yaygınlaşması ile birçok sıkıştırılabilir ve sıkıştırılmaz akış uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki araştırmaların bir kısmı yazılımın ticari yazılımlarla, bir kısmı başka açık kaynaklı yazılımlarla, bir kısmı ise deneysel verilerle doğrulanması üzerinedir.

Hassanally vd. [16], OpenFOAM ile düşük Mach sayılarında LES çalışmaları yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalarda OpenFOAM yazılımını kullanmışlardır. Bunun temel nedeni, OpenFOAM'un kısmi diferansiyel denklemlerin sayısal çözümü için elverişli bir kod tabanına sahip olmasıdır. Buna ek olarak OpenFOAM'un temel çözücülerine yeni metotlar ve yazılıma sürekli olarak katkıda bulunan bir geliştirici ve kullanıcı topluluğu geliştirmiştir olmasıdır.

Sıkıştırılmaz akış çözücülerini yoğunluk değişiminin hesaba katılmadığı çözücülerdir. Bunun yanı sıra sıkıştırılabilir akış çözücülerini ise basınç ve yoğunluk alanlarındaki dinamik bağıntıyı hesaplarına dahil eder. Diğer bir değişle sıkıştırılabilir akış çözücülerini mekanik enerjinin ısı enerjisiye dönüşmesini hesaba katar. Yapılan çalışma ile kinetik enerji dağılımının minimum olduğu düşük Mach sayılı bir çözücü üzerine eklemeler yapılmıştır. Sonuç olarak, OpenFOAM karmaşık türbülanslı tepki veren

akışlardaki uygulamalarla LES için güvenilir bir açık kaynak çözücü olduğu yargısına varılmıştır [16].

Kraposhin vd. [17], OpenFOAM için geniş Mach sayısı aralığında ( $M < 0.1$  sıkıştırılmaz akıştan  $M > 3$  süpersonik akışa) uygulanabilen viskoz ideal gaz akışı için yarı kapalı bir model önerilmiş ve uygulanmıştır. Yeniden uyarlanan bu şemanın avantajı, genel olarak kullanılan şemaların en iyi özelliklerinin bir modelde bir araya getirilmesidir:

- Basit uygulama ve sonucun monotonikliği,
- Küçük bir zaman adımında subsonik akışların sürdürülebilir sayısal benzetimi imkanı,
- Subsonik, transonik ve süpersonik şemalar,
- Mevcut OpenFOAM işlevsel kütüphanesinin desteği.

Model, sıkıştırılabilir/sıkıştırılmaz, 1B/2B/3B akışlar ve geniş Reynolds ve Mach sayısı aralığında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, analitik fonksiyonlar ve deney verileri ile iyi derecede bir uyuma göstermiştir [17].

Magnus [18], yapmış olduğu tez çalışmasında OpenFOAM ve SU2 yazılımlarını farklı akış özellikleri üzerinde test edip, yazılımların güçlü ve zayıf taraflarının belirlenmesi amaçlamıştır. Türbülanslı düz plaka geometrisi, farklı çözücülerin türbülans modellerini test etmek için kullanmıştır. Sonuç olarak sıkıştırılabilir problemlerde SU2, OpenFOAM'dan daha iyi performans göstermektedir. Ancak sıkıştırılmaz problemlerde elde edilen değerler neredeyse aynı sonuçları vermektedir. Sıkıştırılabilir akış için geometri olarak transonik kanat profili analizleri yapılmıştır. OpenFOAM'da çözücü olarak kullanılan rhoCentralFoam şoku daha büyük tahmin etmiştir.

İki çözücü kıyaslandığında güçlü ve zayıf yönleri ortaya çıkmıştır. OpenFOAM farklı durumlarda kullanılmak üzere ayrı özelleşmiş çözücülere sahiptir fakat söz konusu sıkıştırılabilir akışlar olduğunda becerileri bir miktar sınırlı kalmaktadır. Bunun yanı sıra analizlerin kurulumu çok meşakkatlidir. SU2'nun ise daha basit kuruluma sahip olmasına ve sıkıştırılabilir akışlar için daha çeşitli çözücüleri olmasına rağmen analizlerde yakınsama elde etmekte zorluklar çekmektedir [18].

Chun vd. [19], OpenFOAM'un yoğunluk tabanlı çözücülerini aerothermal değişkenler üzerinde denemişlerdir. OpenFOAM'un tercih edilme sebebi, son yıllarda süpersonik / hipersonik sıkıştırılabilir akış için yoğunluk tabanlı çeşitli çözücüler üretmesidir. Bu çözücülerin şok dalgasını yakalama kabiliyeti bazı araştırmacılar tarafından zaten doğrulanmış olsa da, bu çözümleyicilerin halen ticari HAD yazılımı olarak kapsamlı olarak onaylanması gerekiyor. Sınır tabakasında, ısı ve ısı akısı gibi aerothermal değişkenleri yakalama kapasitesi birbirinden farklıdır. Bu nedenle, OpenFOAM içindeki bu sıkıştırılabilir çözücülerin doğrulanmasının devam etmesi gerekmektedir.

Süpersonik ve hipersonik akışlar OpenFOAM içindeki yoğunluk tabanlı çözücüler tarafından çözülmüş ve Fastran ticari yazılımı ve deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Tüm konturlar ve aerothermal değişkenler, OpenFOAM'un 1. Dereceden hassasiyet kullanmasına rağmen elde edilen sonuçlar deneysel veriler, Fastran sonuçları ile örtüşmüştür. Genel olarak, sınır tabakasında aerothermal değişkenlerin yakalanabilme yeteneği açısından, sonuçlar, OpenFOAM'un yoğunluk tabanlı çözücülerinin son derece güvenilir olduğunu ve iyi doğruluklara sahip olduğunu göstermektedir [19].

Sebastian vd. [20], OpenFOAM'u hipersonik akışta hava çivisi (aerospike) üzerinde kullanmış ve sonuçları Fluent ile kıyaslamışlardır. Hipersonik araçlar çok yüksek hızda hareket ederken sürüklenme ve ısıtma sorunuyla karşılaşır. Bu sürüklenmeyi ve ısınmayı azaltmanın yollarından biri de bir hava çivisi kullanmaktır. Bu çalışmada üzerine hava çivisi yerleştirilmiş küt cismin çevresindeki akım, ticari yazılım olan ANSYS Fluent ve OpenFOAM ile yüksek Mach sayısında (Mach = 6) farklı uzunluk, çap oranları ile ( $L/D = 1,5 - 2$ ) analizleri yapılmıştır. Basınç dağılımları ve Mach sayısı konturları üzerinde çalışılmış ve şoklar OpenFOAM ile her durum için daha iyi yakalanmıştır. Onun dışında değerler iki yazılımla da çok yakın hesaplanmıştır.

Robertson vd. [21], küt cisim etrafında sıkıştırılmaz akış için OpenFOAM kullanılarak bir doğrulama çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada geometri olarak geriye dönük basamak, bir küre ve keskin kenarlı bir delta kanadı kullanılmıştır. Çalışma çözücünün ve çözücüde bulunan sayısal yöntemlerin ve türbülans modellerinin doğruluğunu araştırır. Geriye dönük basamaklı durumda, OpenFOAM ortalama akış tahminlerini deneysel verilerle % 5 gibi küçük bir farklılıkla uyumlu sonuçlar hesaplamıştır. Bununla birlikte, türbülanslı kinetik enerji ve kayma gerilmesi



tahminleri % 10-15 büyük hata göstermiştir. Küre durumunda, integral değerleri ve ortalama girdap tahminleri, deneysel verilerle kıyaslandığında % 3 fark gözlemlenmiştir. Ayrıca, türbülans ve kayma tabakasındaki dengesizlik tahminleri için % 20'nin üzerinde yüksek bir hata oranı saptanmıştır. Yüksek hataların, türbülans modelleme belirsizliklerinden ötürü olduğu düşünülmektedir. Delta kanadı durumunda, OpenFOAM, kırılma bölgesinde yüzey basıncı için daha düşük tahminlerde bulunmuştur. Bunlara ek olarak, sonuçlar Fluent ile kıyaslandığında geriye dönük basamak durumunda sonuçlar birbirine %6 farklı yakınsamıştır, fakat delta kanat durumunda daha büyük farklılıklar gözlemlenmiştir. Fluent girdaplardaki kırılmaları tahmin etmekte başarısız olmuştur. Genel olarak küt cisim etrafındaki sıkıştırılmaz akışlar için OpenFOAM'un yeterince doğru sonuçlar elde ettiği tespit edilmiştir. Bu nedenle güvenilir bir açık kaynaklı HAD yazılımı olduğu kabul edilir.

Nebenführ [22], tez çalışmasında Fluent ve OpenFOAM arasında üç durumunun incelendiği bir karşılaştırma çalışması yapmıştır. Bu çalışmaların ikisi aerodinamik, diğeri ise aeroakustik üzerine odaklanmıştır. OpenFOAM'ın Fluent üzerinde sahip olduğu bir avantaj kullanıcının çalışma zamanı boyunca hemen hemen tüm simülasyon parametrelerini değiştirme yeteneğidir ve bu da farklı ayarların simülasyonun üzerindeki etkisini incelemeyi kolaylaştırır. OpenFOAM bazı durumlarda daha incelikli bir ağ yapısı gerektirse de Fluent kadar iyi sonuçlar verir.



## 2. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Geometrik açıdan bakıldığında basit görünen kavite geometrisi, akış altında meydana gelen kaotik yapılardan ötürü çözümü zor bir akış meydana getirir. Kavite içerisinde büyüklü küçüklü birçok girdap yapısı, kesme tabakası ve burada meydana gelen kararsız hareketler ve oluşan farklı etkileşimler kavite akışının çözülmesini zorlaştırır. Bu başlık altında Navier Stokes denklemleri, türbülans ve modellenmesi, sıkıştırılabilir akışlar ve simülasyonlarda kullanılan bazı sayısal yöntemlerden bahsedilmiştir.

Bu bölümde Navier Stokes denklemleri, türbülans genel özellikleri ve modellenmesi, sıkıştırılabilir akışlar ve sayısal yöntemlerden bahsedilecektir.

### 2.1 Navier-Stokes Denklemleri

Sıkıştırılabilir, laminar ve viskoz olan ideal Newtonian gazlarının akış hareketlerini çözümleyebilmek için korunum denklemlerinin çözülebilmesi gerekmektedir. Bu korunum denklemleri sırasıyla kütle, momentum ve enerji olmak üzere aşağıda verilmiştir. (2.4) numaralı denklem ise ideal gaz denklemdir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{\partial (\rho e + p)}{\partial x_j} = \frac{\partial (u_i \tau_{ij} - q_j)}{\partial x_j} \quad (2.3)$$

$$p = \rho RT \quad (2.4)$$

Korunum denklemlerinde geçen  $\rho$  yoğunluğu,  $u_i$  Kartezyen koordinatında hız bileşenlerini,  $p$  statik basıncı,  $e$  iç enerjiyi,  $\tau_{ij}$  stres tensörünü ve  $q_j$  ise ısı akışını temsil

etmektedir. Gaz sabitinin, stres tensörünün, ısı akışının ve iç enerjinin hesaplanması aşağıdaki gibidir.

$$R = c_p - c_v \quad (2.5)$$

$c_p$  ve  $c_v$  terimleri sırasıyla sabit basınç ve sabit hacim özgül ısı katsayılarıdır.

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} + \lambda \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (2.6)$$

$$q_j = -\hat{k} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (2.7)$$

$$e = c_v T + \frac{1}{2} u_i u_i \quad (2.8)$$

$s_{ij} = 2 \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  açısal deformasyon,  $\delta_{ij}$  Kronecker delta ve  $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$  ikincil viskozite terimidir.  $\mu$  ise moleküler viskoziteyi temsil eder [23].

Havanın moleküler viskozite değeri ise aşağıda verilmiştir.

$$\mu = 1.256 * 10^{-6} \frac{T^{3/2}}{T + 110.3} \text{ Nt} - \text{sec/m}^2$$

## 2.2 Türbülans

Akışta meydana gelen türbülans, akış içerisinde zaman ve konumda rastgele meydana gelen hareketlerdir. Matematiksel olarak boyutsuz bir sayı olan Reynolds sayısı ile bağıntılıdır.

$$Re = \frac{\rho U x}{\mu} \quad (2.9)$$

Reynolds sayısı fiziksel olarak atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak ifade edilebilir. Bu oranının düşük olduğu durumlarda akış laminer olarak

değerlendirilirken büyüdükçe akış türbülanslı hale gelir. Reynolds sayısının artmasıyla artan basınç değerleri salınım yapmaya başlar ve bu durum akışı düzensiz, kaotik bir yapıya getirir. Bu düzensiz rastgele hareketlerin olduğu durumda akış türbülanslı olarak tanımlanır.

Türbülanslı akışın hemen hemen tüm fiziksel durumlarda kabul edilen özelliklerinden bazıları şunlardır:

- Türbülanslı kinetik enerjinin büyük girdaplardan küçük girdaplara dönüşümü, değişken miktarlarda medyana gelen yitim,
- Başlangıç verilerine olan bağıllık ve buna bağlı olarak sınırlı öngörülebilirlik,
- Rastgelelik, karasızlık ve kaos,
- Aşırı ve uç olayların meydana gelmesi,
- Dağılma, yitim gibi sebeplerden ötürü sonuçların geri dönüşümsüzlüğü,
- Lokal olarak düzenli iken geniş çapta düzensizlik [24].

Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemleri türbülanslı akışı ortalama ve salınımlı kısım olarak iki ayırmaktadır. Denklemlerde kullanılan değişkenler ortalama değerleri ve salınım miktarları olarak aşağıdaki gibi ayrıştırılabilir.

$$u_i = \bar{u}_i + u_i'$$

$$p = \bar{p} + p'$$

$$h = \bar{h} + h'$$

$$e = \bar{e} + e'$$

$$T = \bar{T} + T'$$

$$q_j = \bar{q}_j + q_j'$$

Bu değişkenlerin ayrıştırılmış hallerini denklem (1.1), (1.2) ve (1.3)'te yerlerine konulursa Favre ortalama korunum denklemleri elde edilir.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_i'}{\partial x_i} = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} u_i'}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_i' u_j'}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \overline{\rho u_i' u_j'}) \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{e}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{e} + \bar{p})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i * (\overline{-\rho u_i' u_j'} + \bar{\tau}_{ij}) - (c_p \overline{\rho T' u_j'} + \bar{q}_j)) \quad (2.12)$$

$$\bar{p} = \bar{\rho} R \bar{T} \quad (2.13)$$

Moleküler ısı akısı ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\bar{q}_i = -\frac{c_p \bar{\mu}}{Pr} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \quad (2.14)$$

$Pr = \frac{c_p \bar{\mu}}{\bar{k}}$ , moleküler Prandtl sayısını temsil etmektedir ve laminar akış için 0.7 olarak kabul edilir.

Denklem (2.10), (2.11) ve (2.12) Reynolds ortalamalı Navier Stokes (RANS) denklemleridir. Bu denklem sistemlerinin çözülebilmesi için Reynolds gerilmesi  $\overline{-\rho u_i' u_j'}$  ve Reynolds ısı akısı  $\overline{\rho T' u_j'}$  terimleri belirlenmelidir. İfadelerdeki salınım değerlerinin çarpımı, türbülanslı akışı laminar akıştan ayırır. Türbülanslı akışın kaotik yapısı bu ifadelerden meydana gelir ve problemi çözecek analitik bir yöntem bulunmamaktadır. Bu nedenle değerlerin hesaplanabilmesi için türbülans modelleri geliştirilmiştir.

### 2.3 Türbülans Modellemesi ve Sayısal Yaklaşımlar

Türbülanslı Newton akışkanları için Reynolds gerilmesinin açılmal deformasyonla orantılı olduğu kabul edilir.

$$\overline{-\rho u_i'' u_j''} = 2\mu_t \left( s_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.15)$$

$$\overline{-\rho u_i'' u_j''} = -2\rho k \quad (2.16)$$

k birim kütledeki türbülanslı kinetik enerjiyi ve  $\mu_t$  ise türbülans viskoziteyi temsil etmektedir.

Kapalı bir denklem dizisine sahip olabilmek için türbülans viskozitenin tanımla olması gerekmektedir. Sıkça kullanılan türbülans modellerinden biri olan iki denklemlilik  $k$ - $\omega$  türbülans modelinde Kolmogorov türbülans viskoziteyi  $\omega$ 'nın bir fonksiyonu olarak tanımlamıştır. Kolmogorov  $\omega$  kavramını, birim türbülanslı kinetik enerjideki yitim olarak ifade etmiştir. Kolmogorov türbülans viskozite, türbülans uzunluk skalası ve yitimin matematiksel tanımlarını  $\mu_t = \rho k / \omega$ ,  $l = k^{1/2} / \omega$  ve  $\epsilon = \omega k$  şeklinde yapmıştır ve bu değişkenleri kullanarak akış içerisinde meydana gelen düzensizlik, iletim, difüzyon, yitim, saçılım gibi fiziksel durumları da göz önünde bulundurarak türbülans yitimi için aşağıdaki denklemi elde etmiştir [25].

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = -\beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \sigma \mu_t \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (2.17)$$

$\beta$  ve  $\sigma$  daha sonra belirlenecek model sabitleridir.

The Wilcox  $k$ - $\omega$  model denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir [25].

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma^* \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \omega}{\partial x_j} &= \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 - \beta \rho \omega \xi (2 \Omega_{mn} \Omega_{nm})^{1/2} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (2.19)$$

Türbülans gerilim tensörü,  $\tau_{ij}$ , türbülans viskozite,  $\mu_t$ , dönme deformasyon tensörü,  $\Omega$ , aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\tau_{ij} = 2\mu_t \left( s_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.20)$$

$$\mu_t = \frac{\alpha^* \rho k}{\omega} \quad (2.21)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (2.22)$$

Türbülans ısı akısı, denklemde yer alan laminar ve türbülanslı Prandtl sayıları sırasıyla aşağıda verilmiştir.

$$q_j = - \left( \frac{\mu}{Pr_l} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (2.23)$$

$$Pr_l = \frac{\mu c_p}{\hat{k}} \quad (2.24)$$

$$Pr_t = \frac{\mu_t c_p}{\hat{k}_t} \quad (2.25)$$

Türbülans modeli için sabit türbülans Prandtl sayısı 0.9 olarak kabul edilir. Model içerisinde kullanılan sabitler ise Çizelge 2.1 'de verildiği gibidir.

Çizelge 2.1 : k- $\omega$  türbülans model sabitleri.

MODEL SABİTİ	SAYISAL DEĞERİ
$\alpha$	0.52
$\beta_0$	0.072
$\beta_0^*$	0.09
$\sigma$	2
$\sigma^*$	2



## 2.4 Sıkıştırılabilir Akış

Bir akışkanın izentropik sayılabilmesi için akışın tersinebilir ve adiyabatik olması gerekmektedir. Bu durumda aşağıda verilen kabuller yapılır.

$$\delta q = 0 \quad (\text{adiyabatik}) \quad (2.26)$$

$$ds_{irrev} = 0 \quad (\text{tersinebilir}) \quad (2.27)$$

Bu kabuller doğrultusunda termodinamiğin ikinci yasası kullanılarak elde edile denklemler aşağıdaki gibi yeniden yazılır.

$$0 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (2.28)$$

$$0 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (2.29)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{c_p/R} \quad (2.30)$$

$$\frac{c_p}{c_v} = \gamma \quad (2.31)$$

(2.31) numaralı denklem, (2.30) numaralı denklemde yerine yazılırsa;

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\gamma/\gamma-1} \quad (2.31)$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{-1/\gamma-1} \quad (2.32)$$

İdeal gaz denklemine göre ise hacimlerin oranı yoğunlukların oranına eşittir. Bu varsayımı da yerine yazdığımızda aşağıdaki izentropik bağıntıyı elde ederiz.

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^\gamma = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\gamma/\gamma-1} \quad (2.33)$$

Çok küçük hacimde bir akışkan üzerindeki basınç  $p$  olarak kabul edilir ve bu basınç miktarı  $dp$  kadar arttırıldığı düşünülürse toplam hacimde  $dv$  kadar bir azalma gözlenir. Sıkıştırılabilirlik  $\tau$  olarak tanımlandığında meydana gelen küçülmeden dolayı aşağıdaki negatif bağıntı elde edilir.

$$\tau = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp} \quad (2.34)$$

Fiziksel olarak sıkıştırılabilirlik, basınç etkisiyle birim hacimde meydana gelen ufak miktardaki değişim olarak tanımlanabilir [26].

## 2.5 Sayısal Yöntemler

İki ve üç boyutlu türbülanslı, sıkıştırılabilir akış Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği simülasyonları OpenFOAM yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Yazılım hesaplamalarda sonlu hacimler yöntemini kullanırken çözücü olarak yoğunluk tabanlı bir çözücü seçilmiştir.

### 2.5.1 Sonlu hacimler yöntemi

Sonlu hacimler yöntemi, koruma kanunlarını kısmi diferansiyel denklemlerden ayrık cebirsel denklemlere dönüştürmek için kullanılan sayısal bir yaklaşımdır. Sonlu faklar yöntemi veya sonlu elemanlar yöntemi gibi bu sayısal yaklaşımda da çözümün ilk basamağı geometrik alanı ayrıklaştırmaktır. Sonlu hacimler yönteminde bu ayrıklaşma birbiriyle örtüşmeyen sonlu hacimlere ayırmaktır. Daha sonra kısmi diferansiyel denklemler her bir ayrık elemanın üzerine entegre edilerek cebirsel denklemlere dönüştürülür. Cebirsel denklemler sistemi ise her bir eleman için bağımlı değişkenin değerini hesaplamak için çözülür.

Zamana bağı olmayan bir denklem için sonlu hacimler yönteminin basamakları aşağıda verilmiştir.

$$\nabla(\rho \mathbf{v} \phi) = \nabla(\Gamma \nabla \phi) + Q \phi \quad (2.35)$$

(2.35) numaralı denklemdeki ilk terim taşınım, ikinci terim yayılım sonuncu terim ise kaynağı ifade etmektedir.

$$\iiint_V \nabla(\rho \mathbf{v} \phi) dV = \iiint_V \nabla(\Gamma \nabla \phi) dV + \iiint_V Q dV \quad (2.36)$$

$$\oint_{\partial V} (\rho \mathbf{v} \phi) d\mathbf{S} = \oint_{\partial V} (\Gamma \nabla \phi) d\mathbf{S} + \iiint_V Q dV \quad (2.37)$$

$$\sum_{f=\text{yüzeyler}(V)} \int_f (\rho \mathbf{v} \phi) d\mathbf{S} = \sum_{f=\text{yüzeyler}(V)} \int_f (\Gamma \nabla \phi) d\mathbf{S} + \iiint_V Q dV \quad (2.38)$$

(2.38) numaralı denklemin çözülebilmesi için doğrusallaştırılması gerekir. Doğrusallaştırılan denklemde elde edilen matris iteratif olarak çözülür [27].

### 2.5.2 Ses basınç seviyesi ve hızlı Fourier dönüşümü

Belirli bir noktadan alınan basınç verilerinin (2.39) numaralı denkleme uyarlanması ile elde edilen sonuçlar ses basınç seviyesi hesaplamasıdır.

$$SPL = 10 \log_{10} \left( \frac{\bar{p}^2}{q^2} \right) \quad (2.39)$$

(2.39) numaralı denklemde yer alan  $q$  ses basınç referans değeri olup sayısal olarak  $2 \times 10^{-5}$  Pa büyüklüğündedir.

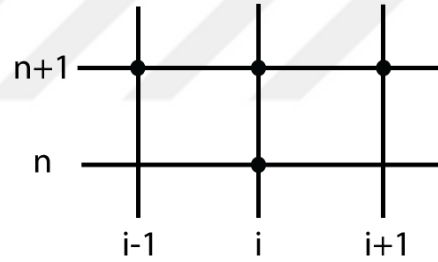
Basınç salınımlarında meydana gelen baskın frekansları ve bunların büyüklüklerini belirlemek amacıyla Hızlı Fourier dönüşümü uygulanmıştır. Bu dönüşüm işlemi zamanda oluşan verileri frekansa dönüştürüp, elde edilen karışık sinyalleri ayrıştırarak titreşimlerin frekans değerlerini ve büyüklüklerinin bulunmasını sağlar.

OpenFOAM yazılımı kullanılarak elde edilen basınç değerleri Matlab ile yazılmış kod yardımıyla Hızlı Fourier dönüşümü ile güç frekans alanına çevrilmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel Rossiter formülasyonu ve onun geliştirilmiş halinden elde edilen sonuçlarla kıyaslanacaktır. Verilerin dönüşümü (2.40) numaralı denklem yardımıyla yapılmaktadır [28].

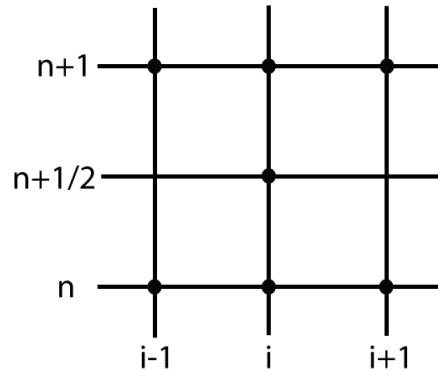
$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (2.40)$$

### 2.5.3 Ayırıklaştırma yöntemleri

OpenFOAM çalışmaları sırasında zamanda ayırıklaştırma şemalarından Euler ve Crank Nicolson yöntemlerinden bahsedilecektir. Yazılımda kullanılan Euler yöntemi kapalı Euler şeması yöntemidir. Yöntemlerin kullandığı veri noktaları Şekil 2. 1 ve Şekil 2.2’de sembolize edilmiştir.



Şekil 2. 1 : Euler şeması veri noktaları.



Şekil 2.2 : Crank Nicolson şeması veri noktaları.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + c \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2.41)$$

(2.41) numaralı denklemde geçen  $c$ , dalganın hızının sayısal değeridir ve sabit kabul edilir. Ayrıklaştırma şemalarının kıyaslanması amacıyla verilen birinci dereceden dalga denklemi model denklem olarak kullanılacaktır. Denklem kapalı Euler şeması yöntemi ile ayrıklaştırılmış hali aşağıdaki gibidir.

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} + c \frac{u_{i+1}^{n+1} - u_{i-1}^{n+1}}{2\Delta x} = 0 \quad (2.42)$$

Şemanın hassasiyeti birinci dereceden olup yuvarlama hatasının derecesi  $O[\Delta t, (\Delta x)^2]$  olarak belirtilmiştir. Ayrıca Fourier kararlılık analizine göre bütün zaman adımları için koşulsuz kararlıdır. Kapalı bir şema yöntemi olduğu için çözümünün yapılabilmesi için denklem sistemi çözülmelidir ve hesaplama süresi uzundur. Bunun yanı sıra daha büyük zaman adımları kullanılabilir [29].

Kullanılan kapalı Euler yönteminde yuvarlama hatasındaki terimler içerisinde en küçük derece, tek sayı olduğu için bu şemada meydana gelen hatalar yitirgen (dissipation) hata olarak adlandırılır. Bu tip hatalar çözüm alanındaki gradyenlerin büyüklüğünü azaltma eğilimindedir. Başka bir deyişle dalgaların genliğini düşürmeye yatkındır.

Dalga denkleminin Crank Nicolson şeması kullanılarak açılmış hali (2.43) numaralı denklemde verilmiştir.

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\frac{\Delta t}{2}} = \alpha \left[ \frac{u_{i+1}^{n+1} - u_{i-1}^{n+1}}{2\Delta x} + \frac{u_{i+1}^n - u_{i-1}^n}{2\Delta x} \right] \quad (2.43)$$

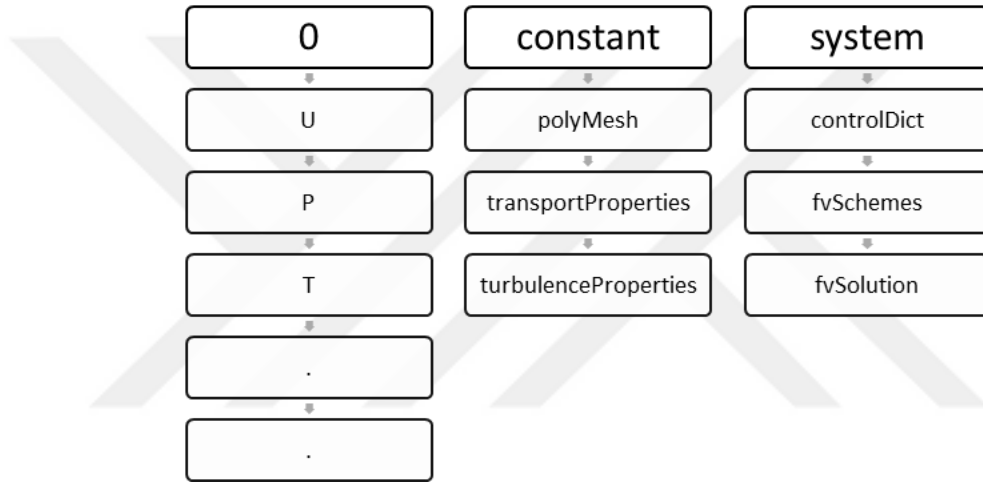
Şemanın hassasiyeti ikinci dereceden olup yuvarlama hatasının derecesi  $O[(\Delta t)^2, (\Delta x)^2]$  olarak belirtilmiştir. Kararlılık analizine göre bu yöntem de koşulsuz kararlıdır [30].

Kullanılan Crank Nicolson yönteminde yuvarlama hatasındaki terimler içerisinde en küçük derece, çift sayı olduğu için bu şemada meydana gelen hatalar dağıtıcı (dispersion) hata olarak adlandırılır. Bu tip hatalar çözüm alanında salınımlara sebep olma eğilimindedir.



### 3. OPENFOAM YAZILIMI

OpenFOAM Hesaplama Akışkanlar Dinamiği için sonlu hacimler yöntemini kullanır. Yazılımda bir uygulama başlatılmak için öncelikle üç adet ismi belirli klasöre ihtiyaç vardır. Bu klasörler “0”, “constant” ve “system” olarak adlandırılmıştır. Dosya yapısı Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : OpenFOAM dosya yapısı.

“0” dosyasının içerisinde problemin, fiziksel koşulların ve çözücülerin gerektirdiği değişkenler, sınır veya giriş koşulu olarak girilir. Bu değişkenlere örnek olarak hız, basınç, sıcaklık, türbülanslı kinetik enerji, yitim vb. verilebilir. Değişkenlerin koşullarını belirlemek için bu çalışmada kullanılan bazı komutlar aşağıda verilmiştir.

- FixedValue: Dirichlet sınır koşuludur. Değişkene belirlenen sınırdaki sabit bir değer atanır. Bu sabit değer skaler veya vektörel olabildiği gibi düzgün dağılımlı veya düzensiz dağılımlı olarak da belirlenebilir.
- ZeroGradient: Neumann sınır koşuludur. Değişkenin sınıra dik olan gradyeni sıfır olarak sabitlenir.
- Symmetry: Bu koşulun verildiği sınırdaki bir akış olmadığı ve böylece düzleme normal bileşenin sıfır olduğu varsayılır.

- NoSlip: Duvar olarak belirlenmiş sınırlarda hızı sıfıra sabitler.
- WaveTransmissive: Çıkış sınır koşulu olarak kullanılır ve hız, basınçtan meydana gelebilecek yansımaları önler.
- SupersonicFreestream: Giriş sınır koşulu olarak kullanılır ve ses üstü hızlardaki akışın özelliklerinin taşınmasını sağlar.

“Constant” klasörü içerisinde probleme ait ağ yapısı bilgileri ve uygulamanın fiziksel özelliklerini içeren bilgiler bulunmaktadır. Ağ yapısı bilgileri “PolyMesh” içerisinde bulunurken, uygulama yapılacak problemin fiziksel özelliklerine ve bu özelliklerin gerekliliklerine göre “TransportProperties”, “TurbulenceProperties” veya “ThermoPyhsicalProperties” isimli dosyalar oluşturulur.

ThermoPyhsicalProperties dosyası içerisinde belirlenebilen akışa ait özelliklerden bazıları aşağıdaki gibidir.

- Termofiziksel model,
- Dinamik viskozite, ısı iletkenlik ve yayılımı hesaplamada kullanılan taşınım modeli,
- Özgül ısı hesabında kullanılan termodinamik model,
- Durum denklemi (İdeal gaz vs),
- Akışkanın türü ve moleküler özellikleri
- TurbulenceProperties dosyası içerisinde kullanılacak türbülans modeli belirtilir.

TransportProperties dosyası içerisinde viskozite ve deformasyon hızı arasındaki bağıntı modeli seçilir (Newtonian, Power law vs) [31].

“System” klasörü içerisinde yine en az üç adet dosya bulunur. “ControlDict” zaman adımı, kaydetme sıklığı, kayıt formatı gibi parametrelerin belirlendiği dosyadır. “FvSchemes” çözümde kullanılan ayrıklık metotlarını kapsar. “FvSolution” ise denklem çözücülerinin, toleransların ve diğer algoritmaların kontrol edildiği dosyadır.

Yapılan çalışma temel alınarak bazı çözücüler ve bu çözücülerin kullanıldığı alanlardan aşağıda bahsedilmiştir.

Basınç tabanlı çözücüler;



- IcoFoam: zamana bağılı, laminar, sıkıştırılmaz akışlar için,
- SimpleFoam: zamandan bağımsız, türbülanslı, sıkıştırılmaz akışlar için,
- PISOFoam: zamana bağılı, türbülanslı, sıkıştırılmaz akışlar için kullanılır.

Yoğunluk tabanlı çözümler;

- RhoSimpleFoam: zamandan bağımsız, türbülanslı, sıkıştırılabilir akışlar için,
- RhoPimpleFoam: zamana bağılı, türbülanslı, sıkıştırılabilir akışlar için,
- SonicFoam: zamana bağılı, türbülanslı, süpersonik - sıkıştırılabilir akışlar için kullanılır [15].

FvSchemes dosyası içerisinde farklı numerik ayrıklaştırma yöntemleri belirlenmesi gerekir. Zamanda ayrıklaştırma için ddtSchemes adı altında Çizelge 3.1'deki yanlarında açıklamaları bulunan yöntemler seçilebilir.

Çizelge 3.1 : Zamanda ayrıklaştırma şemaları.

Euler	Birinci dereceden, sınırlı, kapalı
Crank Nicolson	İkinci dereceden, sınırlı, kapalı
Backward	İkinci dereceden, kapalı
SteadyState	Zamana bağımlı denklemleri çözmez.

Seçilebilecek gradyan şemaları ise Çizelge 3.2'te verilmiştir. Şemalar dosya içerisinde gradSchemes adı altında belirtilir.

Çizelge 3.2 : Gradyan şemaları.

Gauss <interpolationScheme>	İkinci dereceden, Gauss integrasyonu
LeastSquares	İkinci dereceden, en küçük kareler yöntemi
Fourth	Dördüncü dereceden
CellLimited <gradScheme>	İlk üç seçenektan birinin hücre sınırlı hali
FaceLimited <gradScheme>	İlk üç seçenektan birinin yüzey sınırlı hali

Çoğunlukla kullanılan iraksama şemaları ve interpolasyon şemaları da sırasıyla aşağıda Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'de verilmiştir. Iraksama şemaları divSchemes, interpolasyon şemaları ise interpolationSchemes adı altında seçilir.

Çizelge 3.3 : Iraksama şemaları.

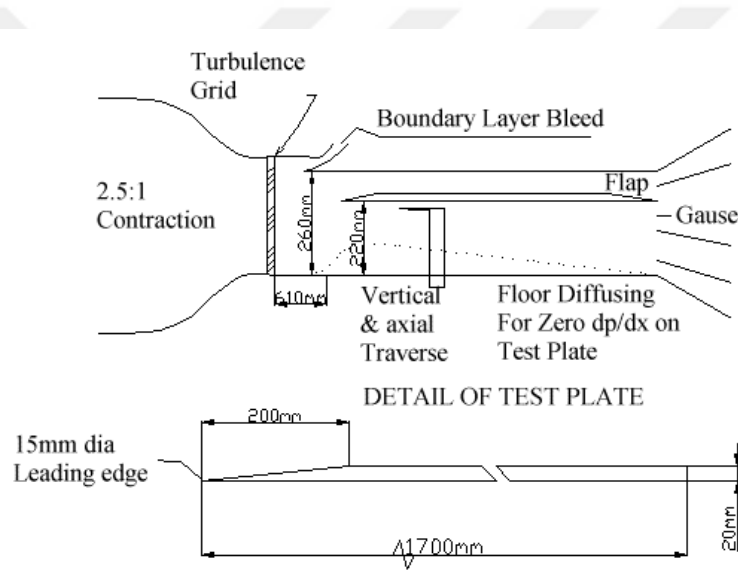
Upwind	Birinci dereceden, sınırlı
LinearUpwind	Birinci/ikinci dereceden lineer, sınırlı
TVD schemes	Birinci/ikinci dereceden, sınırlı
NVD schemes	Birinci/ikinci dereceden, sınırlı
SFCD	İkinci dereceden, sınırlı

Çizelge 3.4 : İnterpolasyon şemaları.

Linear	Lineer interpolasyon
CubicCorrection	Kübik şema
MidPoint	Simetrik ağırlıklandırılmalı lineer interpolasyon

#### 4. OPENFOAM YAZLIMININ DÜZ LEVHA SİMÜLASYONLARI İLE DOĞRULANMASI

Rolls-Royce Uygulamalı Bilim Laboratuvarı'nda düz plaka üzerinde gerçekleştirilmiş bir çok deneysel çalışma vardır. OpenFOAM yazılımını öğrenmek adına başlangıç geometrisi olarak seçilen düz levha simülasyonları bu deney çalışmaları ile kıyaslanacaktır. Şekil 4.1'de deney düzeneği verilen referans çalışma Ercoftac T3A olarak isimlendirilmiştir.



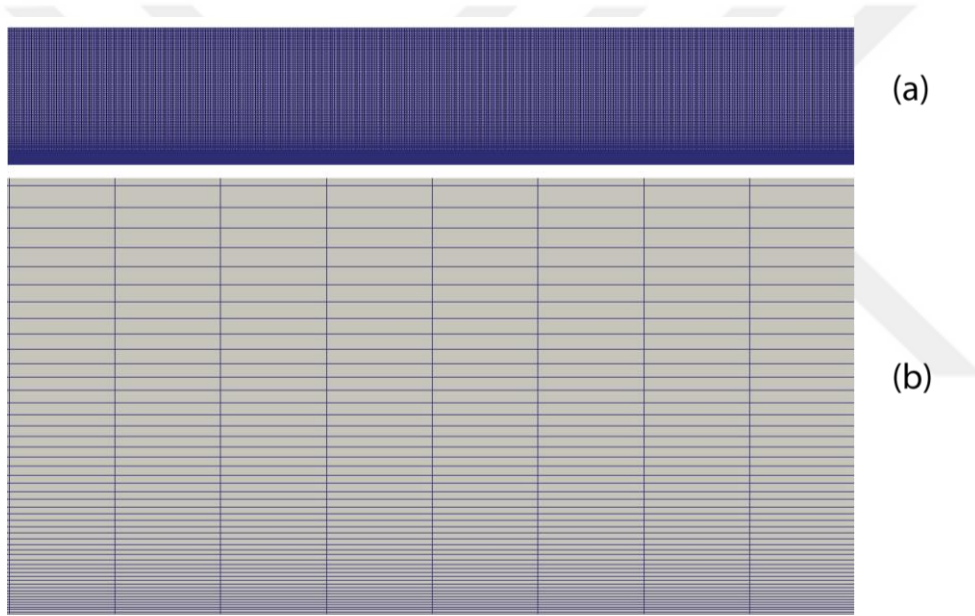
Şekil 4.1 : Deney düzeneği

Simülasyonu gerçekleştirilen deneyin test koşulları ve detayları ise Çizelge 4.1'de gösterilmiştir [32].

Çizelge 4.1 : Deney detayları.

Serbest akış hızı	5.4 m/s
Türbülans yoğunluğu	%3.0

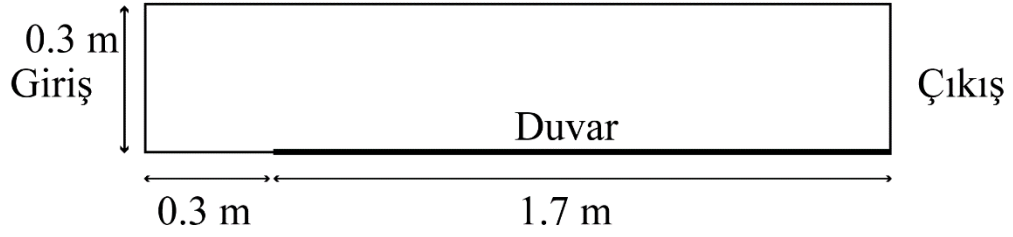
Simülasyonlarda kullanılan ağ yapısı ANSYS ICEM CFD tarafından oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ yapısı, uygun klasöre bağlı olan terminal penceresine fluentMeshToFoam klasörünAdı.msh komutu ile OpenFOAM yazılımına okutulur. checkMesh komutu ile ağ yapısının OpenFOAM için uygunluğu denetlenir. Genel olarak açık kaynaklı yazılımlar diğer ticari yazılımlara göre daha ayrıntılı bir ağ yapısına ihtiyaç duyar. Örneğin Fluent'in hata vermeden çözüme başlayabildiği bazı maksimum en-boy oranlı ağ yapıları OpenFOAM için kaliteli bir ağ yapısı olarak görülmeyip hata vermesine neden olabilmektedir. Bu sebeple kıyaslama yapılacak ticari yazılımdan ayrı olarak geometriler için ayrıca bir ağ yapısı çalışmasına gerek duyulabilir.



Şekil 4.2 : (a) 120000 Elemanlı ağ yapısı, (b) Duvar dibindeki ağ yapısı.

Oluşturulmuş olan 120000 elemente sahip ağ yapısı görüntüsü Şekil 4.2(a)'da verilmiştir. Şekil 4.2 (a)'da analizin gerçekleştirildiği tüm alan verilmişken Şekil 4.2 (b)'de duvarın hemen üstüne yaklaştırılmış görüntüsü verilmiştir. Yakınlaştırılmış görüntüde ağ yapısının duvara yaklaştıkça sıklaştığı gözlemlenmektedir. Bunun sebebi düz plaka üzerindeki akışta meydana gelecek sınır tabakayı daha iyi çözümleyebilmektir.

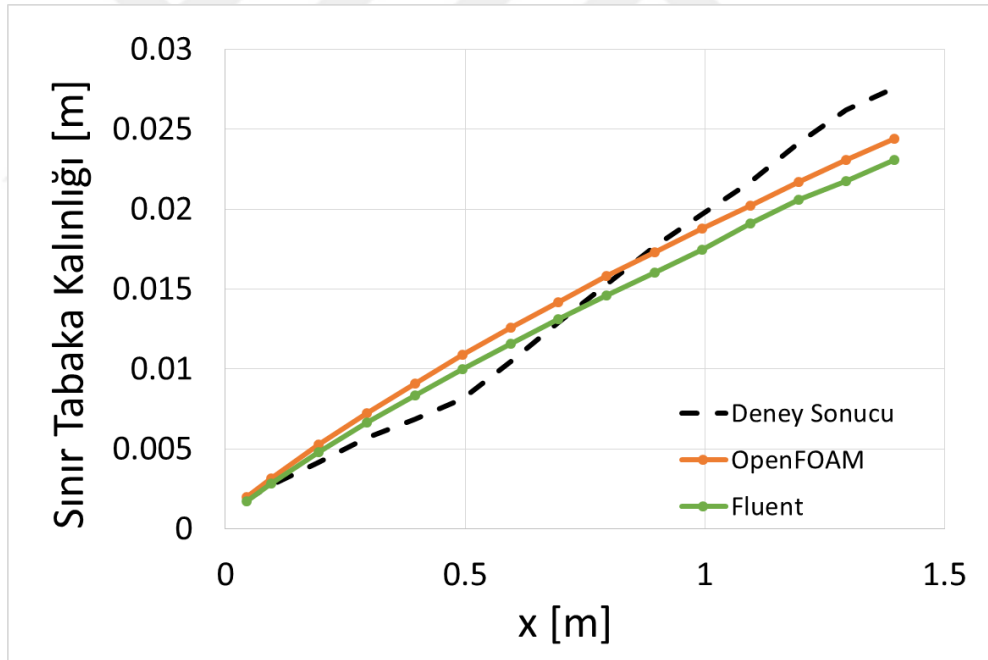
İki boyutlu olarak gerçekleştirilen analizlerde deney düzeneği temel alınarak oluşturulan geometri Şekil 4.3’de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.3 : Düz plaka geometrisi.

OpenFOAM yazılımı kullanılarak elde edilen simülasyon sonuçları, Fluent yazılımı simülasyon sonuçları ve deney bulguları ile birlikte aşağıdaki grafikler yardımıyla kıyaslanmıştır.

Şekil 4.4’te sınır tabakanın kalınlığı kıyaslaması yapılmıştır.

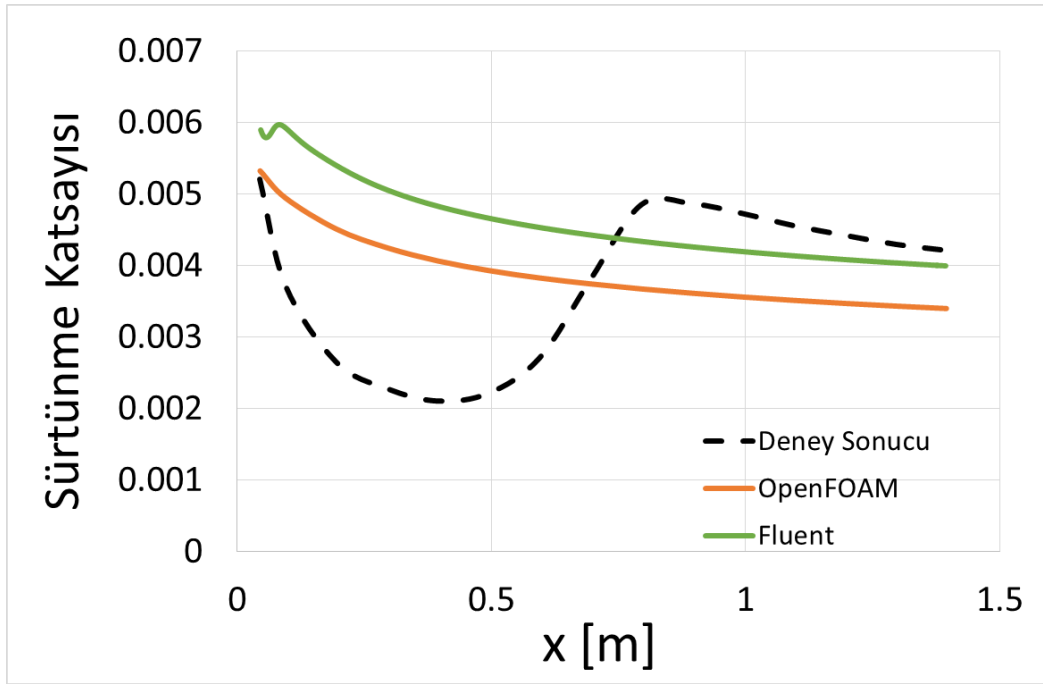


Şekil 4.4 : Sınır tabaka kalınlığı sonuçlarının deneyle kıyası.

Elde edilen sonuçlardan hızın, serbest akış hızının % 99’una ulaştığı noktadaki y değeri çekilmiştir. Bu akış problemi için hızın 5.36m/s ‘ye ulaştığı noktalar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan görüldüğü üzere iki yazılımla da birbirine yakın sonuçlar elde edilmiş olup deney bulgularıyla uygunluk göstermektedir.

Sınır tabakanın incelendiği simülasyon sonuçlarının kıyaslanabilmesi için boyutsuz değişkenler kullanılması aradaki farkları daha doğru yorumlayabilmek adına önemlidir. Bu nedenle düz plaka üzerinde sürtünme katsayısı, boyutsuz hız ve yükseklik değişkenleri incelenmiştir.

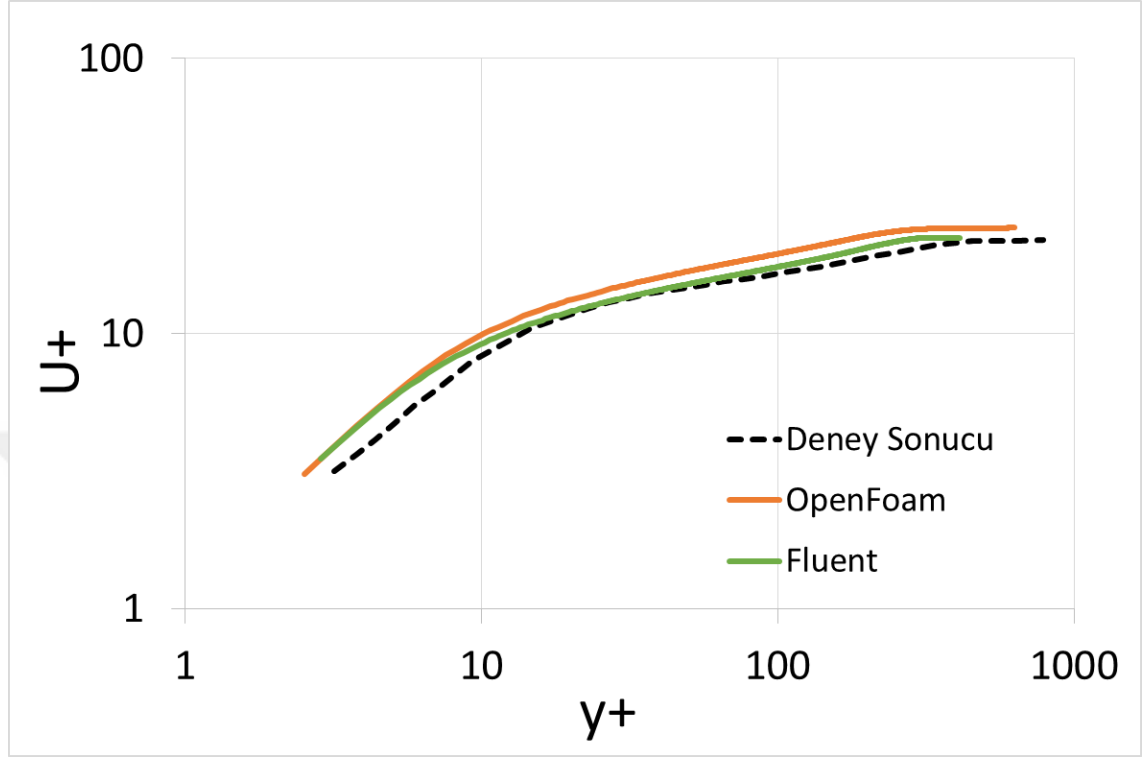
Şekil 4.5'te düz plaka üzerinde x-ekseninde uzunluğa göre değişen sürtünme katsayısı cinsinden OpenFOAM ve Fluent yazılımları kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ve deneysel bulguların sonuçlarının kıyaslandığı grafik verilmiştir.



Şekil 4.5 : Sürtünme katsayısı sonuçlarının deneyle kıyası.

Kullanılan türbülans modeli laminer bölgeden türbülanslı bölgeye geçiş arasında kalan bölgedeki (transition) değişimleri kullanılan programdan bağımsız olarak yeterince yakalayamamıştır.  $k-\omega$  türbülans modeli bu geçiş bölgesini özellikle yakalamak için kullanılmaz, genel olarak türbülanslı çözümler için kullanılır. Bu nedenle elde edilen sonuçlar beklenildiği gibidir. Ayrıca Şekil 4.5'e göre OpenFOAM, Fluent sonucuna yakın sonuçlar hesaplamıştır. Bahsi geçen geçiş bölgesi daha detaylı incelenmek istenirse bu geçiş bölgesini çözümler için iki yazılımda da kullanılan başka türbülans modelleri uygulanarak analizler tekrarlanabilir.

Şekil 4.6'da ise logaritmik boyutsuz hız ve y eksen uzunluğunun iki yazılım simülasyon sonuçları ve deneysel verilerle kıyaslanma grafiği verilmiştir.



Şekil 4.6 : Logaritmik boyutsuz hız ve y uzunluğu sonuçlarının deneyle kıyası.

Şekil 4.6'ya göre iki yazılımın da logaritmik boyutsuz hız ve y uzaklığının deneysel verilere çok yakın olduğu görülmektedir. Bu kıyaslama ile iki simülasyon sonucunda da anlamlı değerler bulunduğu söylenebilir.





## 5. İKİ BOYUTLU KAVİTE SİMÜLASYONLARI VE DOĞRULAMASI

Kaufman vd. [10], kavite akışını incelemek için farklı serbest akış hızlarına ve farklı geometrik özelliklere sahip kaviteler için kapsamlı bir deneyler dizisi yapmışlardır. Bu deneylerin içinden 1.5 Mach sayısına sahip ve L/D oranı 5.07, L/W oranı 1.90 olan çalışma bu projede referans alınmıştır. Kavitenin geometrik özellikleri ve deney koşulları Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 : Deney koşulları.

Toplam Basınç	66.4 kPa
Toplam Sıcaklık	218 K
Mach Sayısı	1.5
Reynolds Sayısı	$1.09 \times 10^6$
Sınır Tabaka Kalınlığı	0.0051 m
Kavite Uzunluğu	0.12065 m
Kavite Derinliği	0.0238 m
Kavite Genişliği	0.0635 m

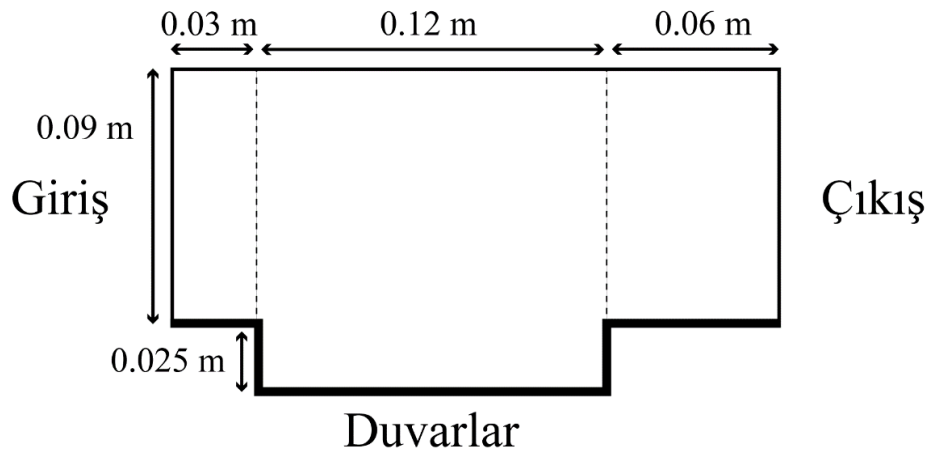
Süpersonik kavite akış simülasyonları Kaufman vd.’nin bahsedilen deneysel çalışmaları kullanılarak doğrulanmıştır. Simülasyon çalışmalarında en doğru sonucu elde edebilmek amacıyla öncelikle ağ çalışması yapılmıştır. Daha sonra OpenFOAM yazılımını daha iyi tanıyabilmek adına en iyi sonucu veren ağ yapısı kullanılarak bazı özellikler diğer parametreler sabit tutularak değiştirilmiş ve simülasyon sonuçlarına olan etkileri gözlemlenmiştir. Bu bölümde sınır koşulları ve yapılan çalışmalar aşağıdaki başlıklar altında incelenmiştir.

- Sınır koşulları,
- Ağ yapısı çalışması,
- Zamanda ayırıklaştırma yönteminin akışa etkileri,
- Ayırıklaştırma şemalarının akışa etkileri,
- Rahatlatma faktörünün akışa etkileri,
- Tolerans büyüklüğünün akışa etkileri.

Bölüm sonunda elde edilen çıkarımlar sonucunda en iyi sonuç vermesi beklenen özellikler seçilerek simülasyon yenilenmiştir ve sonuçlar Fluent yazılımı ile kıyaslanmıştır.

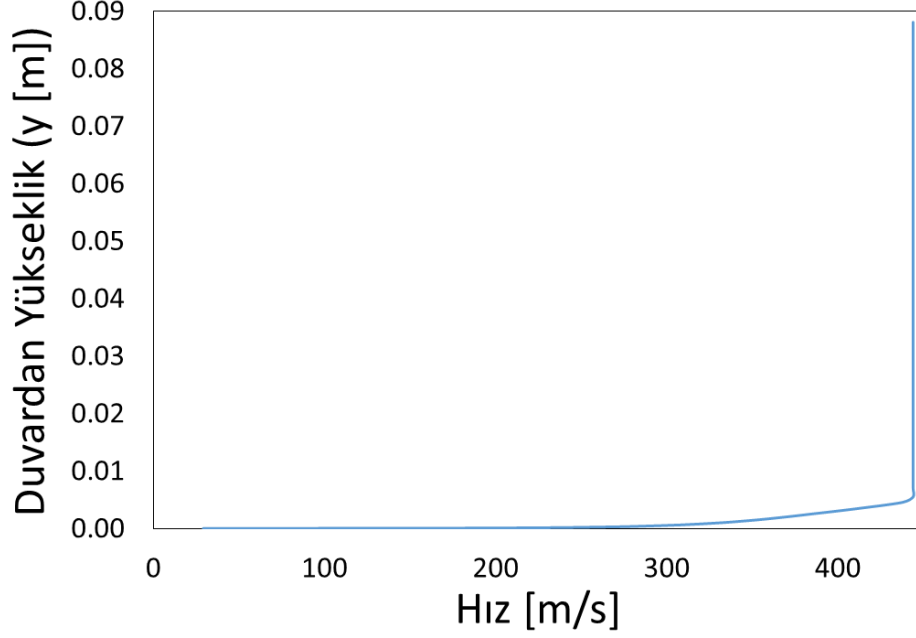
### 5.1 Sınır ve Başlangıç Koşulları

Simülasyonların gerçekleştirildiği akış türbülanslı bir akış olduğundan girişe verilen sınır koşulunda akışın türbülanslı sınır tabakasının gelişmiş halde olması gerekmektedir. Aksi durumda sınır tabakasının gelişimi analize verilen geometri üzerinden başlayacaktır ve elde edilen sonuçlar güvenilir olmayacaktır. Bu nedenle girişte 7 metre uzunluğunda bir düz plaka simülasyonunun sonucu olan hız profili hız sınır koşulu olarak belirlenmiştir. Kavite geometrisi ve sınırlar Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : Kavite geometrisi.

Geometride kavitenin iç bölgesi hariç geneline uygulanan hız profilinin duvardan mesafeye bağlı grafiği Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 : Hız – duvardan uzaklık grafiği.

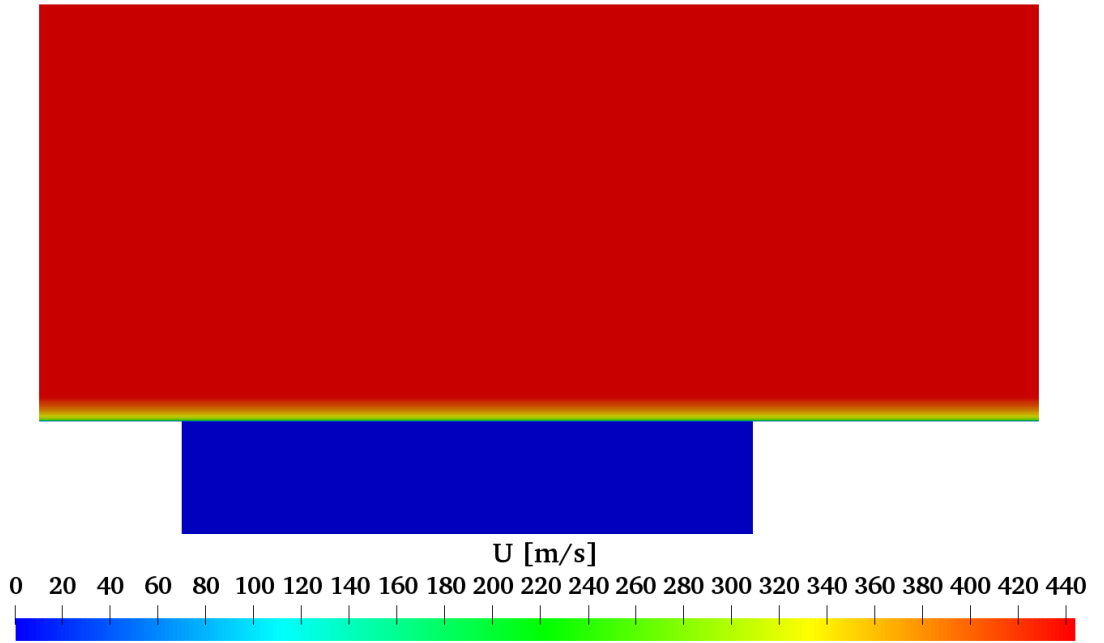
Yapılan çalışmalarda öncelikle birinci dereceden yöntemler kullanılmış, zamanda 0.005 saniye ilerledikten sonra elde edilen sonuçlar ikinci dereceden yöntemlerin kullanıldığı analiz için başlangıç koşulu olarak verilmiştir. Böylelikle analizin en düzensiz kısmı olan ilk başında ikinci dereceden şema kullanımı nedeniyle hata oranının çok yükselerek analizin durmasının önüne geçilmeye çalışılmış ve yapılan simülasyonların yakınsamasını arttırmak hedeflenmiştir. Hesaplamalarda kullanılan değişkenlerin her biri için uygulanan sınır koşulları Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

OpenFOAM yazılımının kullanımında simülasyona başlamak için başlangıç koşulu olarak analizin yapılacağı alanı temsil eden bir tahmin girilmesi gerekmektedir. Çözüm alanının iç bölgesinde 0 m/s başlangıç tahmini yapmak bir süre sonra analizlerin durmasına sebep olmaktadır. Bunun nedeni çözümlerin sesüstü koşullar altında yapılmaya çalışılmasıdır. Bu sorun, girişe sınır koşulu olarak girilen hız profilini kavite içi hariç tüm çözüm alanına başlangıç tahmini olarak uygulanarak çözülmüştür. Kavite içerisi ise 0 m/s olarak tahmin edilmiştir.

Çizelge 5.2 : Kavite geometrisi sınır koşulları.

Değişken	Sınır	Sınır Koşulu
alphan [kg/ms]	Giriş	calculated 0
	Çıkış	calculated 0
	Serbest Akış	calculated 0
	Duvarlar	compressible:alphanWallFunction
k [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	Giriş	fixedValue nonuniform List<scalar>
	Çıkış	zeroGradient
	Serbest Akış	inletOutlet 0.251
	Duvarlar	kqRWallFunction
nut [m <sup>2</sup> /s]	Giriş	calculated 0
	Çıkış	calculated 0
	Serbest Akış	calculated 0
	Duvarlar	nutkWallFunction
omega [1/s]	Giriş	fixedValue nonuniform List<scalar>
	Çıkış	zeroGradient
	Serbest Akış	inletOutlet 19100
	Duvarlar	omegaWallFunction
P [kg/ms <sup>2</sup> ]	Giriş	fixedValue 17894
	Çıkış	waveTransmissive
	Serbest Akış	waveTransmissive
	Duvarlar	zeroGradient
T [K]	Giriş	fixedValue 218
	Çıkış	zeroGradient
	Serbest Akış	inletOutlet 218
	Duvarlar	fixedValue 304.8
U [m/s]	Giriş	fixedValue nonuniform List<vector>
	Çıkış	zeroGradient
	Serbest Akış	supersonicFreestream
	Duvarlar	noSlip

Çözüm alanına uygulanan hız başlangıç tahmin konturu Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



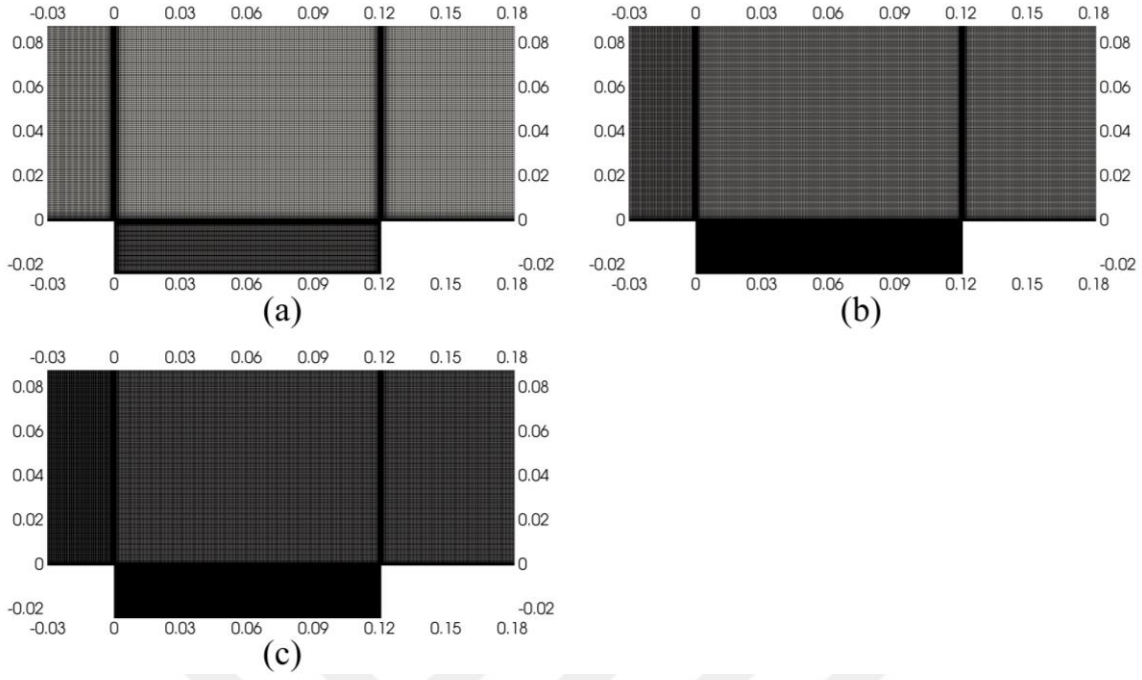
Şekil 5.3 : Çözüm alanı hız başlangıç tahmin konturu.

## 5.2 Ağ Yapısı Çalışması

Bu çalışmada üç farklı ağ yapısı kullanılmıştır. Ağ yapıları ANSYS – ICEM CFD kullanılarak oluşturulmuştur. Özellikle kavite içerisinde ve duvarlara yakın bölgelerde ağ sıklığının yoğun olmasına dikkat edilmiştir. Yapılan ağ yapısı çalışmasında kullanılan ağ şekilleri Şekil 5.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3’te kullanılan ağ yapılarının hücre sayısı, yüzey sayısı maximum en-boy oranı ve ilk hücre uzunlukları hakkında bilgiler verilmiştir.

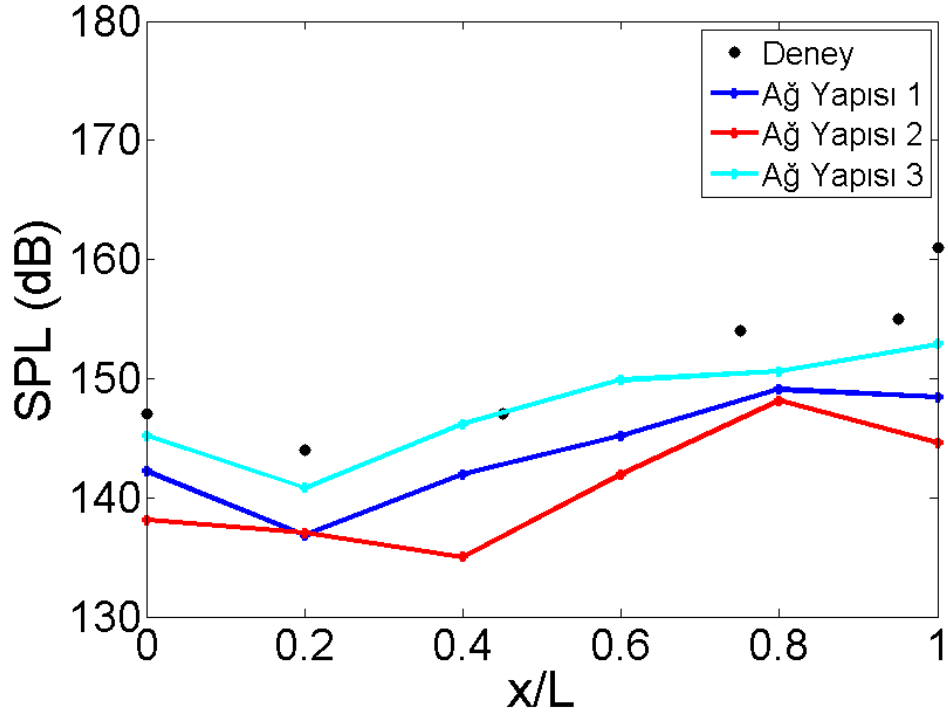
Kullanılan ağ yapıları için sırasıyla  $10^{-7}$ ,  $8 \times 10^{-8}$  ve  $5 \times 10^{-8}$  zaman adımı kullanılmıştır ve tümünde zamanda 0.02 saniyeye gidilmiştir. Ağ yapılarını birbirleriyle ve deneysel çalışma sonuçlarıyla kıyasayabilmek adına kullanılan ses basınç seviyesi-konum grafiği Şekil 5.5’te verilmiştir.



Şekil 5.4 : (a) Ağ yapısı 1 (b) Ağ yapısı 2 (c) Ağ yapısı 3.

Çizelge 5.3 : Ağ yapıları ile ilgili bilgiler.

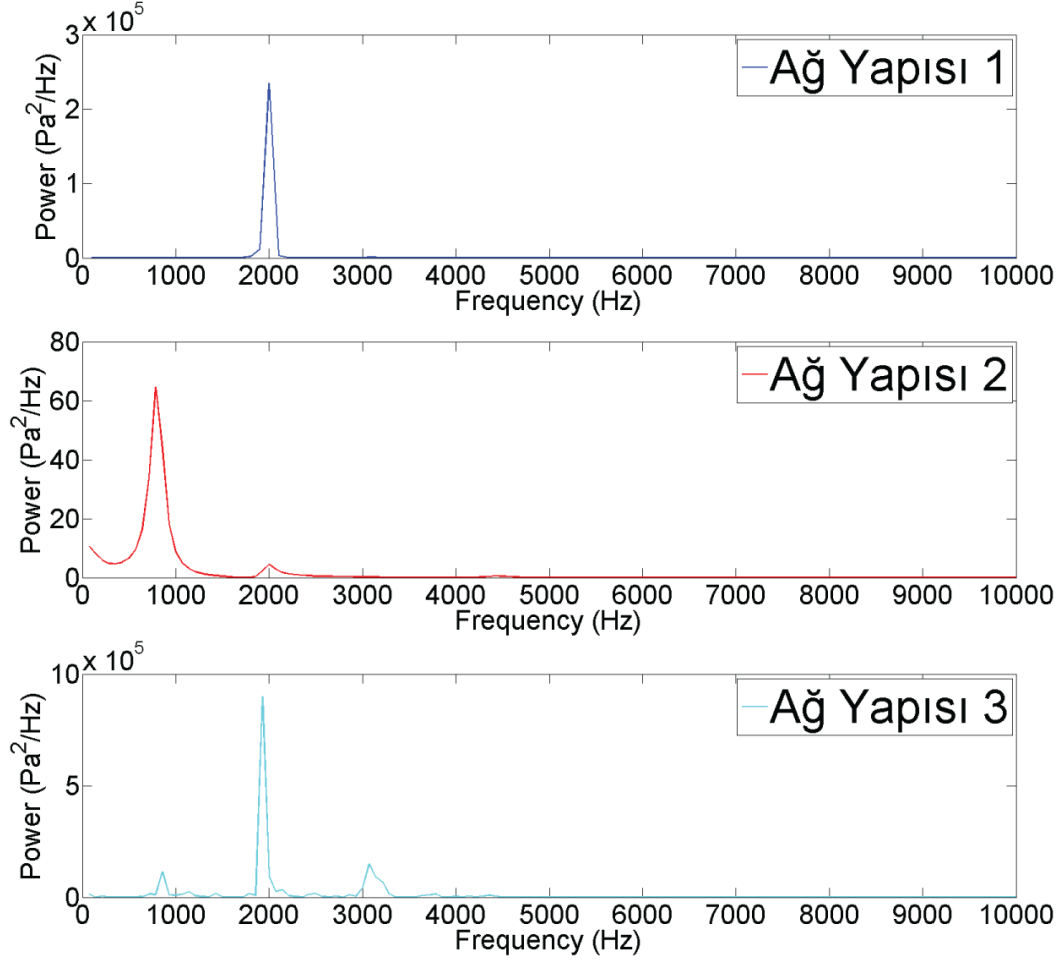
Ağ Yapısı	Hücre Sayısı	Yüzey Sayısı	Maksimum Boy-En Oranı	İlk Hücre Uzunluğu
1	65444	262367	16.1	$5 * 10^{-5}$
2	148024	592985	10	$5 * 10^{-5}$
3	263844	1056563	7.3	$5 * 10^{-5}$



Şekil 5.5 : Ağ yapılarının deney ile alt duvar ses basınç seviyesi kıyası.

Kullanılan üç ağ yapısında da sonuçların genel yönelimi deneysel çalışma sonucuna uygunluk göstermektedir. Yapılan literatür çalışmalarından çıkarılan sonuca göre kavite arka duvarında en yüksek basınç değerleri gözlemlenmektedir. Bu nedenle arka duvar üzerinde ani bir SPL yükselişi görülmektedir. Ağ yapılarının simülasyon sonuçlarını yönelim olarak birbirinden en çok ayıran bölge de beklendiği üzere arka duvara yakın bölgedir. Bu artışı yakalamada en başarılı olan Ağ yapısı 3'tür. Yönelimi daha iyi yakalamasının yanı sıra deneysel çalışma verilerine de diğer ağ yapılarından çok daha fazla yaklaşmıştır.

Şekil 5.6' da farklı ağ yapısı simülasyon sonuçlarının güç spektrumu kıyaslanmıştır. Çizelge 5.4'de ise bu simülasyonlar sonucunda tahmin edilen ilk modun frekans değerleri Rossiter formülasyonu ve geliştirilmiş Rossiter formülasyonu sonuçları ile kıyaslanmıştır.



Şekil 5.6 : Ay yapısı çalışması güç spektrumu kıyaslaması.

Çizelge 5.4 : İlk mod için frekans değeri kıyaslaması.

Ağ Yapısı	Rossiter Formülasyonu (Hz) (1)	Geliştirilmiş Rossiter Formülasyonu (Hz) (2)	Sayısal değer (Hz)	(1) ile Fark (%)	(2) ile Fark (%)
1	748.6	815.3	2000	167	145
2	748.6	815.3	785.7	4.95	3.6
3	748.6	815.3	857.1	14.5	5.12



Yapılan bu çalışmaya göre Rossiter formülasyonu frekans değerine en çok ağ yapısı 2 ile yaklaşılsa da aynı zaman aralığında alınan verilerin kullanıldığı güç spektrumu grafiğinde henüz kararlı hale gelmediği görülmektedir. Alt duvar üzerindeki ses basınç seviyesi dağılımı ve frekans değerleri göz önüne alındığında yapılacak olan simülasyon çalışmalarına ağ yapısı 3 ile devam edilmesi uygun bulunmuştur.

Simülasyonların gerçekleştirildiği bilgisayarın özellikleri aşağıdaki gibidir.

- İşlemci: Intel(R) Xeon(R) E5-2640v3 – 2.60GHz x32
- Yüklü Bellek : 58.4 GB
- İşletim Sistemi : 64 bit

Simülasyonların süreleri Çizelge 5.5'te verilmiştir. Kullanılan ağ yapısında hücre sayısının artması ile beklendiği üzere bilgisayar hesaplama süresini uzamıştır.

Çizelge 5.5 : Ağ yapıları simülasyon süreleri.

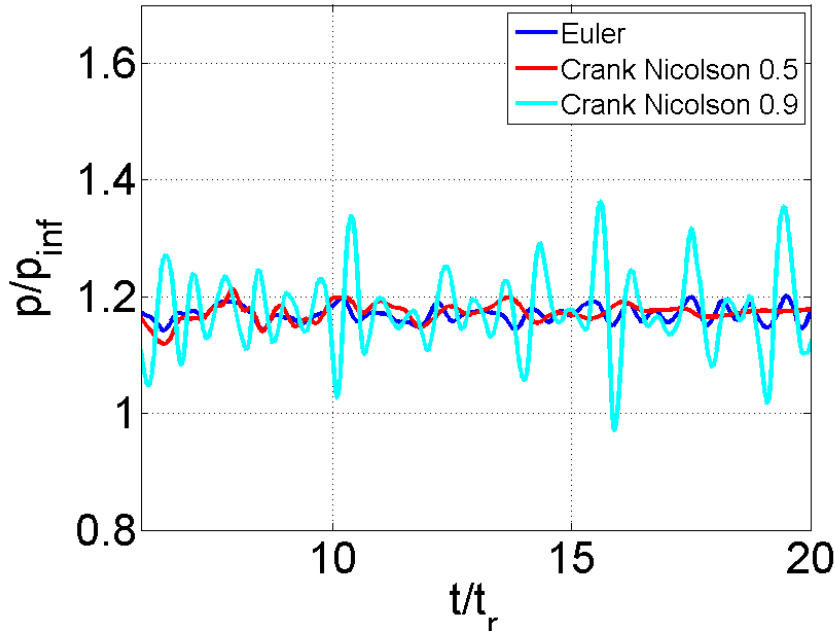
	Ağ yapısı 1	Ağ yapısı 2	Ağ yapısı 3
Saniye	93 508	293 478	519 188
Saat	25.9	81.5	144.2
Gün	1.08	3.4	6.01

### 5.3 Zamanda Ayırıklaştırma Yönteminin Akışa Etkileri

Zamanda ayırıklaştırma yöntemleri olarak Euler, CrankNicolson 0.5 ve CrankNicolson 0.9 kullanılmıştır. Crank Nicolson şemasının kullanımında yanına yazılan, 0-1 arasında değişen sayı geçişme faktörüdür. Bu sayı 0'a yaklaştıkça şema Euler'e eşit olurken, 1'e yaklaştıkça salt Crank Nicolson şemasına eşitlenir. Euler daha sağlam bir yöntem olmasına rağmen yakınsaması birinci derecedendir. Crank Nicolson ise salınmaya daha eğimli bir yöntem olup, yakınsaması ikinci derecedendir.

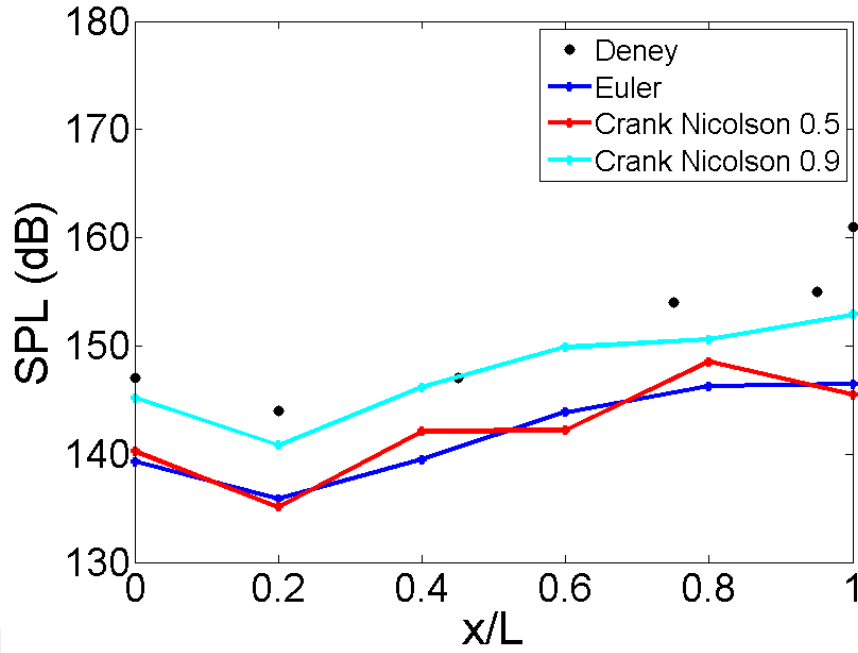
Yapılan çalışmada zamanda ayrıklaştırmada kullanılan bu üç yöntemin simülasyon sonuçlarına olan etkileri araştırılmıştır.

Şekil 5.7’de kavitenin arka duvarı üzerinde kritik olarak belirlenmiş bir noktadan alınan basınç verileri zamana göre çizdirilmiştir. Grafiğin x-eksenindeki zaman simülasyon sonucunda elde edilen 1 Rossiter periyoduna bölünerek boyutsuzlaştırılmış olarak kullanılmıştır. Grafiğin y-eksenindeki basınç ise serbest akış basıncına bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır.



Şekil 5.7 : Kavite arka duvarında 0.6 noktası basınç-zaman grafiği.

Kavitenin arka duvarının uzunluğu 1 birim olarak kabul edilirse 0.6’ya denk gelen kısımdan basınç verileri toplanmıştır. Euler yönteminin birinci dereceden olması ve yitirgen hata üretmesi sonucu basınç salınımlarının genliği azalmış ve elde edilen sonuçlar ikinci dereceden bir yönteme göre çok daha sönümlenmiş görülmektedir. Şekil 5.8’de farklı zamanda ayrıklaştırma yöntemleri kullanılarak elde edilen simülasyon sonuçları, kavite alt duvarında ses basınç seviyesi cinsinden hesaplanarak deney bulguları ile karşılaştırılmıştır.

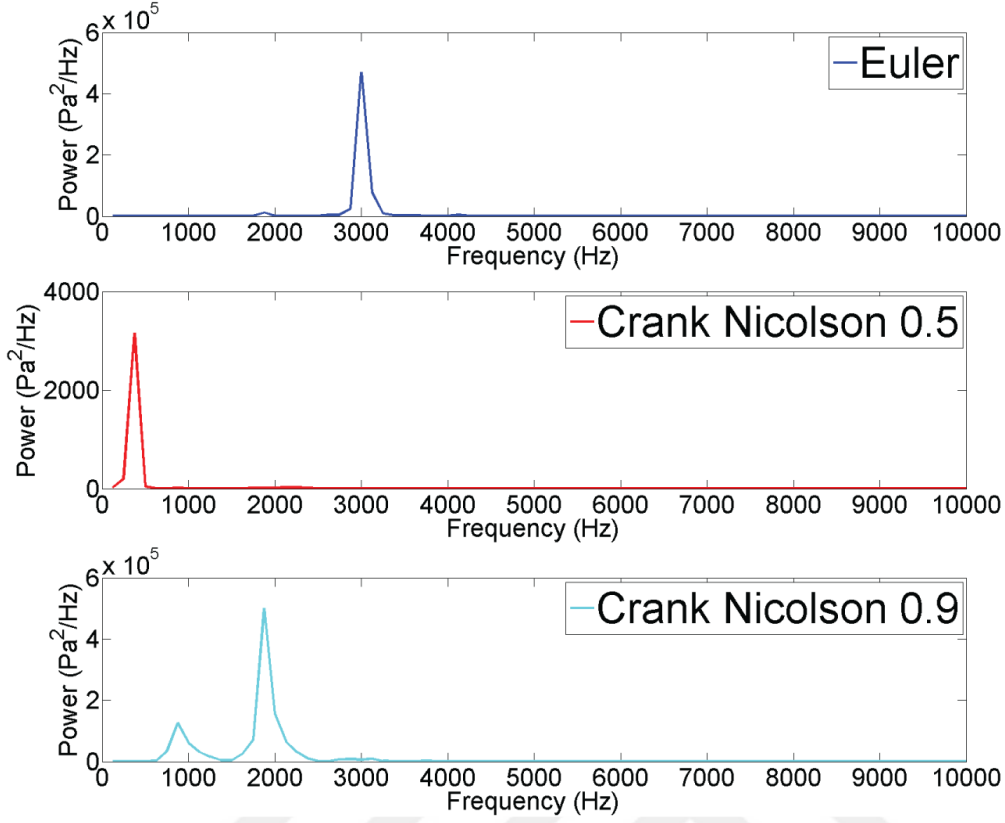


Şekil 5.8 : ddtScheme çalışması kavite alt duvarı SPL kıyaslaması.

Kullanılan Euler yöntemi ile sönümlenmiş olarak elde edilen basınç değerlerinden hesaplanan ses basınç seviyesinin sayısal değerleri Crank Nicolson 0.9 yöntemi ile hesaplanandan 8-9 dB kadar küçüktür. Simülasyon sonuçlarına göre ses basınç seviyeleri kıyaslandığında ikinci dereceden bir yöntem olan Crank Nicolson 0.9'un diğer yöntemlere göre deneysel sonuçlara hem yönelim hem sayısal değer olarak çok daha fazla yaklaştığı görülmüştür. Bu kıyaslama ile kullanılan ayrıklaştırma yönteminin hassasiyetinin birinci dereceden ikinci dereceye çıkarılmasının oluşturduğu ciddi fark gözlemlenmiştir.

Şekil 5.9'de zamanda ayrıklaştırma yöntemi çalışmasında elde edilen sonuçlara ait güç spektrumu grafiği verilmiştir. Kavite arka duvarındaki kritik, boyutsuz olarak 0.6'ya denk geldiği noktadan alınan basınç verilerine Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanmıştır. Grafiklerde elde edilen ilk tepe noktaları kavite içerisindeki en büyük girdabın hangi frekansta ve hangi güçte olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.9'de verilen güç spektrumu kıyaslaması grafiklerinin ilk modlarının sayısal değerleri ve geliştirilmiş Rossiter formülasyonu kullanılarak aralarındaki farklar Çizelge 5.6'te gözlemlenmiştir.



Şekil 5.9 : ddtScheme çalışması güç spektrumu kıyaslaması.

Çizelge 5.6 : İlk mod için geliştirilmiş Rossiter formülasyonu ile frekans değeri kıyaslaması.

ddtScheme	Geliştirilmiş Rossiter Formülasyonu (Hz)	Sayısal Değer (Hz)	Fark (%)
Euler	815.3	1875	129
Crank Nicolson 0.5	815.3	375	54
Crank Nicolson 0.9	815.3	875	7.3

En düşük frekansa sahip olan girdap, grafiklerdeki ilk tepe noktası, en büyük periyoda sahiptir ve bu periyot kavite akışında 1 Rossiter periyodunu temsil etmektedir. ddtScheme olarak Crank Nicolson 0.9 yönteminin kullanıldığı simülasyon sonuçları deneysel verilere dayanan geliştirilmiş Rossiter formülasyonu ile de kıyaslandığında en yakın sonucu vermiştir.

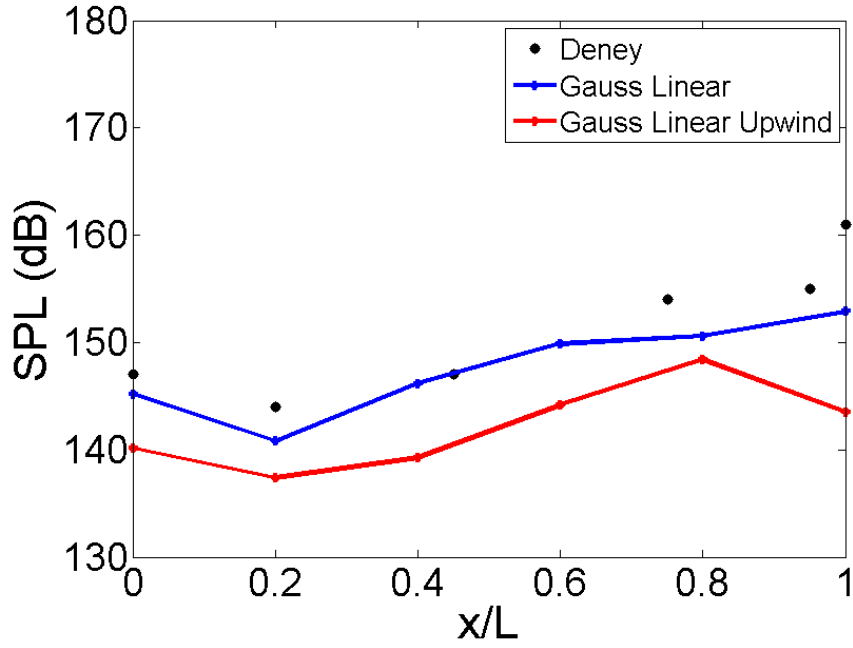
Yapılan kıyaslamalar doğrultusunda formülasyon ve deney sonuçlarına en çok yaklaşan yöntemin Crank Nicolson 0.9 yöntemi olduğuna karar verilmiş ve daha sonraki simülasyonlarda kullanılması uygun görülmüştür.

#### **5.4 Ayırıklaştırma Yöntemlerinin Akışa Etkileri**

Yapılan çalışmada dokuz adet bağıntı için divScheme seçilmesi gerekmektedir. Bunların her biri için “Gauss Linear” yöntemi seçilmiş ve bu yönteme Upwind uygulamanın etkileri araştırılmıştır. Yöntemin özellikleri ve Upwind etkisi daha önceki bölümlerde anlatılmıştır. İlk deneme olarak bütün terimler için yalnızca Gauss Linear uygulanmış fakat basınca bağlı hatanın artması nedeniyle analiz durmuştur. Bu nedenle bu dokuz değişkenden basınca bağlı olan ikisine Upwind yöntemi uygulanması gerekmiştir. Çoğunluğuna Gauss Linear uygulanan çalışma “Gauss Linear”, tüm terimlere “Upwind” eklenmiş çalışma ise “Gauss Linear Upwind” olarak adlandırılmıştır. Upwind eklemenin sonuca olan etkileri aşağıdaki grafikler yardımı ile incelenmiştir.

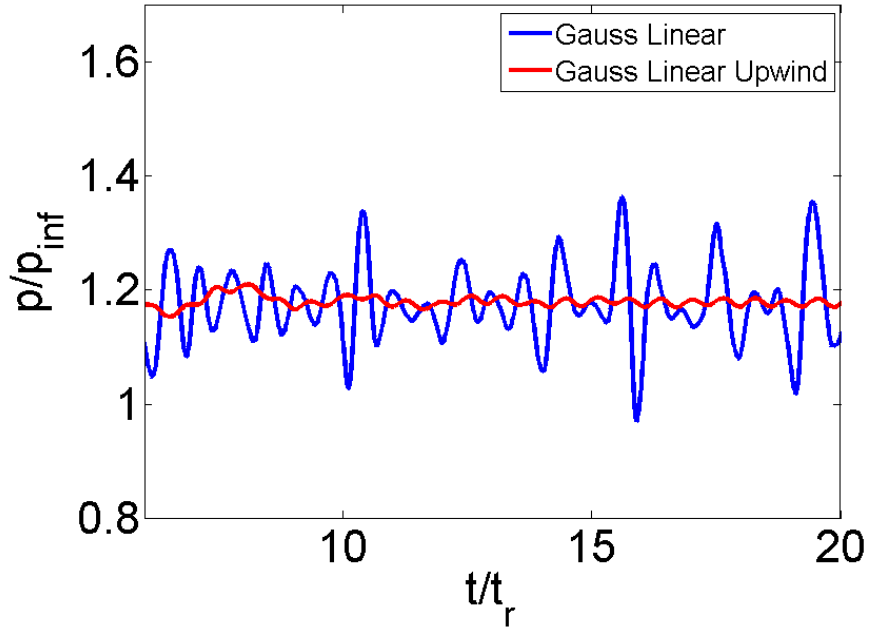
Şekil 5.10’da farklı ayırıklaştırma yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen kavite alt duvarı üzerindeki ses basınç seviyeleri deneysel bulgular ile karşılaştırılmıştır.

Kavite alt duvarı üzerindeki ses basınç seviyeleri açısından incelendiğinde Gauss Linear olarak adlandırılan çalışma deney verilerine Upwind yöntemi eklenmiş halinden çok daha yakın çıkmıştır. Hem sayısal değer olarak hem de sonuç çizgisinin yönelimi açısından bu kıyaslama türünde Gauss Linear yöntemi ile daha doğru sonuçlar elde edildiği söylenebilir. Bu beklenen bir sonuçtur. Yönteme “Upwind” eklenmesi ile çözüm için gerekli bilgi gelen akış yönünden alınır. Bu yöntem ile çözüm alanındaki salınımlar azalırken sönümlenmeye sebep olur.



Şekil 5.10 : divScheme çalışması kavite alt duvarı SPL kıyaslaması.

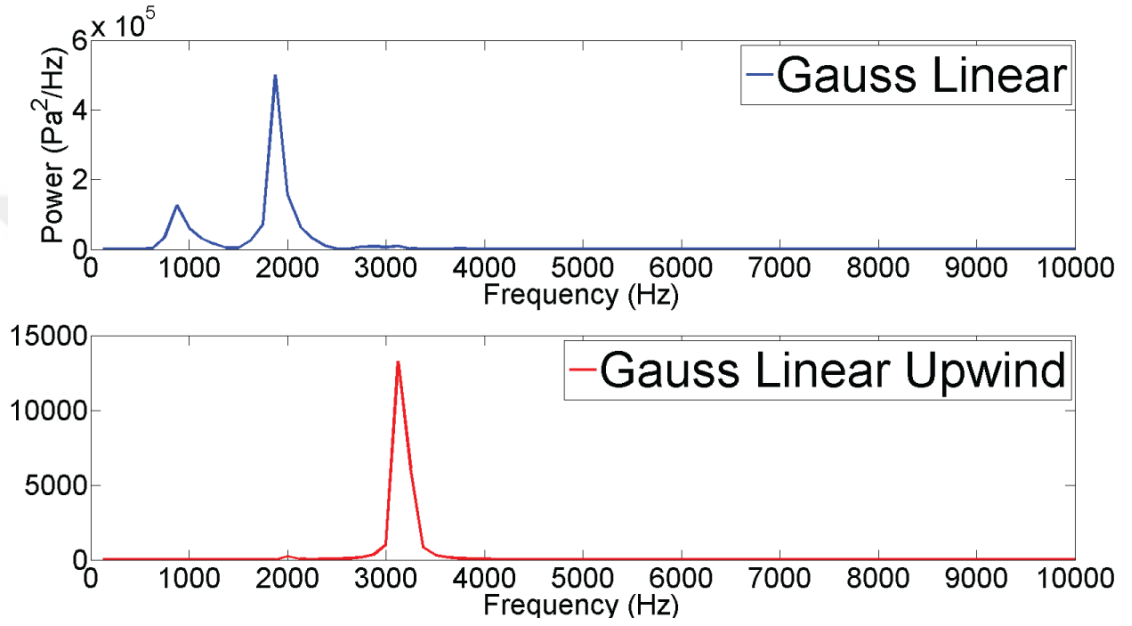
Şekil 5.11'da farklı ayrıklaştırma yöntemlerinin kullanıldığı simülasyon sonuçları kullanılarak kavitenin arka duvarı üzerinde kritik olarak belirlenmiş bir noktadan alınan boyutsuz basınç verileri boyutsuz zamana göre çizdirilmiştir.



Şekil 5.11 : Kavite arka duvarında 0.6 noktası basınç-zaman grafiği.

Kavite arka duvarında belirlenen lokasyondan alınan basınç verilerine göre Gauss Linear çalışmasında basınç salınımları daha düzenli ve periyodik dururken Upwind yöntemi eklenmiş hali beklendiği gibi salınımları azaltarak sonucun sönümlenmesine neden olmuştur.

Şekil 5.12’de ayrıklaştırma yöntemi çalışmasında elde edilen sonuçlara ait güç spektrumu grafiği verilmiştir.



Şekil 5.12 : divScheme çalışması güç spektrumu kıyaslaması.

Kavite arka duvarındaki kritik noktadan alınan basınç verilerine Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanmıştır. Sonuçların güç spektrumları kıyaslandığında Upwind yöntemi sebebiyle ilk modun çok daha yüksek (~3000 Hz ) frekanslarda meydana geldiği görülmüştür. Rossiter formülasyonlarına göre Gauss Linear simülasyon sonucundaki gibi 1000 Hz’in altında bir sayı değeri elde edilmesi beklenmektedir.

Yapılan kıyaslamalara göre Gauss Linear çalışmasının daha doğru sonuçlar verdiği düşünülmüş ve final çalışmasında bu çalışmadaki gibi basınca bağlı terimler hariç tümüne Gauss Linear yöntemi uygulanması uygun bulunmuştur.

## 5.5 Rahatlatma Faktörünün Akışa Etkileri

Rahatlama faktörü uygulanması, bir değişkenin bir iterasyondan diğerine değiştiği miktarı sınırlayarak, ya bir alanın çözümünden önce çözüm matrisini değiştirerek ya da doğrudan alanı değiştirerek çalışır. Rahatlatma faktörü,  $\gamma$ , 0 ile 1 arasında bir sayı olarak belirlenir ve ne kadar rahatlatma uygulandığını belirtir.

- $\gamma$  belirlenmemişse rahatlatma faktörü uygulanmıyor demektir.
- $\gamma = 1$ : baskınlık, garantili diyagonal matris eşitliği.
- $\gamma = 0$ : çözüm iterasyonlar ile değişime uğramaz.

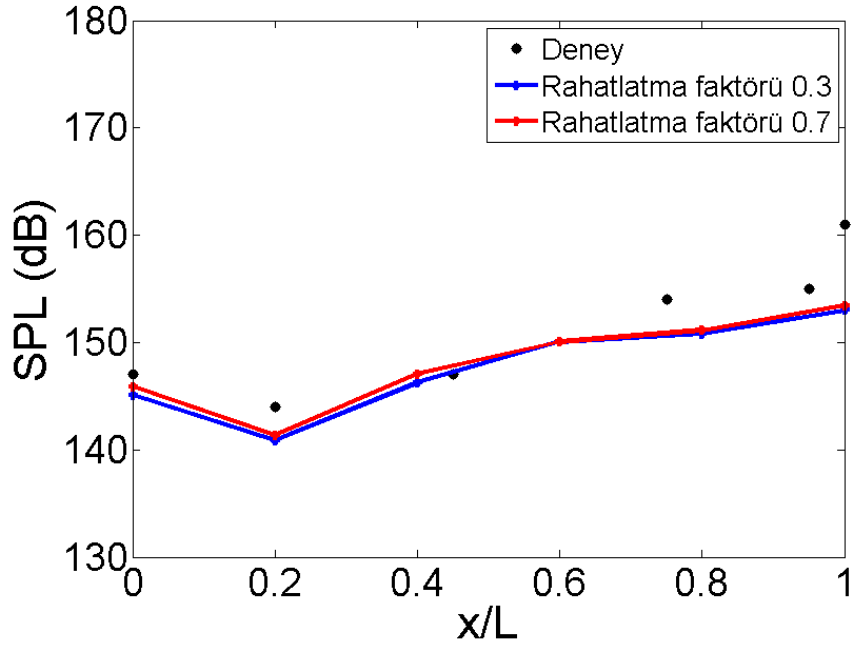
$\gamma$ 'nın azalması rahatlatmanın artması anlamına gelir. Optimum bir seçim, durağan hesaplamayı sağlamak için yeterince küçük ancak yinelemeli süreci hızlı bir şekilde ileriye taşımak için yeterince büyük olan bir seçenektir;  $\gamma$ 'nın 0.9 kadar yüksek olması bazı durumlarda kararlılığı sağlayabilir fakat çok daha düşük bir değere sahip olması durumunda, örneğin, 0.2 iteratif süreci yavaşlatmakta kısıtlayıcıdır.

Bu çalışmada incelenen konuda simülasyonlar yapılırken en çok sorun basınç değişkeninde yaşanmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada basınç değişkeni üzerine uygulanan rahatlatma faktörünün etkileri incelenecektir. Hız, türbülanslı kinetik enerji ve özgül yitim oranı değişkenleri için rahatlatma faktörü 0.7 olarak sabitlenmiştir. Basınç değişkeni için ise rahatlatma faktörü olarak 0.3 ve 0.7 kullanılmıştır.

Şekil 5.13'de farklı rahatlatma faktörleri kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen kavite alt duvarı üzerindeki ses basınç seviyeleri deneysel bulgular ile karşılaştırılmıştır.

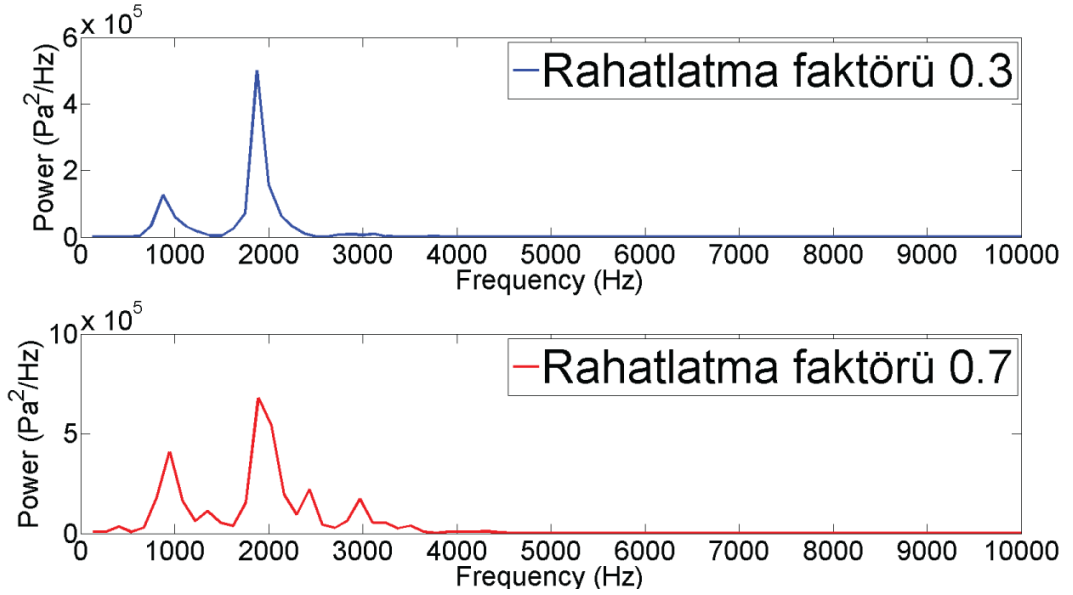
Ses basınç seviyeleri kıyasına göre iki çalışma birbirine ve deneysel bulgulara çok yakın sonuçlara ulaşmıştır. Elde edilen SPL grafiğine göre rahatlatma faktörü seçiminin kavite alt duvarındaki ses basınç seviyesi sonuçları üzerinde önemli bir etkisi yoktur.





Şekil 5.13 : Rahatlatma faktörü çalışması kavite alt duvarı SPL kıyaslaması.

Şekil 5.14'te rahatlatma faktörü çalışmasında elde edilen sonuçlara ait güç spektrumu grafiği verilmiştir. Kavite arka duvarındaki kritik noktadan alınan basınç verilerine Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanmıştır.



Şekil 5.14 : Rahatlatma faktörü çalışması güç spektrumu kıyaslaması.

Güç spektrumu kıyaslaması grafiklerine göre ilk ve ikinci modların frekansı iki simülasyon sonucunda da aynıdır. Buna göre rahatlatma faktörünün güç spektrumu sonuçları üzerinde de ayırt edici bir fark meydana getirmemiştir.

Yapılan kıyaslamalar sonucunda rahatlatma faktörünün sonuca olan etkileri çok belirgin olmadığı için simülasyon süreleri incelenmiştir. Çizelge 5.7’de yapılan çalışmaların simülasyon süreleri saniye ve gün olarak verilmiştir.

Çizelge 5.7 : Rahatlatma faktörü çalışması simülasyon süreleri.

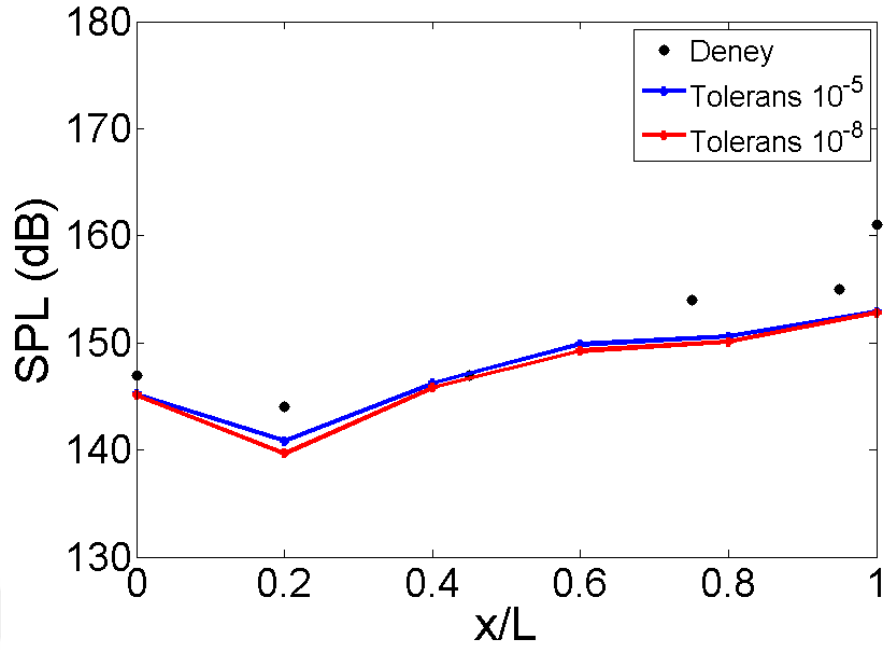
Rahatlatma faktörü/ zaman	0.3	0.7
Saniye	518 228	799 567
Gün	~ 6	~ 9.25

Rahatlatma faktörünün 0.3 alındığı durumda simülasyon yaklaşık 6 gün sürerken, 0.7 alındığında 9 günü geçmiştir. Simülasyon süreleri dikkate alındığında rahatlatma faktörünün 0.3 olarak kullanılması uygun görülmüştür.

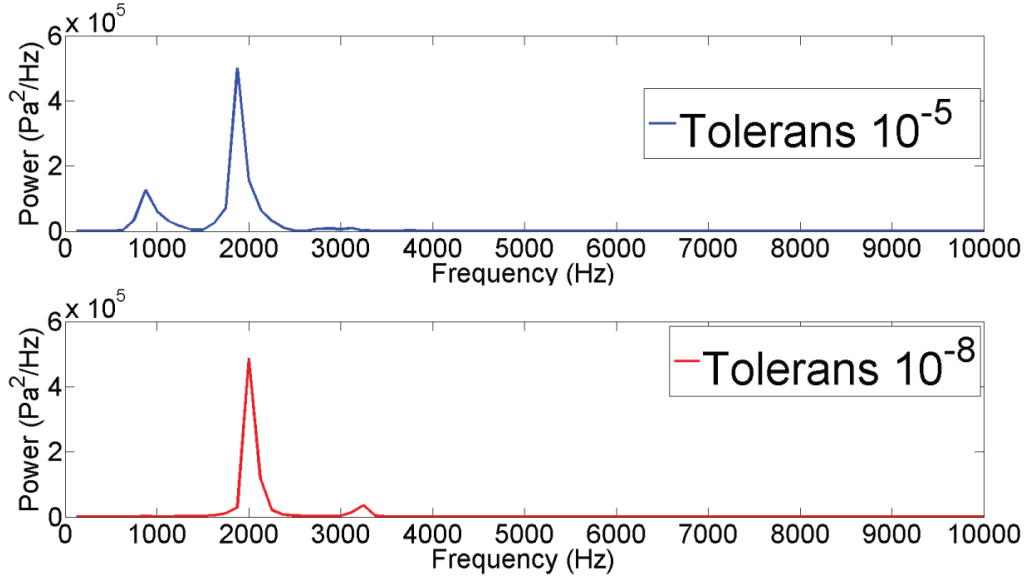
## 5.6 Tolerans Büyüklüğünün Akışa Etkileri

OpenFOAM yazılımında çözümler genellikle iteratiftir, yani denklemlerin ardışık çözümlerinde residual düşürmeye dayalıdır. Elde edilen residual çözümdeki hatanın bir ölçüsüdür, ne kadar küçükse çözüm sonuca o kadar yakınsıyor demektir. Denklemden elde edilen sonuç tekrar denklem içine yazılınca çıkan sonuçla arasındaki fark kullanılarak hesaplanır. Eğer bu iki sonuç arasındaki fark belirlenen bir sayıdan küçük çıkmaya başlarsa çözücü durur, simülasyon sonucu yakınsamış demektir. Fakat aradaki fark limitini çok fazla düşürmek başka sayısal hataların artmasına yol açabilir. Bu fark tolerans olarak adlandırılır. Bu çalışmada değişen tolerans değerinin çözüm üzerine olan etkileri araştırılmıştır.

Şekil 5.15’de farklı tolerans değerleri kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen kavite alt duvarı üzerindeki ses basınç seviyeleri deneysel bulgular ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.15 : Tolerans büyüklüğü çalışması kavite alt duvarı SPL kıyaslaması.



Şekil 5.16 : Tolerans büyüklüğü çalışması güç spektrumu kıyaslaması.

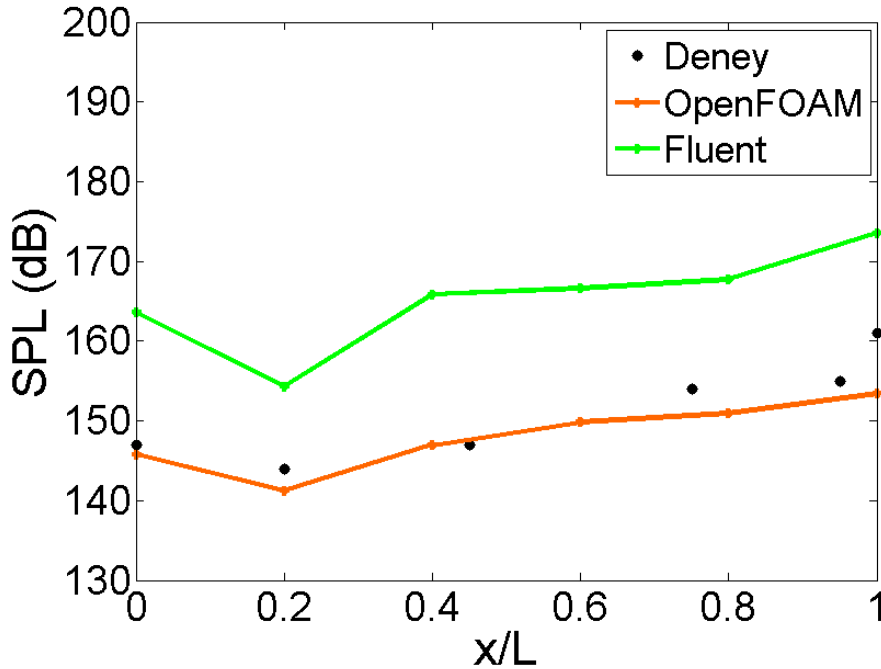
Elde edilen ses basınç seviyesi grafiğine göre iki çözüm arasında çok ciddi bir fark oluşmamıştır. Sonuçlar birbirine çok yakın olsa da tolerans sınırlaması  $10^{-5}$  olarak belirlenen çözüm deneysel bulgulara sayısal olarak biraz daha yakın olsa da asıl fark güç spektrumu kıyaslamasında ortaya çıkmaktadır. Şekil 5.16'te güç spektrumları kıyaslanmıştır.

Güç spektrumları kıyaslandığında tolerans limiti 10-8 olarak belirlenen çalışmada ilk modun frekansı beklenenin iki katına çıkmıştır. Bu durumu ilk modu yakalayamamış olması olarak da yorumlayabiliriz. Yapılan kıyaslamalar sonucunda son simülasyon için tolerans limitinin 10-5 olarak belirlenerek analizin yapılması uygun bulunmuştur.

### 5.7 Sonuçların Ticari Yazılımla Kıyaslanması

Bu çalışmada daha önceki bölümlerde yapılan çalışmalar doğrultusunda daha iyi sonuç veren özellikler seçilerek simülasyon kavite geometrisi üzerinde tekrarlanmıştır. Böylece OpenFOAM yazılımı kullanılarak simülasyonlardan elde edilebilen en iyi sonuca ulaşmak amaçlanmıştır. Simülasyon sonuçları ile kavite içerisindeki tüm duvarlar üzerindeki ses basınç seviyeleri kıyaslanmıştır.

Şekil 5.17’de kavite alt duvarında elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile kıyaslanmıştır. OpenFOAM ve Fluent yazılımları kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen kavite alt duvarı üzerindeki ses basınç seviyeleri deneysel bulgular ile karşılaştırılmıştır. \*Kıyaslamalarda kullanılan ANSYS-Fluent sonuçları Kübra Asena Gelişli’nin daha sonra yayınlanacak olan tez kapsamındadır.



Şekil 5.17 : Kavite alt duvarı ses basınç seviyesi kıyaslaması.

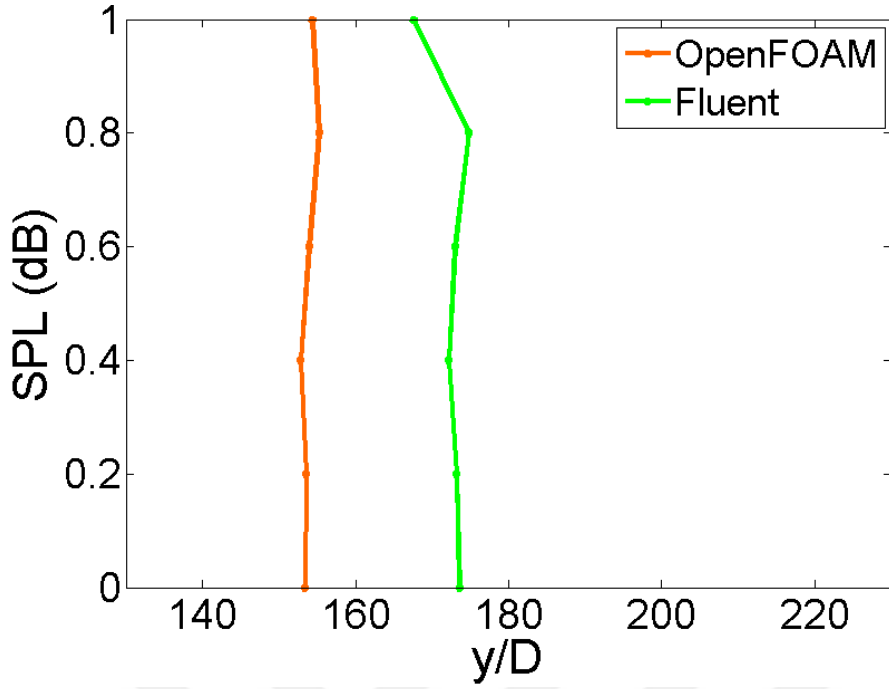
Şekil 5.17’de elde edilen grafiğe göre iki yazılımın sonuçlarının eğilimleri deneysel verilerle benzerlik göstermektedir. İki çözüm arasında ortalama olarak 13 dB’e yakın fark vardır ve Fluent yazılımı ile yapılan simülasyon daha büyük bir sonuca yakınsamıştır. Sayısal değerler göz önüne alındığında ise OpenFOAM yazılımı ile elde edilen sonuçlar deneysel verilere son derece belirgin bir şekilde daha yakındır. Deney bulguları ve iki yazılımın simülasyon sonuçlarının farkı Çizelge 5.8’de verilmiştir.

Çizelge 5.8 : Simülasyon sonuçları ile deney bulguları arasındaki fark.

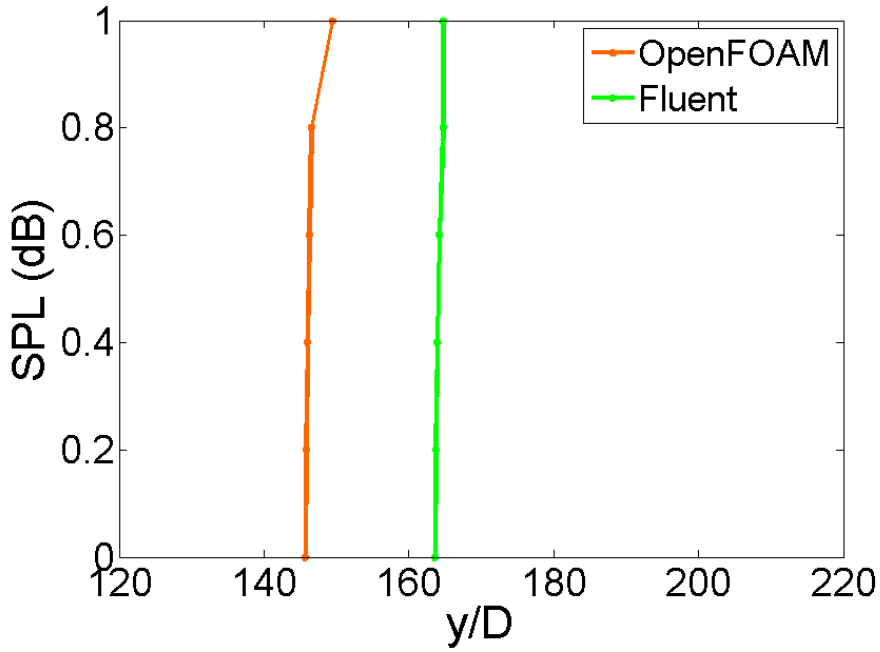
	Fluent	OpenFOAM	Deney	Fluent-Deney Farkı (%)	OpenFOAM-Deney Farkı (%)
1	164	146	147	11.6	0.7
2	154.5	142	144	7.3	1.4
3	166	147.5	147	12.9	0.3
4	167	151	154	8.4	1.9
5	172.5	153	155	11.3	1.3
6	173.5	154	161	7.8	4.3

Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’de iki ayrı yazılım kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlarda sırasıyla arka ve ön duvarlardaki ses basınç seviye sonuçları birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’de ses basınç seviye ölçümü ön ve arka duvarlarda yapılmıştır. İki grafikte de simülasyon sonucu çizgileri yönelim olarak birbirlerine benzemektedir. Alt duvarda görülen 13 dB’lik fark bu duvarlarda 17–18dB civarındadır ve yine Fluent yazılımı ile yapılan simülasyon daha büyük sonuca yakınsamıştır.

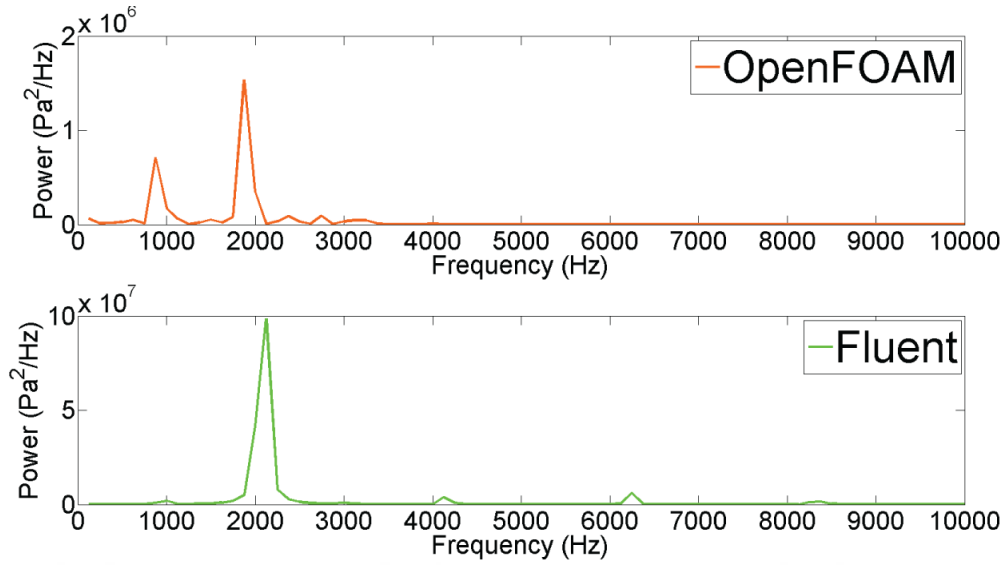


Şekil 5.18 : Kavite arka duvarı ses basınç seviyeleri kıyaslaması.



Şekil 5.19 : Kavite ön duvarı ses basınç seviyeleri kıyaslaması.

Şekil 5.20’de iki yazılımın simülasyon sonuçlarının güç spektrumları kıyaslanmıştır. Çizelge 5.9’de ise ilk modların frekans değerlerinin geliştirilmiş Rossiter formülasyonu ile farkları gösterilmiştir.



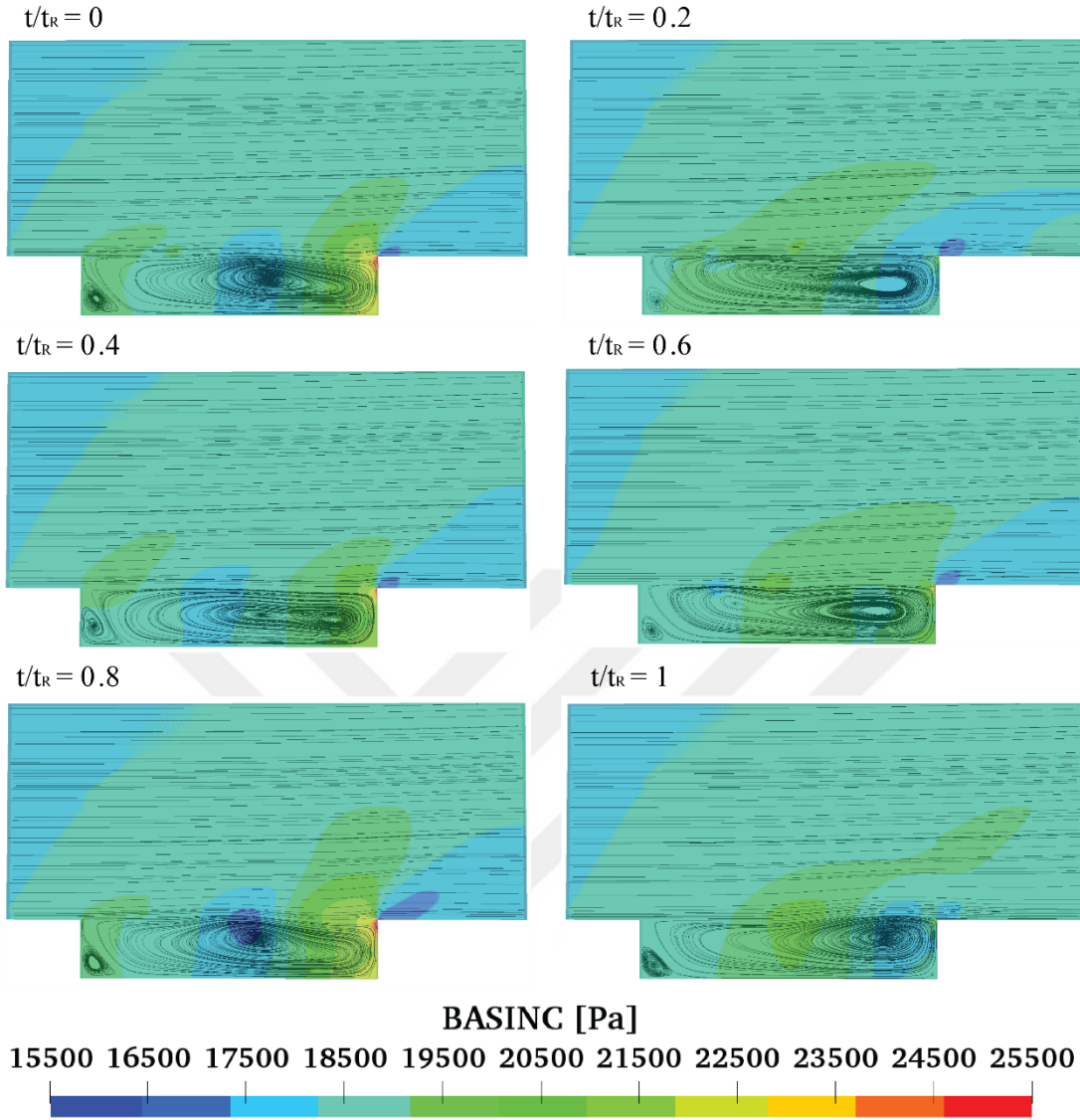
Şekil 5.20 : Güç spektrumu kıyaslaması.

Çizelge 5.9 : İki yazılımın ilk mod için geliştirilmiş Rossiter formülasyonu ile frekans değeri kıyaslaması.

Yazılım Adı	Geliştirilmiş Rossiter Formülasyonu (Hz)	Sayısal Değer (Hz)	Fark (%)
OpenFOAM	815.3	875	7.3
Fluent	815.3	1000	22.65

Çizelge 5.9 ve Şekil 5.20’da gösterilen güç spektrumu kıyaslaması ve ilk modların frekanslarının geliştirilmiş Rossiter formülasyonu ile kıyaslama sonucuna göre OpenFOAM yazılımı simülasyon sonucu, deneysel formülasyondan elde edilene Fluent yazılımı simülasyon sonuçlarından çok daha yakındır.

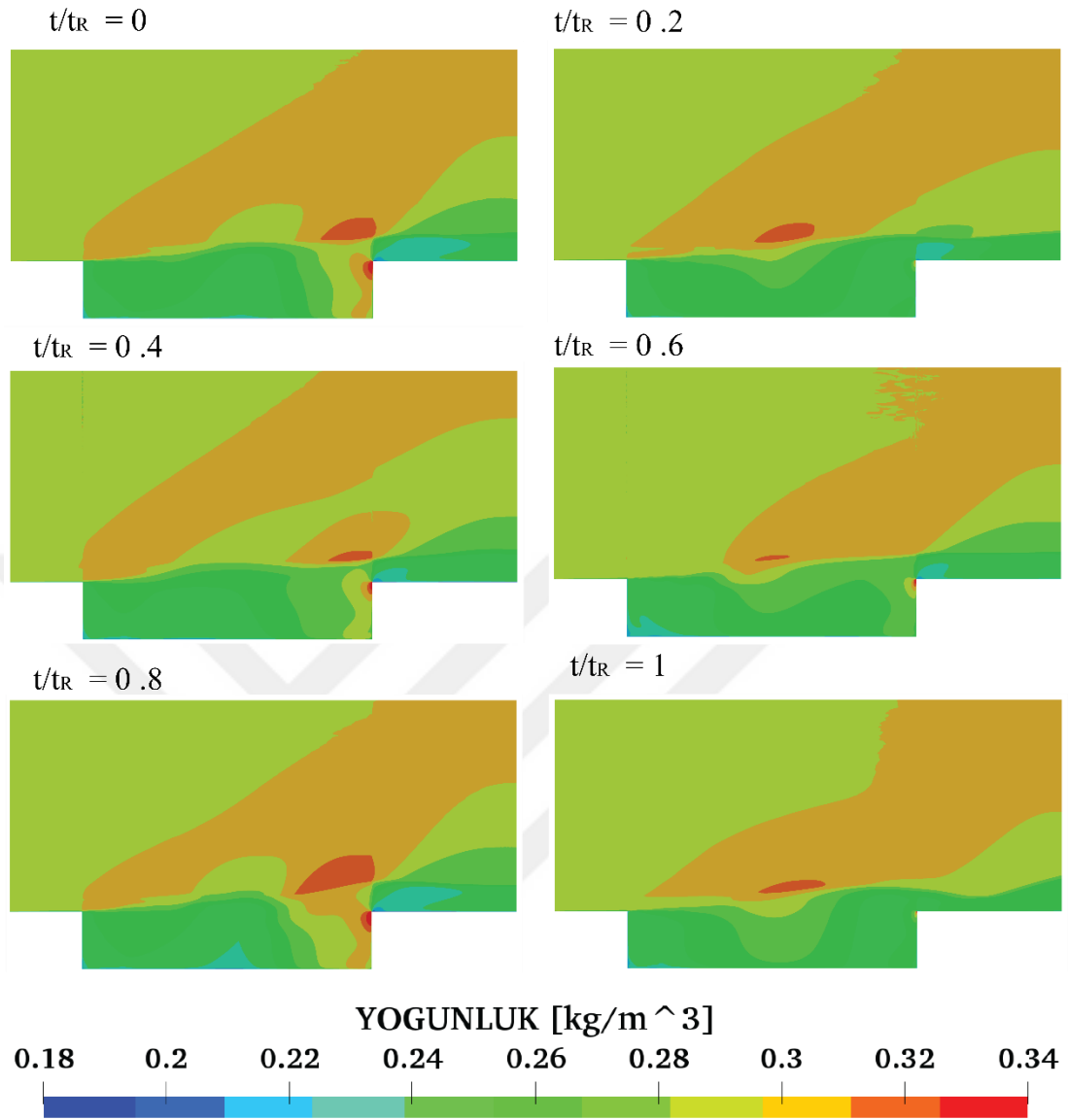
OpenFOAM simülasyon sonucuna göre çözüm alanı içerisinde basınç dağılımı üzerine akım çizgileri, yoğunluk dağılımı ve sıcaklık dağılımı değişimleri sırasıyla Şekil 5.21, Şekil 5.22 ve Şekil 5.23’de gösterilmiştir. Bu akışın Rossiter periyodu simülasyonlar sonucunda 875 Hz olarak tahmin edilmiştir. Zaman adımının  $5 \times 10^{-8}$  kullanıldığı simülasyonlarda 1 Rossiter periyodu yaklaşık olarak 22850 zaman adımına denk gelmektedir.



Şekil 5.21 : Kavite akışı akım çizgileri ve basınç dağılımı [Pa].

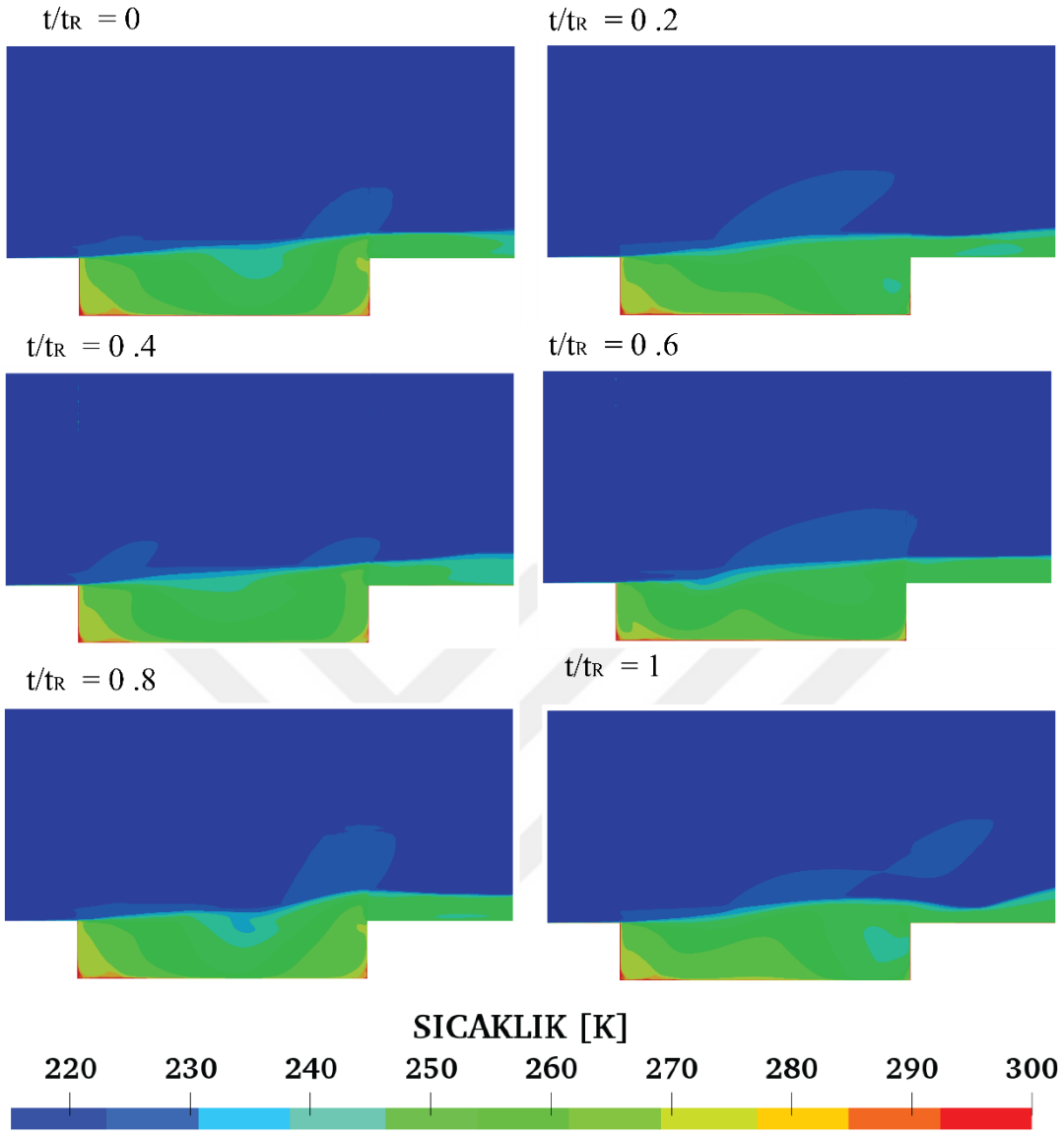
Şekil 5.21’de akım çizgileri incelendiğinde kavitenin hücum kenarında başlayıp firar kenarında biten kayma tabakası gözlemlenmektedir. Kavite geometrisi içerisinde ise girdap yapılanmaları oluşumu görülmüştür ve genele bakıldığında iki adet büyük girdap dikkat çekmektedir. Bu iki girdaptan arka duvara yakın olanı daha büyük bir yapıya sahiptir. Bu girdaplardan biri çözülmeye başladığında diğer girdabın gelişiminin başladığı, gelişen girdap en son halini aldığı anda önceki girdabın yok olduğu görülmüştür. Ayrıca alt duvar üzerinde daha küçük ölçekli girdap oluşumları da göze çarpmaktadır.





Şekil 5.22 : Kavite akışı yoğunluk dağılımı [kg/m<sup>3</sup>].

Şekil 5.22’de verilen çözüm alanı içerisindeki yoğunluk dağılımı incelendiğinde basınç dalgalarının görüldüğü yerlerde yoğunluğun da daha yüksek olduğu fark edilmiştir. Bu durumdan yola çıkarak basınç dalgalarının olduğu bu bölgelerde akışın sıkıştığı yorumu yapılabilmektedir.

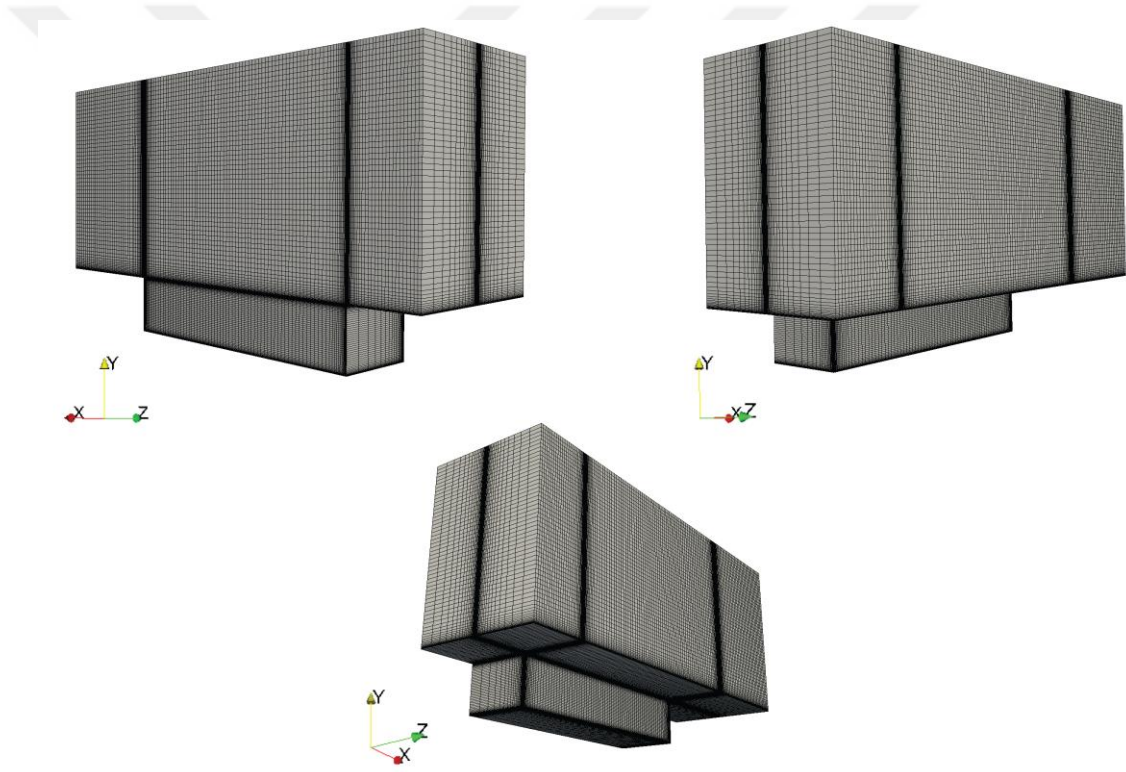


Şekil 5.23 : Kavite akışı sıcaklık dağılımı [K].

Şekil 5.23'de kavite içerisindeki sıcaklık dağılımı Kelvin cinsinden gösterilmiştir. Akış alanında çok yüksek sıcaklıklar görülmesiyle birlikte en yüksek sıcaklık arka duvarda oluşmaktadır

## 6. ÜÇ BOYULU KAVİTE SİMÜLASYONLARI

Süpersonik kavite akışında üçüncü boyutun etkisini araştırmak amacıyla üç boyutlu simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu kavite geometrisi z-ekseninde orta düzleme göre simetriktir. Bu durum göz önünde tutulup bilgisayarların hesaplama sürelerinin daha makul bir seviyede tutulması için akış alanının bir yarısı modellenmiştir.

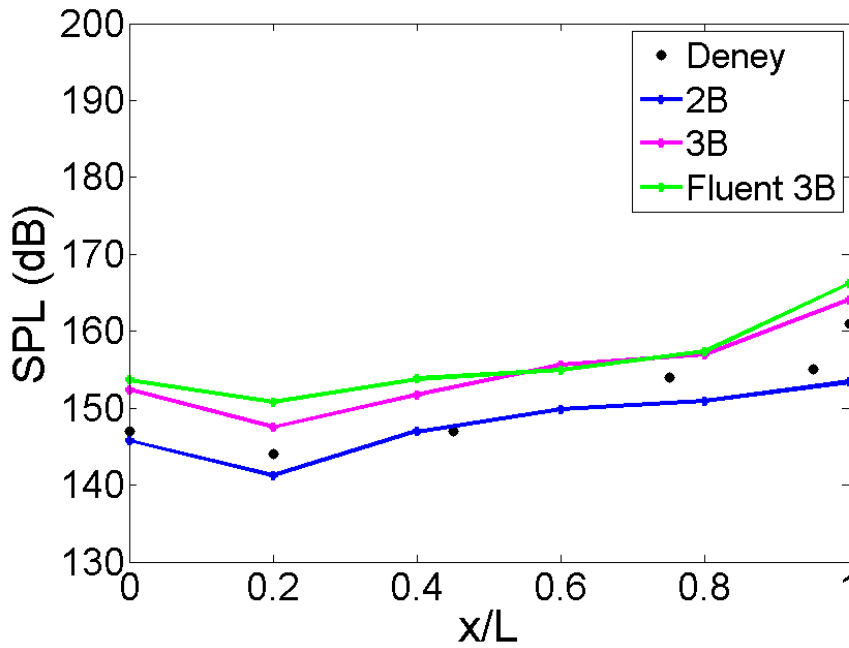


Şekil 6.1 : Ağ yapısının üç boyutlu görüntüleri.

Şekil 6.1’de üç boyutlu ağ yapısı gösterilmiştir. Akış alanında iki boyutlu ağ yapılarında olduğu gibi kayma tabakası ve duvar kenarlarında akış alanının kalanına göre daha sık hücreler oluşturulmuştur. Kavitenin dışında, z ekseninde hava aracının dış gövdesini ve üzerinde akışı temsil eden bir alan bulunmaktadır.

Gerçekleştirilen üç boyutlu simülasyonlar, iki boyutlu simülasyonlardan elde edilen sonuçlar ile kıyaslanarak üçüncü boyutun akış üzerindeki etkileri gözlemlenmek istenmiştir. Ayrıca OpenFOAM yazılımının üç boyutlu problemler üzerindeki işlevselliği araştırılmıştır.

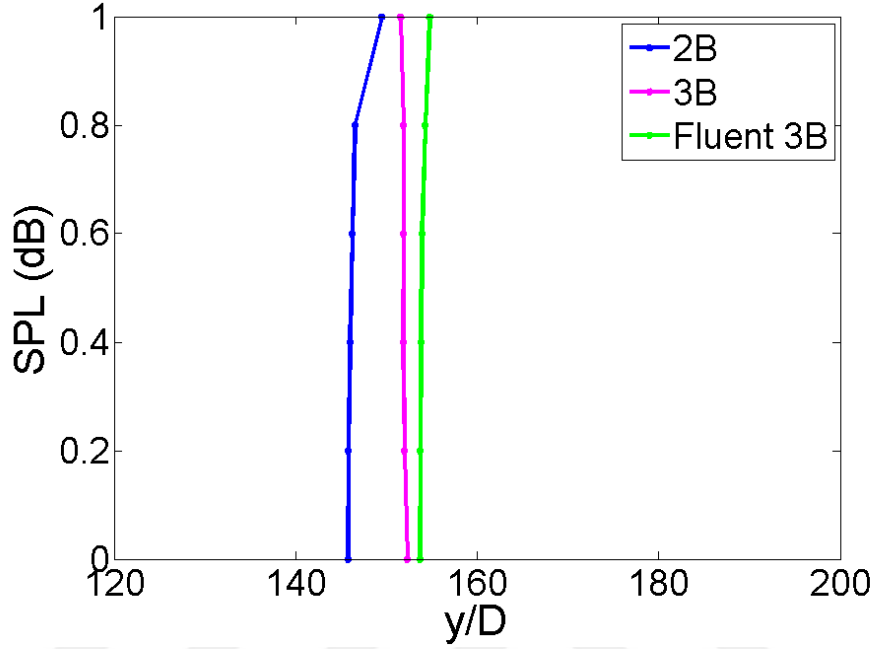
Şekil 6.2’ de iki ve üç boyutu simülasyonlardan elde edilen basınç değerlerinin yardımı ile hesaplanan SPL sonuçları deneysel bulgular ve Fluent yazılımı ile gerçekleştirilen üç boyutlu simülasyon sonuçları ile kıyaslanmıştır.



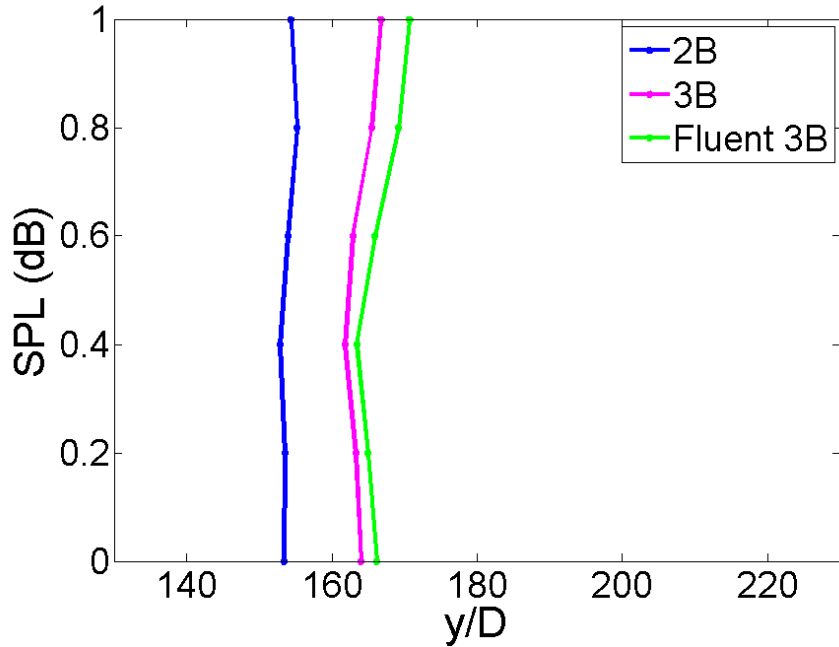
Şekil 6.2 : Kavite alt duvarı ses basınç seviyeleri kıyaslaması.

Şekil 6.2’de verilen grafiğe göre iki simülasyon sonucunun da eğilimleri birbirlerine ve deney bulgularına benzerdir. Üç boyutlu çalışmada elde edilen ses basınç seviyesi sayısal değerleri, iki boyutluya göre 5 dB kadar yüksek çıkmıştır. Arka duvara en yakın nokta olan son veri noktası hariç iki boyutlu simülasyon çalışması sonuçları deney sonuçlarına daha yakinken, bahsedilen son noktada üç boyutlu simülasyon çalışması deney verisine daha yakın sonuca ulaşmıştır. Bu grafiğe bakılarak üç boyutlu yapılan çalışmalarda ses basınç seviyesinin daha yüksek olarak hesaplandığı söylenir. Fluent ile yapılan üç boyutlu simülasyonların sonucu da OpenFOAM yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen üç boyutlu simülasyonun sonucuna paralellik göstermektedir ve sonuçlar sayısal olarak birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Yapılan simülasyondan elde

edilen basınç değişim sonuçları Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’de sırasıyla ön ve arka duvar üzerinde hesaplanan ses basınç seviyeleri cinsinden birbirleri ve üç boyutlu Fluent sonuçları ile kıyaslanmıştır.

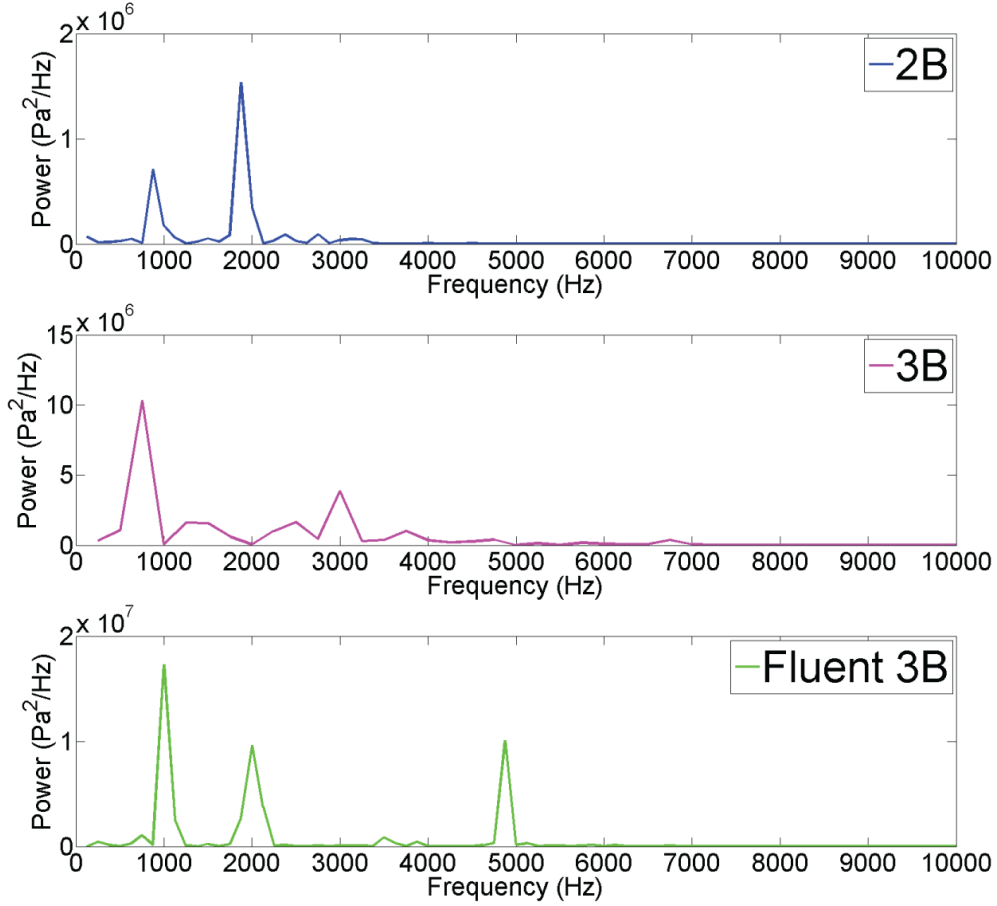


Şekil 6.3 : Kavite ön duvarı ses basınç seviyeleri kıyaslaması.



Şekil 6.4 : Kavite arka duvarı ses basınç seviyeleri kıyaslaması.

Alt duvarda elde edilen sonuçlarla paralel olacak şekilde, yine üç boyutlu çalışmada elde edilen ses basınç seviyesi sonuçları, iki boyutlu çalışmaya göre sayısal olarak daha yüksek olarak hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra sonuçların eğilimleri birbirlerine benzerdir. Şekil 6.5'te iki simülasyonun FFT sonuçları birbirleri ile kıyaslanmıştır.



Şekil 6.5 : Güç spektrumu kıyaslaması.

Şekil 6.5'te verilen güç spektrumu kıyaslamasına göre ilk modun frekans değeri, geliştirilmiş Rossiter formülasyonu ile kıyaslandığında aralarındaki fark yaklaşık olarak aynıdır. Fakat üç boyutlu çalışma formülasyonuna göre frekansı daha düşük hesaplarken, iki boyutlu çalışmada daha yüksek olarak hesaplanmıştır. Fluent ile yapılan üç boyutlu çalışmadan ise frekans değeri yine daha yüksek hesaplanmıştır.

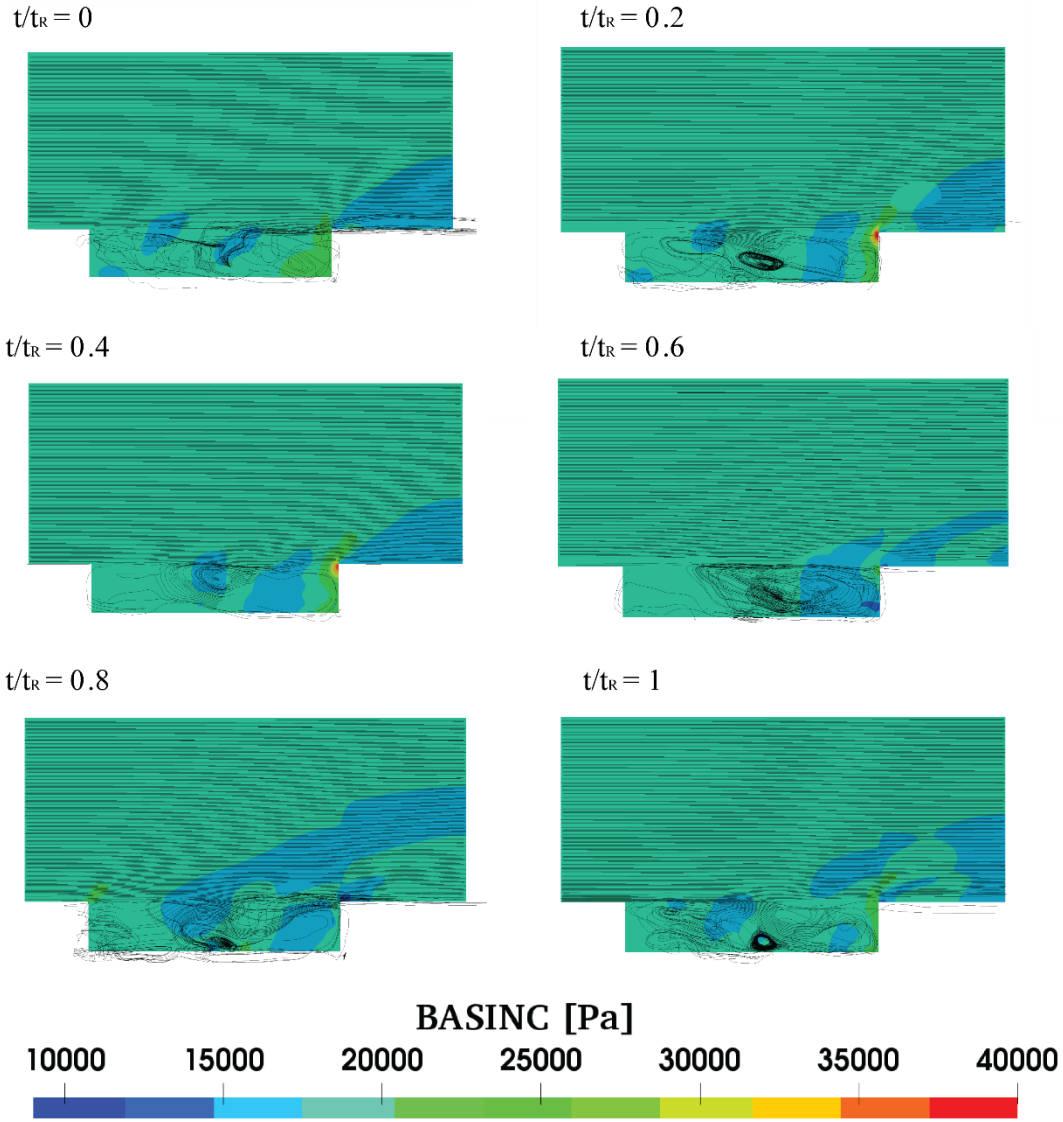
Çizelge 6.1'de tahmin edilen frekans değerlerinin geliştirilmiş Rossiter formülasyonuna göre sayısal olarak kıyaslaması verilmiştir.

Çizelge 6.1 :İki simülasyonun ilk mod için geliştirilmiş Rossiter formülasyonu ile frekans değeri kıyaslaması.

	Geliştirilmiş Rossiter Formülasyonu (Hz)	Sayısal Değer (Hz)	Fark (%)
2B	815.3	875	7.3
3B	815.3	750	8
Fluent 3B	815.3	1000	18.5

İlk modun frekans tahminlerinden elde edilen veriler geliştirilmiş Rossiter formülasyonu ile kıyaslandığında en yakın sonuca iki boyutlu OpenFOAM simülasyonu ile ulaşılırken, en uzak tahmin Fluent ile yapılan üç boyutlu çalışmadan elde edilmiştir.

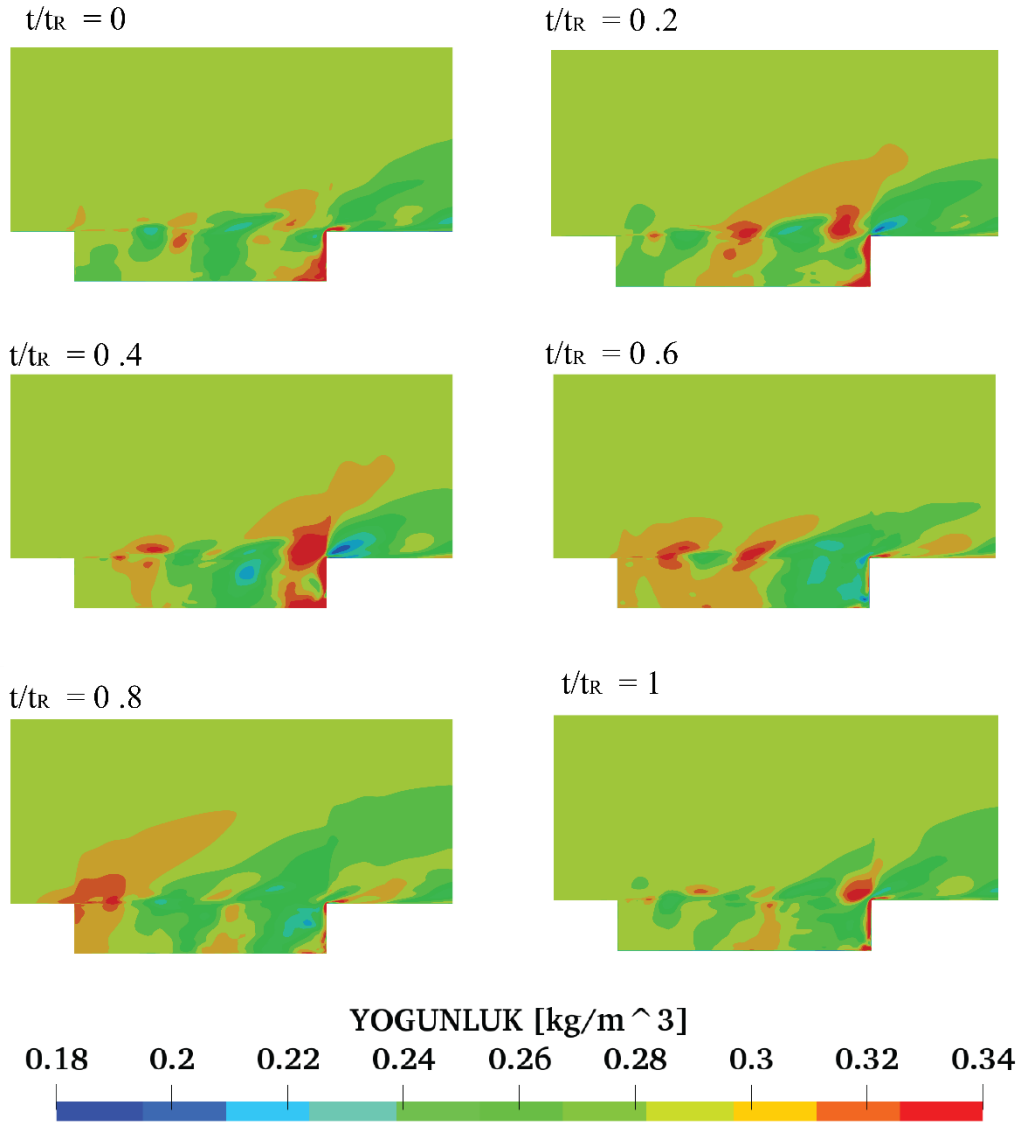
OpenFOAM üç boyutlu simülasyon sonucuna göre çözüm alanı içerisinde basınç dağılımı üzerine akım çizgileri ve yoğunluk dağılımı değişimleri sırasıyla Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de gösterilmiştir. Bu görseller üç boyutlu kavite geometrisinin simetri düzlemi üzerinden alınmıştır. Bu akışın Rossiter periyodu simülasyonlar sonucunda 750 Hz olarak tahmin edilmiştir. Zaman adımının 10<sup>-7</sup> kullanıldığı simülasyonlarda 1 Rossiter periyodu yaklaşık olarak 13333 zaman adımına denk gelmektedir.



Şekil 6.6 : Üç boyutlu kavite akışı akım çizgileri ve basınç dağılımı [Pa].

İki boyutlu çalışmalarda da olduğu gibi en yüksek basınç değerleri arka duvar üzerinde gözlemlenmektedir. Akım çizgileri üçüncü boyut üzerinde hareket ettiği için iki boyutlu çalışmadaki gibi düzgün bir görsel elde edilememekle beraber akışın kaotikliği ve girdaplar belirgindir.





Şekil 6.7 : Üç boyutlu kavite akışı yoğunluk dağılımı [kg/m<sup>3</sup>].

Üç boyutlu simülasyonun simetri düzlemindeki yoğunluk dağılımı incelendiğinde, özellikle arka duvardaki firar kenarında yüksek yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Bu durumun sebebi kayma tabakası ile arka duvarın etkileşimidir. İki boyutlu simülasyon sonuçları ile kıyaslandığında kavite içerisinde daha geniş bir alanda sıkışma ve yoğunluk artışı gözlemlenmiştir.



## 7. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Bu çalışmada, süpersonik kavite akışı sayısal olarak iki ayrı yazılım kullanılarak incelenmiştir. Kaufman v.d'nin [10], gerçekleştirdiği deney çalışmasının koşulları dikkate alınarak iki ve üç boyutlu simülasyonlar yapılmıştır. Yapılan çalışma açık kaynak kodlu bir yazılım olan OpenFOAM kullanılarak gerçekleştirilmiş simülasyon sonuçlarının, ticari bir yazılım olan Fluent simülasyon sonuçları ile kıyaslanarak doğrulanması amaçlanmıştır.

İlk çalışma olarak OpenFOAM yazılımının öğrenilebilmesi için basit ve temel bir geometri olan düz plaka ele alınmıştır. Sadece türbülansın etkili olduğu akış koşulları için yapılan bu çalışma, Rolls-Royce Uygulamalı Bilim Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiş deney koşulları dikkate alınarak yapılmış ve sonuçlar deney bulguları ile kıyaslanmıştır [32].

OpenFOAM yazılımı kullanılabilir hale geldikten sonra iki boyutlu kavite geometrisi ele alınmış ve ağ yapısı çalışması gerçekleştirilmiştir. İlk hücre yüksekliği sabit tutularak ağ yapısı büyüme oranı değiştirilerek yapılan bu çalışma sonunda, daha sonra yapılacak çalışmalarda kullanılmak üzere hangi ağ yapısının kullanılacağına karar verilmiştir. Sonuçlar kavite alt duvarı üzerinde hesaplanan ses basınç seviyesi cinsinden deney bulguları ile, ilk mod için tahmin edilen frekans değeri cinsinden ise Rossiter formülasyonu ile kıyaslanmıştır.

OpenFOAM yazılımı içerisinde belirlenen bazı parametrelerin belirlenmesi amacıyla çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İlk olarak zamanda ayrıklaştırma yönteminin belirlenmesi için üç ayrı yöntem denenmiş. Euler ve Crank Nicolson 0.5 yöntemlerinde meydana gelen sönümlenmeler kavite arka duvarında bir noktadan alınan basınç değerleri grafiği ile açıkça gözlemlenmiştir. Sönümlenmeler sonucunda bu iki yöntem ile hesaplanan SPL değerleri deney verilerinden daha küçük çıkmıştır. Crank Nicolson 0.9 yöntemi ise SPL cinsinden deney bulgularına daha yakın sonuçlara ulaşmıştır. Simülasyonlardan elde edilen FFT sonuçları geliştirilmiş Rossiter

formülasyonu ile kıyaslandığında ise Crank Nicolson 0.9 yöntemi %7.3 farkla en yakın sonuçlara ulaşmıştır. Kıyaslamalar sonucunda bu problem için en iyi zamanda ayırıklaştırma yönteminin Crank Nicolson 0.9 olduğuna karar verilmiştir.

Lineer ayırıklaştırma yöntemi üzerine “Upwind” etkisini araştırmak amacıyla iki ayrı simülasyon yapılmıştır. Yapılan çalışmalar ile Upwind etkisinin basınç salınımları üzerine sönümleyici etki yaptığı, bu nedenle SPL sayısal değerlerini daha düşük hesapladığı fark edilmiştir. Aynı şekilde FFT kıyaslamasında Upwind etkisindeki çalışma ilk modu yakalayamamıştır. Sonuç olarak Gauss Linear olarak adlandırılan çalışma ile devam edilmesi uygun görülmüştür.

Rahatlatma faktörünün sonuçlara olan etkilerinin incelenmesi amacıyla faktörün 0.3 ve 0.7 olarak seçildiği iki farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre SPL ve FFT kıyaslamalarında kayda değer bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Ancak, 0.7 seçilen simülasyon süresi 0.3 seçilene göre yaklaşık %50 daha uzun sürmüştür ve dolayısıyla sonraki çalışmalar için 0.3 değeri seçilmiştir.

Belirlenen tolerans değerinin etkileri iki farklı simülasyon çalışması ile incelenmiştir. İki simülasyonun sonuçları SPL cinsinden kıyaslandığında önemli bir fark oluşmasa da, FFT kıyaslamalarında tolerans değerinin  $10^{-5}$  seçildiği çalışma geliştirilmiş Rossiter formülasyonu ile hesaplanana çok daha yakındır. Kıyaslama sonucunda ileri çalışmalar için tolerans değeri olarak  $10^{-5}$  belirlenmiştir.

OpenFOAM yazılımında parametreleri belirlemek amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmalar ile yeni bir simülasyon yapılmıştır. En iyi sonuçları elde etmek amacıyla yapılan bu simülasyon ile ticari yazılım olan Fluent kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları kıyaslanmıştır. Öncelikli olarak kavite alt duvarında deney bulguları ile birlikte, daha sonra ise ön ve arka duvarlar üzerinde hesaplanan SPL değerleri birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Kavite alt duvarı üzerinde altı noktadan alınan veriler ile deney bulguları kıyaslandığında OpenFOAM sonuçları ortalama olarak %1.65 farklılık gösterirken, Fluent sonuçları ortalama olarak yaklaşık %9.9 farklılık göstermektedir. Elde edilen bu yüzdesel sonuçlar 13-14 dB’e denk gelmektedir. Ön ve arka duvarlardaki SPL değerlerine bakılacak olursa yine iki çözüm arasında 12 dB’e yakın bir farklılık

gözlemlenmektedir ve Fluent sonuçları sayısal olarak daha büyüktür. Güç spektrumu kıyaslamasına göre, geliştirilmiş Rossiter formülasyonu kullanılarak hesaplanan değer ile OpenFOAM arasında %7.3 fark bulunurken, Fluent ile %22.65 fark elde edilmiştir.

Daha sonra kavite içerisindeki akışı anlamak adına akım çizgileri, basınç, yoğunluk ve sıcaklık konturleri incelenmiştir. Akım çizgileri incelendiğinde kavitenin hücum kenarında başlayıp firar kenarında biten kayma tabakası gözlemlenmektedir. Kavite geometrisi içerisinde ise girdap yapılanmaları oluşumu görülmüştür. Çözüm alanı içerisinde basınç dalgalarının görüldüğü yerlerde yoğunluk değerinin de yüksek olduğu fark edilmiş ve sıcaklığın en yüksek olduğu bölgenin kavite arka duvarı olduğu göze çarpmıştır.

Son çalışma olarak aynı akış koşullarında, kavite geometrisi üç boyutlu olarak simüle edilmiştir. OpenFOAM üç boyutlu simülasyon sonuçları iki boyutlu çalışma sonuçları, Fluent yazılımı simülasyon sonuçları ve deney bulguları ile kıyaslanmıştır. OpenFOAM kullanılarak gerçekleştirilen üç boyutlu simülasyon sonuçları ses basınç seviyesi cinsinden, iki boyutlu çalışmalara göre sayısal değer olarak yüksek çözüme ulaşmıştır. İki boyutlu çalışmanın sonuçları deneysel bulgulara daha yakın olduğu için üç boyutlu çözümde OpenFOAM yazılımının yüksek tahmin yaptığı söylenebilir. Bunun yanı sıra OpenFOAM ve Fluent yazılımlarının üç boyutlu simülasyonları kıyaslanacak olursa, ses basınç seviyesi cinsinden birbirlerine çok yakın sonuçlara ulaşmalarına rağmen güç spektrumu frekans tahminlerinde göre OpenFOAM daha başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Yapılan çalışmalara göre OpenFOAM iyi bir HAD yazılımı alternatifi olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır. Üç boyutlu geometride daha iyi simülasyon sonuçları elde edebilmek için iki boyutlu simülasyon için yapılan çalışmaların, üç boyutlu simülasyon ayarları için de gerçekleştirilmesi gerektiği düşünülmüştür. Benzer sayısal yöntem, simülasyon ayarı çalışmaları yapıldığında ve her çalışma için en iyi sonucu veren seçenek kullanıldığında, üç boyutlu geometri ile deney bulgularına çok daha yakın sonuçlar elde edileceği sonucu çıkarılmıştır.

Çalışmaların kapsamında olan projenin devamında Kübra Asena Gelişli ANSYS-Fluent yazılımı ile farklı kavite geometrileri kullanarak simülasyonlar gerçekleştirecek

ve aktif ve pasif kontrol yöntemlerinin sonuçlar üzerine etkisini gözlemleyip, elde edilen veriler üzerine Dikgen Ayrıştırma Yöntemi (DAY) uygulayacaktır



## KAYNAKLAR

- [1] **Rossiter, J. E.**,(1964). Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds.
- [2] **Rossiter, J. E., Kurn, A.G.**,(1965). Wind tunnel measurements in and of the behind unsteady pressures a bomb bay, *Aeronaut. Res. Counc.*
- [3] **Heller, H., Bliss, D. B.**,(2012). The physical mechanism of flow-induced pressure fluctuations in cavities and concepts for their suppression.
- [4] **Block, P. J. W.**,(1976). Noise response of cavities of varying dimensions at subsonic speeds.
- [5] **Rockwell, D., Naudascher, E.**,(1978). Review-self-sustaining oscillations of flow past cavities, *ASME*.
- [6] **Kaufman, L. G., Clark, R. L.**,(1983). Mach 0.6 to 3.0 flows over rectangular cavities.
- [7] **Chung, K.**,(2003). Characteristics of compressible rectangular cavity flows, *J. Aircr.*
- [8] **Faure, T. M., Adrianos, P., Lusseyran, F., Pastur, L.**,(2007). Visualizations of the flow inside an open cavity at medium range reynolds numbers, *Exp. Fluids*
- [9] **Kim, H., Aradag, S., Knight D.**,(2006). Two and three dimensional simulations of supersonic cavity flow, *AIAA*.
- [10] **Aradag, S., Knight, D.**, (2005). Simulation of supersonic flow over a cavity, *AIAA*.
- [11] **Aradag, S., Knight, D.**, (2004). Simulation of supersonic cavity flow using 3D RANS equations, *AIAA*.
- [12] **Aradag, S., A.**, *CFD for High Speed Flows in Engineering*, VDM Verlag,(2008).
- [13] **Aradag, S., A., Kim, H., Knight, D.**,(2010). Two and three dimensional simulations of supersonic cavity configurations, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*..
- [14] **Ayli, U. E.**,(2012). Supersonik kaviteplerdeki akisin sayisal analizi (doktora tezi), TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi.
- [15] **O. Limited**,(2017). OpenFOAM User Guide.
- [16] **Hassanly, M., Koo, H., Lietz, C., Chong, S. T., Raman, V.**,(2017). A minimally-dissipative low-mach number solver for complex reacting flows in OpenFOAM, *Comput. Fluids*.

- [17] **Kraposhin, M., Bovtrikova, A., Strijhak, S.,**(2015). Adaptation of kurganov-tadmor numerical scheme for applying in combination with the PISO method in numerical simulation of flows in a wide range of mach numbers, *Procedia Comput. Sci.*
- [18] **Winter, M.,** Benchmark and validation of open source CFD codes, with focus on compressible and rotating capabilities, *M.Sc. thesis*, Chalmers University of Technology, (2013).
- [19] **Chun, S., Fengxian, S., Xinlin, X.,**(2013). Analysis on capabilities of density-based solvers within OpenFOAM to distinguish aerothermal variables in diffusion boundary layer, *Chinese J. Aeronaut.*
- [20] **Sebastian, J. J., James, S. E., Suryan, A.,**(2016). Computational study of hypersonic flow past spiked blunt body using RANS and DSMC method, *Procedia Technol.*
- [21] **Robertson, E., Choudhury, V., S. Bhushan, S., Walters, D. K.,**(2015). Validation of OpenFOAM numerical methods and turbulence models for incompressible bluff body flows, *Comput. Fluids.*
- [22] **Nebenfuhr, B.,** OpenFOAM : A tool for predicting automotive relevant flow fields, M.Sc. thesis, Chalmers University of Technology, (2010).
- [23] **Zucrow, M. J., Hoffman, J. D.,** *Gas Dynamics Volume 2: Multidimensional Flow*, John Wiley and Sons, (1977).
- [24] **McWilliams, J. C.,**(2017). Turbulent Flows : General Properties.
- [25] **Wilcox, D. C.,** *Turbulence Modelling for CFD*, DCW Industries, (1993).
- [26] **Anderson, J. D.,** *Fundamentals of Aerodynamics*, McGraw-Hill Higher Education, (2001).
- [27] **Hoffmann, K. A., Chiang, S. T.,** *Computational Fluid Dynamics Volume 2*, Engineering Education System, (2000).
- [28] **Bergmann, R.,**(2012). The fast fourier transform and fast wavelet transform for patterns on the torus, *Appl. Comput. Harmon. Anal.*
- [29] **Tannehill, J. C., Anderson, D. A., Pletcher R. H.,**(2001). Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, *Taylor&Francis.*
- [30] **Hoffmann, K. A., Chiang, S. T.,** *Computational Fluid Dynamics Volume 1*, Engineering Education System, (2000).
- [31] **O. Limited,**(2017). OpenFOAM v5 User Guide.
- [32] <http://cfd.mace.manchester.ac.uk/ercoftac> alındığı tarih 12.02.2017



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Elçin Ceren YALDIR  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 29.07.1993, Ankara  
**E-posta** : elcinyaldir@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lise** : 2011, Ankara Atatürk Anadolu Lisesi
- **Lisans** : 2016, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2017-2018	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü	Proje Personeli (Proje Burslu Yüksek Lisans Öğrencisi)
2016-2017	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	Proje Burslu Yüksek Lisans Öğrencisi
2015	Roketsan A.Ş.	Stajyer
2014	TEI-Tusaş Motor Sanayii A.Ş.	Stajyer

### YABANCI DİL:

İngilizce

### TEZDEN TÜRETİLEN SUNUMLAR:

- **Yaldir,E. C.**, Aradag,S., Gelisli,K. A., Ozer, M. B., Tascioglu, Y.,2018. Comparison of open source and commercial software simulation results for supersonic cavity flow, International Congress on Fundamental and Applied Sciences, 18 – 22 June, Skopje, Macedonia