

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

**SÜPERSONİK KAVİTE AKIŞININ AKTİF VE PASİF YÖNTEMLERLE  
KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Kübra Asena GELİŞLİ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

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

**HAZİRAN 2019**



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 161511085 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Kübra Asena GELİŞLİ**'nin ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**SÜPERSONİK KAVİTE AKIŞININ AKTİF VE PASİF YÖNTEMLERLE KONTROLÜ**” başlıklı tezi **18.06.2019** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

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

**Jüri Üyeleri :** **Dr. Öğr. Üyesi Yiğit TAŞCIOĞLU** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Ekin ÖZGİRGİN YAPICI** .....  
Çankaya 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.

Kübra Asena Gelişli



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### SÜPERSONİK KAVİTE AKIŞININ AKTİF VE PASİF YÖNTEMLERLE KONTROLÜ

Kübra Asena Gelişli

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

Danışman: Prof. Dr. Selin Aradağ Çelebioğlu

Tarih: Haziran 2019

Hava araçlarının içinde mühimmatın taşındığı dikdörtgen boşluklar olan kaviteler üzerindeki yüksek hızlı akışların zamana bağlı değişen, düzensiz ve karmaşık akış özellikleri havacılık uygulamalarında pratik olarak önemli bir sorun teşkil eder. Kavite içi akış alanı türbülansı ve beraberinde basınç dalgalanmaları, yüksek akustik etkiler ile kararsızlıkları barındırmaktadır. Kavite akışının yapısının anlaşılması, basınç salınımlarının ve yüksek akustik etkilerin hafifletilmesi için akışın doğru biçimde simülasyonlarının yapılıp modellenmesi ve uygun kontrol yöntemlerinin uygulanması gereklidir.

Bu tez çalışması kapsamında 1.5 Mach serbest akış hızına sahip dikdörtgenel bir kavite üzerindeki akış Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği metotları ile incelenmiştir. Uzunluğun derinliğe oranı 5.07 olan geometride açık kavite akışı özellikleri gözlenmektedir. Yapılan sayısal çalışma literatürdeki deneysel bir çalışma ile doğrulanmıştır. Kavite akışındaki yüksek basınç değerlerini ve salınımları düşürmek, yüksek akustik etkileri hafifletmek amacıyla pasif ve aktif kontrol yöntemleri

uygulanmıştır. Pasif yöntemlerin uygulanması kapsamında kavite arka duvarına eğim verilmesi, kavite girişine plaka eklenmesi ve kavite duvarlarına engeller konulması olmak üzere geometride değişiklikler yapılmıştır. Aktif yöntemler ise mikrojetler ve jetler ile hava üfleme bazlı akış kontrolüdür. Akış fiziğinin daha detaylı incelenmesi adına kontrolsüz ve kontrollü akışlarda kavite içinden elde edilen hız verilerine Dikgen Ayırıştırma Yöntemi uygulanmış, akışlardaki mekansal kipler ortaya çıkarılıp düşük mertebeli sistem modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak kontrolsüz ve kontrollü simülasyonlarda kavite duvarlarından elde edilen basınç verilerine bir boyutlu dikgen ayırıştırma uygulanıp gerçek zamanlı akış kontrolü için uygun sensör yerleri belirlenmiştir.

Pasif yöntemler ile kavite duvarlarında yüksek ses basınç seviyesi düşürümleri elde edilmiştir ve en etkili sonuçlara arka duvara eğim verilen çalışmada ulaşılmıştır. Arka duvara verilen eğim açısı arttıkça kayma tabakası ile arka duvarın etkileşimi zayıflatılarak basınç salınımlarının genliği düşürülmüştür. Aktif kontrol yöntemleri uygulanarak akış özelliklerinde değişimler meydana getirilmiştir. Mikrojetler ve jetler ile hava üflemede en etkin sonuçlar kavite girişinden uygulama yapıldığında elde edilmiştir. Kavite girişinde sisteme dışarıdan enerji verilerek kayma tabakasının yapısı değiştirilmiştir. Pasif kontrol yöntemlerine nispeten daha az etkili olan aktif kontrol yöntemleri akış koşullarına göre değiştirilebilir olduğu için gerçek zamanlı akış kontrolü için oldukça elverişlidir.

**Anahtar Kelimeler:** Süpersonik kavite akışı, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Akış kontrolü, Dikgen Ayırıştırma Yöntemi



## **ABSTRACT**

Master of Science

**ACTIVE AND PASSIVE CONTROL OF SUPERSONIC CAVITY FLOW**

Kübra Asena Gelişli

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

Supervisor: Prof. Selin Aradağ Çelebioğlu

Date: June 2019

Transient, irregular and complicated nature of high speed flow over cavities which represents the rectangular ammunition store bays of aircrafts presents an important and practical problem in aeronautical applications. Cavity flow contains turbulence in company with pressure fluctuations, severe acoustic effects and instabilities. In order to understand the structure of cavity flow, and to alleviate pressure fluctuations and severe acoustic effects it is necessary to conduct accurate flow simulations and apply appropriate control methods.

In this dissertation, flow over a rectangular cavity with Mach number of 1.5 is investigated using Computational Fluid Dynamics methods. Open cavity characteristics are observed in geometry with a length to depth ratio of 5.07. Simulation results are verified by experiment in literature. Active and passive control methods are applied to decrease the high pressure values and fluctuations, reduce the severe acoustic effects. Passive methods are geometrical changes such as inclination of trailing edge wall, inserting plate on cavity entrance and implementation of wall spoilers. Active control methods are air blowing with microjets and jets from cavity

walls. To make detailed examination of flow physics, Proper Orthogonal Decomposition is applied to velocity data obtained from flow inside cavity in uncontrolled and controlled cases, and dominant modes of flows are revealed. In the final part of the dissertation sensor locations for real-time flow control are determined by applying one-dimensional Proper Orthogonal Decomposition to pressure values obtained from cavity walls.

High sound pressure level decreases are obtained by passive control methods and the most effective passive control method is selected as inclination of trailing edge wall. As the angle of trailing edge wall increases, the amplitude of pressure oscillations decreases by reducing the interaction between shear layer and back wall. Changes in flow properties are observed by applying active control methods. The most effective results in air blowing with microjets and jets are obtained when the application is made through the cavity entrance. Structure of shear layer is changed by giving external energy input at cavity entrance. Active control methods, which are less effective than passive control methods in terms of pressure fluctuation suppression, are quite suitable for real-time flow control since they are adaptable to flow conditions.

**Keywords:** Supersonic cavity flow, Computational Fluid Dynamics, Flow control, Proper Orthogonal Decomposition

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında değerli desteği ve yönlendirmeleri için danışman hocam Prof. Dr. Selin ARADAĞ ÇELEBİOĞLU'na teşekkür ederim. Birlikte proje yaptığım kıymetli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Yiğit TAŞCIOĞLU, Doç. Dr. Mehmet Bülent ÖZER ile kıymetli bilgi ve tecrübelerini her daim paylaşan Prof. Dr. Sadık KAKAÇ ve Dr. Kutay ÇELEBİOĞLU'na teşekkürü borç bilirim.

Değerli tez jüri üyeleri Dr. Öğr. Üyesi Yiğit TAŞCIOĞLU ve Dr. Öğr. Üyesi Ekin ÖZGİRGİN YAPICI'ya tezimi değerlendirdikleri ve jürimde yer aldıkları için teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca her zaman yanımda olan değerli arkadaşlarım Tacettin Utku SÜER, Burak CENİK ve Alper YETİŞ ile orta okuldan beri desteğini hep hissettiğim kıymetli arkadaşım Rabia AKTAŞ'a çok teşekkür ederim. Lisans eğitimimin sonunda yutta tanışıp yüksek lisans eğitimimi birlikte tamamladığım kıymetli dostum Burcu Ecem YILMAZ'a ve adlarını tek tek sayamadığım bütün arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Asistanlık yaptığım ve proje personeli olarak çalıştığım süre boyunca değerli anılar biriktirdiğim ve birlikte çalışmaktan çok keyif aldığım arkadaşlarım Burak ALTINTAŞ, Fevzi BÜYÜKSOLAK, Selahattin ÖZHAN YÜKSEL, Yağmur Tuğba ÜNAL, Mustafa Can GÜÇLÜ, Mustafa TUNCER, Özgür ÇÖLLÜ, Ferdi BESNİ, Berk ÇEVRİM, Ufuk KAYABAŞI ve proje arkadaşım Elçin Ceren YALDIR'a tüm destekleri için teşekkür ederim.

Bugüne gelmemi sağlayan ve hayatımın her aşamasında beni destekleyen kıymetli ailem Şükran GELİŞLİ, Prof. Dr. Yücel GELİŞLİ, Selenbike GELİŞLİ ve Sevgi Simay GELİŞLİ'ye sonsuz teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana sağlanan burs ve çeşitli imkanlar için TOBB ETÜ'ye ve TOBB ETÜ HİDRO Su Türbini Tasarım ve Test Merkezi'ne teşekkür

ederim. Bu tez çalışması TM2041 No'lu Süpersonik Kaviteilerin HAD ile Aerodinamik Analizleri, Aktif ve Pasif Kontrol Çalışmaları adlı Türk Havacılık ve Uzay Sanayi projesi kapsamında gerçekleştirildiği için Türk Havacılık ve Uzay Sanayi'ne teşekkürlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>ix</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>RESİM LİSTESİ</b> .....	<b>xv</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xvii</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xvii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>xix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Kavite Akışı .....	<b>2</b>
1.2.1 Kavite literatürü .....	<b>5</b>
1.2.2 Pasif ve aktif kontrol yöntemleri literatürü.....	<b>11</b>
1.2.3 Dikgen Ayırıştırma Yöntemi literatürü .....	<b>16</b>
1.3 Tezin Amacı.....	<b>21</b>
<b>2. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ</b> .....	<b>23</b>
2.1 Korunum Denklemleri.....	<b>23</b>
2.2 Türbülans .....	<b>25</b>
2.2.1 Türbülansın modellenmesi RANS ve FANS .....	<b>27</b>
2.3 Sayısal Yöntemler .....	<b>32</b>
2.3.1 Yoğunluk tabanlı algoritma .....	<b>33</b>
2.3.2 Roe-FDS .....	<b>34</b>
2.3.3 Green-Gauss Node Based hesabı .....	<b>34</b>
2.3.4 İkinci derece Upwind yöntemi .....	<b>35</b>
2.4 Dikgen Ayırıştırma Yöntemi .....	<b>35</b>
2.4.1 Dikgen Ayırıştırma Yöntemi teorisi .....	<b>36</b>
2.4.2. Dikgen Ayırıştırma Yöntemi uygulaması.....	<b>38</b>
2.5 Sınır Koşulları.....	<b>39</b>
2.6 Akış Koşulları .....	<b>40</b>
2.7 Ard İşleme Yöntemleri .....	<b>42</b>
2.7.1 Hızlı Fourier dönüşümü (FFT).....	<b>43</b>
2.7.2 Ses Basınç Seviyesi (SPL) hesabı .....	<b>44</b>
2.8 Hesaplama Kaynakları.....	<b>44</b>
<b>3. İKİ VE ÜÇ BOYUTLU KONTROLSÜZ KAVİTE AKIŞI</b> <b>SİMÜLASYONLARI</b> .....	<b>45</b>
3.1 İki Boyutlu Simülasyonlar.....	<b>46</b>
3.2 Üç Boyutlu Simülasyon.....	<b>53</b>
3.3 İki ve Üç Boyutlu Kontrolsüz Kavite Simülasyonları Hakkında Yorumlar ....	<b>63</b>

<b>4. SÜPERSONİK KAVİTE AKIŞININ PASİF YÖNTEMLER İLE KONTROLÜ .....</b>	<b>65</b>
4.1 Arka Duvara Eğim Verme Çalışmaları .....	66
4.2 Kavite Girişine Plaka Ekleme Çalışmaları .....	73
4.3 Kavite Duvarlarına Engel Ekleme Çalışmaları.....	80
4.4 Pasif Kontrol Yöntemleri Hakkında Yorumlar.....	88
<b>5. SÜPERSONİK KAVİTE AKIŞININ AKTİF YÖNTEMLERLE KONTROLÜ .....</b>	<b>91</b>
5.1 Mikrojetler ile Hava Üfleme Bazlı Akış Kontrolü .....	91
5.2 Jetler ile Hava Üfleme Bazlı Akış Kontrolü.....	99
5.2.1 Kavite girişindeki jet deliğinden farklı açılarda hava üfleme simülasyonları.....	101
5.2.2 Kavite ön duvarındaki jet deliklerinden hava vakumlama simülasyonları .....	106
5.2.3 Kavite arka duvarındaki jet deliklerinden hava vakumlama simülasyonları .....	112
5.3 Aktif Kontrol Yöntemleri Hakkında Yorumlar .....	118
<b>6. DİKGİN AYRIŞTIRMA YÖNTEMİ UYGULAMALARI.....</b>	<b>121</b>
6.1 Kontrolsüz Simülasyon DAY Sonuçları .....	121
6.2 TWI-60° Simülasyonu DAY Sonuçları.....	124
6.3 JB-1-90° Simülasyonu DAY Sonuçları.....	126
6.4 DAY Sonuçları Üzerine Yorumlar .....	129
<b>7. SENSÖR YERİ BELİRLEME ÇALIŞMALARI .....</b>	<b>133</b>
7.1 Kontrolsüz Simülasyon için Sensör Yeri Belirleme Çalışmaları.....	134
7.2 TWI-60° Simülasyonu için Sensör Yeri Belirleme Çalışmaları.....	135
7.3 JB-1-90° Simülasyonu için Sensör Yeri Belirleme Çalışmaları.....	136
7.4 Nihai Sensör Konumları ve Yorumlar .....	137
<b>8. DEĞERLENDİRME .....</b>	<b>139</b>
8.1 Sonuçların Değerlendirilmesi .....	139
8.2 Gelecekte Yapılacak Çalışmalar için Öneriler .....	146
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>147</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>153</b>
<b>EK 1 .....</b>	<b>155</b>
<b>EK 2 .....</b>	<b>163</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>169</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1. 1 Kavite akışı tipleri (a)açık kavite akışı, (b) geçiş bölgesi-açık kavite akışı, (c) geçiş bölgesi-kapalı kavite akışı, (d) kapalı kavite akışı .....	4
Şekil 1. 2 : Rossiter Mekanizması .....	4
Şekil 2. 1 : Sınır koşulları.....	39
Şekil 2. 2 : 3 boyutlu geometri .....	41
Şekil 2. 3 : Kontrol noktaları .....	42
Şekil 3. 1: İki boyutlu ağ yapıları.....	47
Şekil 3. 2 İki boyutlu ağ yapıları için alt duvar SPL-konum grafiği .....	48
Şekil 3. 3 : İki boyutlu simülasyonda kritik nokta için basınç-zaman grafiği.....	48
Şekil 3. 4 : İki boyutlu simülasyonda kritik nokta için güç-frekans grafiği.....	49
Şekil 3. 5 : İki boyutlu simülasyon akış alanında basınç dağılımı ve akım çizgileri .	50
Şekil 3. 6 : İki boyutlu simülasyon akış alanında Mach sayısı dağılımı.....	51
Şekil 3. 7 : İki boyutlu simülasyon akış alanında sıcaklık dağılımı .....	52
Şekil 3. 8 : İki boyutlu simülasyon akış alanında yoğunluk dağılımı.....	52
Şekil 3. 9 : İki boyutlu simülasyon akış alanında vortisite dağılımı .....	53
Şekil 3. 10 : Üç boyutlu ağ yapısı (a) Ön görünüş, (b) Sol yan görünüş, (c) İzometrik görünüş .....	54
Şekil 3. 11 : İki ve üç boyutlu simülasyonlar için basınç-zaman grafiği.....	55
Şekil 3. 12 : İki ve üç boyutlu simülasyonlar için güç-frekans grafiği.....	55
Şekil 3. 13 : İki ve üç boyutlu simülasyonlar için alt duvar SPL-konum grafiği.....	56
Şekil 3. 14 : İki ve üç boyutlu simülasyonlar için ön duvar SPL-konum grafiği.....	56
Şekil 3. 15 : İki ve üç boyutlu simülasyonlar için arka duvar SPL-konum grafiği ....	57
Şekil 3. 16 : Üç boyutlu simülasyon simetri düzleminde basınç dağılımı ve akım çizgileri .....	58
Şekil 3. 17 : Üç boyutlu simülasyon simetri düzleminde Mach sayısı dağılımı .....	59
Şekil 3. 18 : Üç boyutlu simülasyon simetri düzleminde sıcaklık dağılımı.....	59
Şekil 3. 19 : Üç boyutlu simülasyon simetri düzleminde yoğunluk dağılımı .....	60
Şekil 3. 20 : Üç boyutlu simülasyon simetri düzleminde vortisite dağılımı .....	61
Şekil 3. 21 : Üç boyutlu simülasyon $x/L=0.5$ düzleminde basınç dağılımı ve akım çizgileri .....	63
Şekil 3. 22 : Üç boyutlu simülasyon için akışa dik düzlemlerde basınç dağılımı ve akım çizgileri (a) Dik bakış, (b) Akış alanında toplu bakış .....	62
Şekil 4. 1 : Pasif kontrol yöntemleri.....	66
Şekil 4. 2 : Kavite arka duvarına eğim verilmiş geometrilerde ağ yapıları .....	67
Şekil 4. 3 : (a)TWI-40° ağ yapısı, (b) TWI-40° ağ yapısı-yakın görünüm .....	68
Şekil 4. 4 : TWI kritik nokta basınç-zaman grafiği .....	68
Şekil 4. 5 : TWI kritik nokta güç-frekans grafiği .....	69
Şekil 4. 6 : TWI ön duvar SPL-konum grafiği .....	70
Şekil 4. 7 : TWI alt duvar SPL-konum grafiği .....	70
Şekil 4. 8 : TWI arka duvar SPL-konum grafiği .....	71

Şekil 4. 9 : TWI-60° simülasyonu akış alanında basınç dağılımı ve akım çizgileri...	72
Şekil 4. 10 : TWI-60 simülasyonu akış alanında vortisite dağılımı .....	73
Şekil 4. 11 : Kavite girişine plaka eklenen çalışmalarda ağ yapıları.....	74
Şekil 4. 12 : CP-L/4 ağ yapısının plaka etrafındaki yakın görünümü .....	74
Şekil 4. 13 : CP kritik nokta için basınç-zaman grafiği.....	75
Şekil 4. 14 : CP kritik nokta güç-frekans grafiği.....	76
Şekil 4. 15 : CP ön duvar SPL-konum grafiği .....	77
Şekil 4. 16 : CP alt duvar SPL-konum grafiği .....	77
Şekil 4. 17 : CP arka duvar SPL-konum grafiği.....	78
Şekil 4. 18 : CP-L/8 simülasyonu akış alanında basınç dağılımı ve akım çizgileri ...	79
Şekil 4. 19 : CP-L/8 simülasyonu akış alanında vortisite dağılımı .....	80
Şekil 4. 20 : WS çalışması için kontrolsüz simülasyon ağ yapısı .....	81
Şekil 4. 21 : Kavite duvarlarına engel eklenmiş geometrilerde ağ yapıları .....	82
Şekil 4. 22 : Kavite girişindeki engelin etrafındaki ağ yapısı .....	82
Şekil 4. 23 : WS kritik nokta basınç-zaman grafiği.....	83
Şekil 4. 24 : WS kritik nokta için güç-frekans grafiği.....	84
Şekil 4. 25 : WS ön duvar SPL-konum grafiği .....	84
Şekil 4. 26 : WS alt duvar SPL-konum grafiği .....	85
Şekil 4. 27 : WS arka duvar SPL-konum grafiği.....	85
Şekil 4. 28 : WS-234 simülasyonu akış alanında basınç dağılımı ve akım çizgileri..	87
Şekil 4. 29 : WS-234 akış alanında vortisite dağılımı .....	87
Şekil 5. 1 : MJB delik konumları ve adlandırma.....	92
Şekil 5. 2 : Mikrojet ve jet delikleri (a) Üç boyutlu gösterim, (b) İki boyutlu gösterim .....	92
Şekil 5. 3 : MJB ağ yapısı .....	93
Şekil 5. 4 : Jet ve mikrojet deliklerinin etrafındaki ağ yapısı .....	93
Şekil 5. 5 : MJB kritik nokta için basınç-zaman grafiği.....	94
Şekil 5. 6 : MJB kritik nokta için güç-frekans grafiği.....	95
Şekil 5. 7 : MJB ön duvar SPL-konum grafiği.....	96
Şekil 5. 8 : MJB alt duvar SPL-konum grafiği.....	97
Şekil 5. 9 : MJB arka duvar SPL-konum grafiği.....	97
Şekil 5. 10 : MJB-1 simülasyonu akış alanında basınç dağılımı ve akım çizgileri....	98
Şekil 5. 11 : MJB-1 simülasyonu akış alanında vortisite dağılımı .....	99
Şekil 5. 12 : Jetlerle hava üfleme ve vakumlama bazlı akış kontrolü çalışmaları.....	100
Şekil 5. 13 : JB simülasyonlarında kullanılan ağ yapısı .....	100
Şekil 5. 14 : JB simülasyonlarında delik konumlarının etrafındaki ağ yapısı.....	101
Şekil 5. 15 : JB-1 kritik nokta basınç-zaman grafiği .....	102
Şekil 5. 16 : JB-1 kritik nokta güç-frekans grafiği .....	102
Şekil 5. 17 : JB-1 ön duvar SPL-konum grafiği .....	103
Şekil 5. 18 : JB-1 alt duvar SPL-konum grafiği .....	104
Şekil 5. 19 : JB-1 arka duvar SPL-konum grafiği .....	104
Şekil 5. 20 : JB-1-90° simülasyonu akış alanında basınç dağılımı ve akım çizgileri .....	105
Şekil 5. 21 : JB-1-90° simülasyonu akış alanında vortisite dağılımı.....	106
Şekil 5. 22 : JS-LE kritik nokta basınç-zaman grafiği.....	107
Şekil 5. 23 : JS-LE kritik nokta güç-frekans grafiği.....	108
Şekil 5. 24 : JS-LE ön duvar SPL-konum grafiği.....	109
Şekil 5. 25 : JS-LE alt duvar SPL-konum grafiği.....	109
Şekil 5. 26 : JS-LE arka duvar SPL-konum grafiği.....	110



Şekil 5. 27 : JS-LE-34 simülasyonu akış alanında basınç dağılımı ve akım çizgileri .....	111
Şekil 5. 28 : JS-LE-34 simülasyonu akış alanında vortisite dağılımı .....	112
Şekil 5. 29 : JS-TE kritik nokta basınç-zaman grafiği .....	113
Şekil 5. 30 : JS-TE kritik nokta güç-frekans grafiği .....	114
Şekil 5. 31 : JS-TE ön duvar SPL-konum grafiği .....	115
Şekil 5. 32 : JS-TE alt duvar SPL-konum grafiği .....	115
Şekil 5. 33 : JS-TE arka duvar SPL-konum grafiği .....	116
Şekil 5. 34 : JS-TE-234 simülasyonu akış alanında basınç dağılımı ve akım çizgileri .....	117
Şekil 5. 35 : JS-TE-234 simülasyonu akış alanında vortisite dağılımı .....	117
Şekil 6. 1 : Kontrolsüz simülasyon için ilk 4 DAY kipi .....	123
Şekil 6. 2 : Kontrolsüz simülasyon için akışın son anında x-yönündeki hız dağılımları .....	123
Şekil 6. 3 : Kontrolsüz simülasyon kip genlikleri .....	124
Şekil 6. 4 : TWI-60° simülasyonu için ilk 4 DAY kipi .....	125
Şekil 6. 5 : TWI-60° simülasyonu için akışın son anında x-yönündeki hız dağılımları .....	126
Şekil 6. 6 : TWI-60° simülasyonu için ilk kipi genliği .....	126
Şekil 6. 7 : JB-1-90° simülasyonu için ilk 6 DAY kipi .....	128
Şekil 6. 8 : JB-1-90° simülasyonu için akışın son anında x-yönündeki hız dağılımları .....	128
Şekil 6. 9 : JB-1-90 simülasyonu kip genlikleri .....	129
Şekil 7. 1 : Kavite geometrisi ve koordinatları (a) Kontrolsüz simülasyon ve JB-1-90° simülasyonu, (b) TWI-60° simülasyonu .....	134



## RESİM LİSTESİ

### Sayfa

Resim 1. 1 : AP-3 Orion uçağında mühimmat deposunun açılması.....1





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Çözüm Yöntemleri .....	33
Çizelge 2.2 : Sınır koşullarına karşılık gelen değerler .....	40
Çizelge 2.3 : Deney koşulları ve geometri .....	41
Çizelge 3. 1 : Deney Koşulları ve Kavite Geometrisi.....	45
Çizelge 3. 2 : İki Boyutlu Ağ Yapısı Özellikleri.....	46
Çizelge 4.1 : Kavite Arka Duvarına Eğim Verilmiş Geometrilere Ağ Yapısı Özellikleri.....	67
Çizelge 4. 2 : Kavite Girişine Plaka Eklenen Geometrilere Ağ Yapısı Özellikleri..	74
Çizelge 4. 3 : Kavite Duvarlarına Engel Ekleme Simülasyonları.....	80
Çizelge 4. 4 : Kavite Duvarlarına Engel Eklenen Geometrilere Ağ Yapısı Özellikleri.....	81
Çizelge 5. 1: Mikrojetler ile Hava Üfleme Simülasyonları.....	94
Çizelge 5. 2 : JS-LE Simülasyonları.....	107
Çizelge 5. 3 : JS-TE Simülasyonları.....	113
Çizelge 6. 1: Kontrolsüz Simülasyon DAY Kiplerinin Enerji İçeriği.....	122
Çizelge 6. 2 : TWI-60 Simülasyonu DAY Kiplerinin Enerji İçeriği.....	125
Çizelge 6. 3 : JB-1-90° Simülasyonu DAY Kiplerinin Enerji İçeriği.....	127
Çizelge 7. 1 : Kontrolsüz Simülasyon için 1 Boyutlu DAY Kiplerinin Enerji İçeriği, Maksimum ve Minimum Noktaları.....	135
Çizelge 7. 2 : TWI-60° Simülasyonu için 1 Boyutlu DAY Kiplerinin Enerji İçeriği, Maksimum ve Minimum Noktaları.....	136
Çizelge 7. 3 : JB-1-90° Simülasyonu için 1 Boyutlu DAY Kiplerinin Enerji İçeriği, Maksimum ve Minimum Noktaları.....	137
Çizelge 7. 4 : Nihai Sensör Konumları.....	138



## KISALTMALAR

<b>TAI</b>	: Turkish Aerospace Industries, Inc.-(TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş.)
<b>2B</b>	: 2 boyutlu
<b>3B</b>	: 3 boyutlu
<b>HAD</b>	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
<b>FFT</b>	: Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
<b>DNS</b>	: Direct Numerical Simulation (Direkt Sayısal Çözüm)
<b>RANS</b>	: Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations
<b>LES</b>	: Large Eddy Simulation (Büyük Burgaç Benzetimi)
<b>DES</b>	: Ayrık girdap benzeşim yöntemi (Detached Eddy Simulation)
<b>k-<math>\omega</math> SST</b>	: k- $\omega$ Menter's Shear Stress Transport türbülans modeli
<b>DAY</b>	: Dikgen Ayrıştırma Metodu (Proper Orthogonal Decomposition)
<b>TWI</b>	: Trailing Edge Wall Inclination
<b>CP</b>	: Cover Plate
<b>WS</b>	: Wall Spoiler
<b>MJB</b>	: Microjet Blowing
<b>JB</b>	: Jet Blowing
<b>JS-LE</b>	: Jet Suction from Leading Edge Wall
<b>JS-TE</b>	: Jet Suction from Trailing Edge Wall





## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simge	Açıklama
U	Hız
$U_{\infty}$	Serbest akış hızı
M	Mach sayısı
Re	Reynolds Sayısı
L	Kavite uzunluğu
$L_{CP}$	Kavite girişine eklenen plakanın uzunluğu
D	Kavite derinliği
W	Kavite genişliği
T	Sıcaklık
P	Basınç
$P_{inf}$	Serbest ortam basıncı
Pa	Pascal
kPa	Kilo Pascal
f	Frekans
Hz	Hertz
St	Strouhal sayısı
K	Rossiter formülü deney sabiti
$\alpha$	Rossiter formülü deney sabiti
$t_R$	Rossiter periyodu
m	Mod sayısı
$M_0$	Durma noktasındaki Mach sayısı
SPL	Ses basınç seviyesi (Sound Pressure Level )
dB	Desibel
t	Zaman
dt	Zaman adımı
L/D	Kavite uzunluk/derinlik oranı
L/W	Kavite uzunluk/genişlik oranı
W/D	Kavite genişlik/derinlik oranı
x/L	Kavite tabanındaki konum
y/D	Kavite duvarındaki konum
$\alpha$	Kavite arka duvarı eğim açısı
$\beta$	Kavite girişine eklenen plakanın açısı
$\emptyset$	Jet ve mikrojet delik çapı
$\Delta T$	Yerel sıcaklık farkı

**Simge** $\Delta T_0$  $r$  $R_0$  $r_0$  $E$  $c_v$  $\rho_\infty$ **Açıklama**

Lazer enerjisi bırakımı ile oluşan maximum sıcaklık farkı

Farklı noktaların lazer bırakımı yapılan noktaya uzaklığı

Lazerin başlangıç yarıçapı

Lazerin başlangıç yarıçapının yarısı

Toplam yüklenen enerji

Sabit hacimde özgül ısı değeri

Serbest akış yoğunluğu



## 1. GİRİŞ

Kavite akışı 1950'lerden itibaren mühendislik araştırmalarında ve uygulamalarında ilgi çeken bir konu olmaya başlamıştır. Hava araçlarının mühimmat taşıdıkları dikdörtgen prizması biçimindeki alanlar kavite olarak adlandırılmıştır. Mühimmatların kavite adı verilen uçağın içinde kapalı alanlarda konumlandırılması aerodinamik problemleri azaltmanın yanı sıra radara yakalanma riskini de düşürür [1].

Resim 1.1'de AP-3 Orion uçağında mühimmat deposunun açılmış hali gösterilmiştir [2]. Süpersonik hızlarda mühimmat bırakımı esnasında kavite kapakları açıldığında kavite içinde oldukça karmaşık bir akış alanı oluşur. Türbülanslı akış alanında kavitenin geometrik özelliklerine göre değişen basınç salınımları ve rezonanslı akustik modlar gözlenir. Zamana bağlı bu karmaşık akış mühimmatın başarılı bir şekilde bırakılmasına engel teşkil edebilir. Günümüzde süpersonik hızlarda mühimmatın sorunsuz bir şekilde bırakımı için çeşitli kontrol yöntemlerine başvurulmaktadır [1].



Resim 1. 1 : AP-3 Orion uçağında mühimmat deposunun açılması

## 1.1 Kavite Akışı

Kavite içindeki akış, kavitenin geometrik özelliklerine oldukça bağlıdır. Serbest akış Mach sayısına bağlı olarak ses altı (subsonik), ses ötesi (transonik) ve ses üstü (süpersonik) olarak sınıflandırılan kavite akışı geometrik özelliklerine göre uzunluk/derinlik oranına (L/D) ya da uzunluk/genişlik oranına (L/W) bağlı olarak sınıflandırılabilmektedir [3], [4].

Literatürdeki genel kaniya göre L/D değeri 1'den küçük olan kavite derin kavite olarak kabul edilse de Rossiter [5] L/D değeri 0.4'ten büyük olan kaviteyi sığ kavite olarak adlandırmaktadır. Sığ kavite içindeki sirkülasyon bölgesi sayısı L/D değerine göre belirlenmektedir. Derin kavite ise en fazla iki sirkülasyon bölgesi oluşması mümkündür.

Kavite uzunluk/genişlik oranı (L/W) ile ilgili çalışmalarda öncüler olan Block [6], Ahuja ve Mendoza [7], L/W değeri 1'den küçük olan kaviteyi iki boyutlu bir akustik alanı olduğunu belirtmişlerdir. L/W değeri 1'den büyük olduğunda kavite üç boyutlu bir akış alanına sahip olmaktadır. Kavitenin genişliği rezonans frekanslarını değiştirmese de, frekanslara karşılık gelen gücü ve dolayısıyla ses basınç seviyelerini (SPL) etkilemektedir. Bu sebeple iki boyutlu yapılan sayısal çalışmaların deneyler ile kıyaslanmasında herhangi bir sakınca bulunmamaktadır.

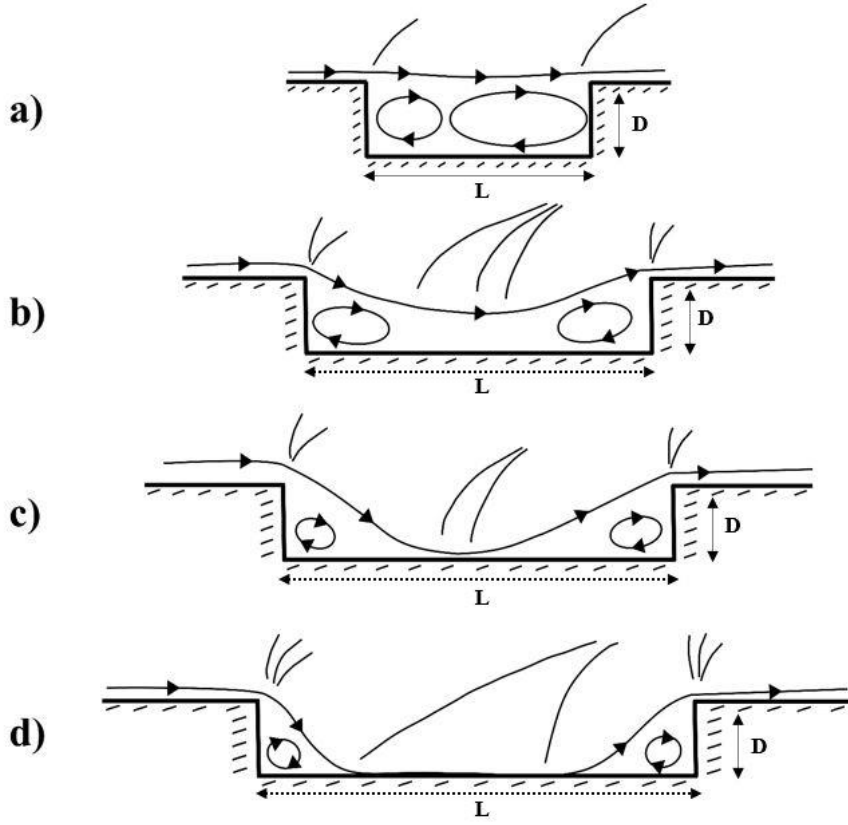
Kavitenin lineer olmayan davranışı L/D değerine göre açık kavite akışı, geçiş bölgesi kavite akışı ve kapalı kavite akışı olmak üzere üç kategoride incelenmektedir. L/D değeri 13'ten büyük olan kavite kapalı kavite akışı görülürken, bu değerin 10'dan küçük olduğu kavite akışı açık kavite akışıdır. L/D değeri 10 ile 13 arasında olan kavite akışı geçiş bölgesi akışı olarak adlandırılmaktadır [8].

Kapalı kavite akışında kayma tabakası kavite girişindeki ön duvarda (hücum kenarı) ayrılmaya uğrar, ardından kavite alt duvarına (kavite tabanı) çarpar ve son olarak kavite arka duvarında (fıracı kenarı) akışla tekrar birleşir. Kavite alt duvarına çarpan kayma tabakası, kavite içindeki akışı iki ana sirkülasyon bölgesine ayırır. Süpersonik serbest akış hızına sahip kapalı kavite akışında ön ve arka duvarda genişleme dalgaları görülürken, kayma tabakasının alt duvara çarpmasının etkisi ile şok dalgaları oluşumuna rastlanmaktadır [9].

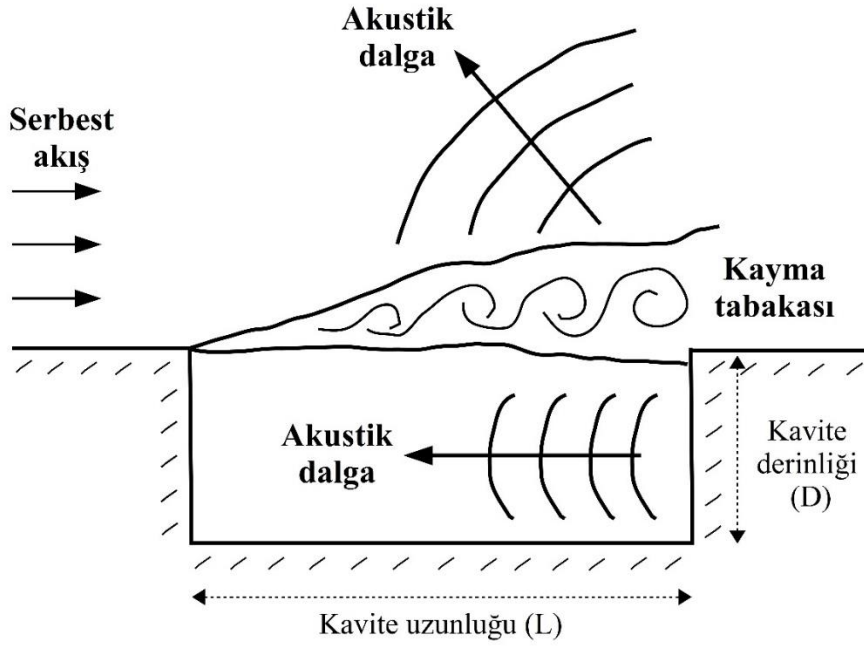
Açık kavite akışında ön duvarda ayrılma yaşayan kayma tabası alt duvara çarpmadan doğrudan arka duvara erişir ve bu noktada akışla tekrar birleşir. Kayma tabakası, kavite içi ve dışı olmak üzere akışı iki kısma ayırmaktadır. Bu iki kısmın arasındaki basınç farkı kavite içine kütle girişi ve çıkışı olmasını sağlamaktadır. Açık kavite akışında, kavite içinde tek bir sirkülasyon bölgesi oluşur ve bu bölgenin içinde farklı yapıda girdap oluşumları gözlemlenir. Kavite içinde oluşan girdap yapıları L/D değerine göre değişim göstermektedir. Kavite arka duvarıyla etkileşime giren kayma tabakası burada yüksek basınç değerlerinin oluşmasına ve kavite içinde akustik dalga yayılımına sebep olur. Açık kaviteler üzerindeki süpersonik akışlarda ön ve arka duvarlarda eğik şok oluşumları gözlemlenmektedir. Mühendislik uygulamalarında daha çok açık kavite akışı konfigürasyonları kullanılmaktadır [9].

Kavite içindeki akış pek çok parametreden etkilendiği için geçiş bölgesi akışı için kesin bir ayırım yapmak oldukça zordur. L/D değeri daha küçük olan geçiş bölgesi akışları ağırlıklı olarak açık kavite akışına benzer özellikler taşırken; L/D değeri büyüdükçe akış, kapalı kavite akışına benzemeye başlamaktadır. Geçiş bölgesi kavite akışının karakteristikleri serbest akışın Mach sayısına kuvvetle bağlıdır. Subsonik geçiş bölgesi akışlarında L/D değerleri arasındaki değişimler düzgün bir şekilde gerçekleşirken, süpersonik akışlarda ani özellik değişimleri gözlenmektedir [9].

Açık, kapalı ve geçiş bölgesi kavite akışları Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Rossiter [5], [10] kavite akışının incelenmesinde öncülük yapan araştırmacılardan biridir. Deneylerde yaptığı gözlemler sonucunda kavite akışı için bir model öne sürmüştür. Serbest akışın kavite girişinde ayrılmaya uğraması ile oluşan kararsız kayma tabakası kavite arka duvarına kadar taşınır. Kayma tabakasının arka duvarla etkileşimi sonucunda akustik dalgalar meydana gelir. Kavite dışına doğru ilerleyen dalgalar akustik alanı oluşturur. Kavite içinde ön duvara doğru ilerleyen akustik dalgalar kavite içindeki girdap yapılarını oluşturur. Daha sonra ön duvara ulaşır kayma tabakasında yeni girdapların oluşumuna katkıda bulunur. Akustik girdaplar ve bozunumlar bu şekilde bir geri besleme mekanizmasını oluşturur. Rossiter'in öne sürdüğü akış modeli Şekil 1.2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. 1 Kavite akışı tipleri (a) açık kavite akışı, (b) geçiş bölgesi-açık kavite akışı, (c) geçiş bölgesi-kapalı kavite akışı, (d) kapalı kavite akışı



Şekil 1. 2 : Rossiter Mekanizması

Rossiter 0.4-1.4 Mach sayısı aralığında yaptığı deneyler sonucunda basınç dalgalanmalarının kiplerinin tahmini için ampirik bir formül geliştirmiştir [5], [10]. Bu formül Denklem 1.1’de gösterilmiştir. Bu denklemde serbest akış hızını  $U_\infty$ , kavite uzunluğunu  $L$ , kip numarasını  $m$ ,  $m$ . kiplin frekansını  $f_m$  ve Mach sayısını  $M$  temsil etmektedir.  $K$  girdapların taşınım hızının serbest akış hızına oranıdır ve  $\alpha$  faz gecikme parametresidir. Deneysel sabitler olan  $K$  ve  $\alpha$  için Rossiter tarafından belirlenen değerler sırasıyla 0.57 ve 0.25’tir.

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

0.4-1.4 Mach sayısı aralığında geçerli olan Rossiter’in formülasyonu Heller ve Bliss[11] tarafından tüm Mach sayılarında geçerli olacak şekilde yeniden düzenlenmiştir. Düzenlenmiş formülasyon Denklem 1.2’de gösterilmiştir. Denklemde kavite rezonans frekansının belirlenmesinde kullanılan Strouhal sayısı  $St$  ile temsil edilmektedir. Rossiter ile benzer şekilde  $K= 0.57$  değeri seçilirken farklı  $L/D$  değerlerine karşılık farklı  $\alpha$  değerlerini içeren bir tablo oluşturmuşlardır. Literatürde basınç salınımlarının genlik tahmini için analitik bir formül bulunmazken salınım modlarının frekans tahminleri bu formülasyon ile elde edilebilmektedir.

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

## 1.2 Literatür Araştırması

### 1.2.1 Kavite literatürü

Akıшта gözlenen ayrılmalar ve iz bölgeleri aerodinamik incelemelerin temel konularındandır. Kavite akışının türbülanslı ve karmaşık yapısını incelemek, bu yapıya oluşturan ve kendi kendini besleyen kayma tabakasını araştırmak adına literatürde pek

çok deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmış, bu alandaki çalışmalar hala yoğun bir şekilde sürdürülmektedir.

Kavite akışı üzerinde yürütülen deneysel çalışmalar hava tünellerinde yapılan çalışmalar ve uçuş testleridir. Deneysel çalışmalarda veri almak için çeşitli basınç sensörleri, Schlieren fotoğraf çekim düzeneği, akış içine yerleştirilen parçacık takip mekanizmaları kullanılmaktadır. Gerekli ekipmanların yüksek maliyeti sebebiyle literatürde deneysel çalışmalardan çok sayısal çalışmalar yürütülmektedir. Bu nedenle literatürde nispeten az sayıda olan deneysel çalışmalar oldukça kıymetlidir.

Charwat ve arkadaşları [12] kavite akışındaki ayrılmayı etkileyen ve kavite içerisindeki oluşumlara sebep olan parametreleri araştırmak için deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Akışı etkileyen en önemli benzerlik parametresinin kavitenin uzunluğunun kritik kavite uzunluğuna oranı ( $L/L_{cr}$ ) olduğu ileri sürülmüştür. Kavite girişindeki sınır tabakanın özelliklerinin kavite içerisindeki oluşumları doğrudan etkilediği belirtilmiştir.

Carr [13] açık kavitelerdeki basınç salınımlarını etkileyen parametreleri araştırmak adına su masası deneyleri yapmıştır. Deneylerini hava ile yapılan çalışmalar ile karşılaştırdığında, su masası ile yapılan çalışmaların kavite içindeki akışı anlamak için yeterli olduğu sonucuna varmıştır. Carr'a göre kayma tabakasındaki salınımlar kavite içindeki salınımlarla ilişkilidir ve kayma tabakasındaki salınımlar yok edilirse kavite içindeki basınç salınımları da gözlenmeyecektir. Salınımları yok etmek amacıyla çeşitli kavite geometri konfigürasyonları üzerinde çalışılmış ve salınımı azaltan konfigürasyonlar süpersonik serbest hava jeti ile test edilmiştir. Bu testlerin dinamik basınç kayıtlarından ve schlieren fotoğraflarından elde edilen bilgilere göre kayma tabakası akışla firar tabakasından daha ileride birleşen konfigürasyonlarda kavite içindeki salınımlar yok edilebilmiştir. Bunlar beraber konfigürasyon sonuçlarının Mach sayısına bağlı olduğu da belirtilmiştir.

Stallings [14] akıştaki ayrılma sırasında mühimmatların aerodinamik karakteristiklerini incelemek adına kavite L/D değerleri 4 ile 11 arasında değişen kavite üzerinde deneyler yapmıştır. Mach sayıları 2.36 ve 2.86 arasında değişmiştir. Kavite derinliğinin basınç dağılımı üzerinde ciddi bir etkisi olduğu görülmüştür. Sığ kaviteelerde hücum kenarında ayrılmaya uğrayan kayma tabakası kavite alt duvarına çarpakta daha sonra kavite firar kenarı ile birleşmedir. Derin kaviteelerde ise kavite alt



duvarına bir çarpma gerçekleşmemekte, hücum kenarında ayrılan kayma tabakası akışla daha sonra firar kenarında serbest akışla birleşmektedir. Sığ kavitelerde kayma tabakası ve kavite arasında yüksek etkileşim görülürken, derin kavitelerde daha az ayrılma ve kavite ile kayma tabakası etkileşimi görülmüştür.

Kaufmann ve Clark [15] dikdörtgen kavitelerde Mach sayısı 0.6 ile 3 arasında değişen subsonik ve süpersonik kaviteler üzerindeki akışı deneysel olarak incelemişlerdir. Uzunluğun derinliğe oranı (L/D) 5.1, 5.6, 6.2, 8.9 ve 9.9 olan farklı geometrik konfigürasyonların incelendiği deneylerde Schlieren fotoğrafları ile akış görselleri oluşturulmuş, kavite duvarlarındaki belli noktalardan elde edilen basınç değerleri ile basınç salınımları, ses basınç seviyeleri (SPL) ve frekans alanındaki yoğunluk spektrumları oluşturulmuştur. Boş kavitelerdeki akışın yanısıra akustik baskılama cihazları olan engellerin akışa etkisi araştırılmıştır. Süpersonik hızlarda akustik sürüklenmede artışın belirtisi olarak arka duvar üzerinde yüksek basınç değerleri gözlenmiştir. Süpersonik hızlardaki deney verileri incelendiğinde Reynolds sayısının artışı ile birlikte modların tepe noktalarının değişmediği fakat ses basınç seviyelerinin arttığı kaydedilmiştir.

Perng ve Dolling [16] Mach 5 hipersonik kavite akışını incelemişlerdir. Genişlik/derinlik değeri (W/D) 3 olan ve uzunluk/derinlik değeri (L/D) 3 ile 5 arasında değişen kaviteler için deneyler gerçekleştirilmiştir. Arka duvardan elde edilen basınç verileri incelendiğinde arka duvar üzerinde şok oluşumu ve akustik dalga yayılımı gözlemlenmiştir. Ön duvardan yansıyan akustik dalgaların arka duvarda şok oluşturduğu anlaşılmıştır. 4 farklı arka duvar geometrisi kullanılarak kavite içerisindeki salınımlar yok edilmeye çalışılmıştır. Arka duvara eğim verilen geometride referans çalışmaya göre basınç salınımları 3.5 ile 7 kat sönümlenebilmiştir.

Ünalmiş ve arkadaşları [17] Mach sayısı 5 ve L/D oranları 3, 4, 5, 6 ve 7 olan kavitelerdeki akışı deneysel olarak incelemişlerdir. Planer lazer akış görüntüleyicilerden elde edilen resimlere göre 5 Mach hıza sahip kavitelerdeki akış için kayma tabakası içindeki dinamiklerin ve kavite içi akustik oluşumların eş zamanlı olmadığı ortaya çıkmıştır. Şok oluşumunun ve şok frekanslarının türbülanslı kayma tabakası sebebiyle oluştuğu ve kavite içindeki akışın karakteristiklerinin L/D oranına bağlı çıktığı görülmüştür. Kayma tabakasındaki sapmalar bir korelasyon ile kavite içindeki salınım döngüsü ile ilişkilendirilememiştir. Daha düşük Mach sayısındaki

akışların aksine, Mach sayısı 5 olan kavite akışında kayma tabakasındaki ve kavite içindeki dinamiklerin eş zamanlı gerçekleşmediği belirtilmiştir.

Chung [18] sıkıştırılabilir kavite akışının Mach sayısı, uzunluğun derinliğe oranı ve derinliğin sınır tabakası kalınlığına oranı parametrelerine bağlı karakteristiklerini incelemiştir. Açık kavite akışı ve geçiş bölgesi kavite akışının Mach sayısına bağlı değiştiği belirtilmiştir. Basınç salınım genliklerindeki artış açık kavitelere arka duvarda, kapalı kavite akışında ise kavite tabanının alt duvarının orta kısımlarında gözlenmiştir.

Disimile ve Toy [19] kavite W/D değeri 1 olan ve L/D değeri 1.47 ile 8.73 arasında değişen geometrilerde subsonik türbülanslı sınır tabakanın etkisini deneysel olarak incelemiştir. Kavitelere ait rezonans frekanslarının kavite uzunluğuna bağlı olduğu belirtilmiştir. Ses basınç seviyeleri incelendiğinde kavite içi enerjinin L/D değeri 1.47 ile 8.73 arasında % 60 arttığı tespit edilmiştir. Enerjideki bu artışa neden olarak girdap oluşumu, büyümesi ve doygunluğu gösterilmiştir.

Kavite akışının araştırmalarında deneysel çalışmaların yanında pek çok sayısal çalışma da yürütülmüş ve hala da yürütülmektedir. Sayısal çalışmalarda akış modellemeleri için çeşitli yöntemlere başvurulmuştur. Bunlardan bir kaçını Direct Numerical Simulation (DNS), Large Eddy Simulation (LES), Detached Eddy Simulations (DES) ve Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation (RANS)'dır.

Shih ve arkadaşları [20], 1.5 Mach süpersonik kavite akışını k- $\epsilon$  türbülans modeli ile simüle etmiştir. Ses basınç seviyelerini iyi tahmin eden bu model ile elde edilen ortalama statik basınç değerlerinin deneydeki sonuçlara göre daha düşük çıktığı belirtilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; arka duvar yakınında kayma tabakasından kavite içine doğru kütle girişi olduğu, ön duvara yaklaşıldığında ise kavite dışına doğru eğilen kayma tabakası üzerinden kavite dışına kütle çıkışı olduğu açıklanmıştır.

Zhang ve Edwards [21]; karakteristik uzunluk, ağ yapısı ve zaman adımı gibi farklı değişkenlerin süpersonik kavite akışına etkisini iki boyutlu olarak incelemiştir. Bu çalışmalarda RANS denklemleri kullanılmış ve türbülans modeli olarak k- $\omega$  türbülans modeli seçilmiştir. Zamana bağlı değişen akışın göze çarpan etkilerini yakalayabilmek için adaptif ağ yapısı çalışması yapılmıştır. Çeşitli Mach sayılarına ve L/D değerlerine sahip çalışmalar incelendiğinde; L/D=1 iken tek bir mod oluşumu gözlenmiş fakat

daha uzun kaviterde birden fazla mod oluşumu gözlenmiştir.  $L/D$  değerinin 1 olduğu durumda basınç salınımları güçsüzdür ve mod tahmini ağ yapısından oldukça etkilenmiştir. Daha uzun kaviterde basınç salınımları daha güçlüdür ve çözüm ağ yapısında daha az etkilenmiştir.

Tam ve arkadaşları [22], iki boyutlu süpersonik açık kavite akışını Baldwin-Lomax türbülans modelini kullanarak sayısal olarak incelemiştir. Sonuçlara göre, kavite içi ve dışı olmak üzere iki kısımdan oluşan ve kayma tabakasının gözlemlendiği açık kavite akışı oldukça karmaşıktır. Kayma tabakası ve arka duvarın etkileşimi sonucu oluşan basınç dalgalarının yayılımı, girdap oluşumları ve kararsız zayıf şok dalgaları mevcuttur.

Süpersonik kavite akışının iki boyutlu ve üç boyutlu zamana bağlı değişen RANS simülasyonları Rizzetta [23] tarafından 1988 yılında gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlardan elde edilen ortalama statik basınç değerleri, kavite duvarlarında gözlemlenen akustik ses basınç seviyeleri ve akustik frekans spektrumu sonuçları deneyler ile kıyaslanmıştır. Kıyaslanan değerlerin zamanda 10,000 adım gittikten sonra değişmediği, fakat frekans spektrumunu daha iyi elde edebilmek için zamanda daha fazla ileri gidilmesi gerektiği belirtilmiştir. Sonuçlar ile deneylerin arasındaki farkın, sayısal iterasyonlar ve çözüm için seçilen modelden ötürü olduğunu savunulmuştur. Herhangi bir türbülans modeli seçilmeden kendi kendine gelişen bir basınç salınımı elde edilemediğini ve seçilen model geliştirilirse deneyle daha uyumlu sonuçlar alınabileceğini açıklamıştır. Deney ile kıyasların sonucunda, sayısal çalışmanın harmonik frekansların genliğini daha yüksek tahmin ettiğini belirtilmiştir. İki boyutlu simülasyonlar ile üç boyutlu simülasyonlar kıyaslandığında; salınımların esas davranışının iki boyutla yakalanabileceğini, fakat arka duvarla etkileşen kayma tabakasının oluşturduğu girdap yapılarının üç boyutlu olduğu belirtilmiştir.

Ashcroft ve Zhang [24], subsonik hızlardaki kavite akışında Navier-Stokes denklemlerini  $k-\omega$  türbülans modeli kullanarak çözümlenmiştir. Sayısal çalışmadan elde edilen Rossiter modları deneyler ve Rossiter formülasyonu ile uyumlu çıkmıştır. Ortalama basınç dağılımı ve ses basınç seviyeleri de deneyler ile yakın sonuçlar vermiştir.

Aradag [1], 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 görülmüştür. Bununla birlikte, üç boyutlu simülasyonlarda basınç salınımlarının daha karmaşık bir yapıya sahip olduğu da görülmüştür. İki boyutlu simülasyonların akışın genel karakterini anlamak adına bir fikir verdiği fakat problemin fiziğini tam olarak anlamak için yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır.

Ayli [25], süpersonik kavite akışının 2 boyutlu ve 3 boyutlu simülasyonlarını RANS ile gerçekleştirmiş 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.

Lillberg ve Fureby [26], üç boyutlu Mach 1.5 kavite akışını Monotonically Integrated LES (MILES) ve Smagorinski (SMG) modeli ile incelemiştir. Üç boyutlu simülasyonların her iki model için de iki boyutlu simülasyonlara kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. MILES simülasyonlarının salınımlı basınç alanındaki frekansları daha iyi yakaladığı ve Smagorinsky modele göre daha iyi sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır.

Hamed ve arkadaşları [27], L/D değeri 5 olan 1.19 Mach kavite akışını Detached Eddy Simulation (DES) yöntemi ile incelemiştir. Sonuçlara göre DES, zamana bağlı değişen karmaşık kavite akışını anlamak için oldukça etkili bir yöntemdir ve 3 boyutlu URANS yöntemi ile kıyaslandığında daha iyi sonuçlar vermektedir.

Lawson ve Barakos [28], kavite akışı üzerine yapılmış deneysel ve sayısal çalışmalarını bir araya getirmiştir. İnceledikleri sayısal çalışmalarda Detached Eddy Simulation

(DES) ve Large Eddy Simulation (LES) yöntemlerinin deneyler ile oldukça uyumlu sonuçlar verdiği ve kavite akış fiziğini çözümlmek için paha biçilemez olduğu belirtilmiştir.

### 1.2.2 Pasif ve aktif kontrol yöntemleri literatürü

Havacılık uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan yüksek hızlı kavite akışının karmaşık bir yapıya sahip olduğu yapılan pek çok araştırma sonucunda anlaşılmıştır. Kavite içindeki akış alanı yüksek akustik etkileri, kararsızlıkları ve türbülansı barındırmaktadır.

Kavite akışının karmaşık yapısını ve yüksek akustik etkileri hafifletmek için kavite çevresindeki akış düzenlenmek istenmektedir. Bu amaçla çeşitli kontrol yöntemleri uygulanmaktadır. Kavite duvarlarına eğim vermek, dışarıdan eklenen kapak, fin ve benzeri donanımlar, karıştırıcılar ve girdap yaratıcılar ile akış davranışını değiştirmek gibi geometrideki kalıcı değişimler pasif kontrol yöntemleri olarak adlandırılmaktadır. Bu alanda yapılan deneyler sonucunda aktif kontrol yöntemlerine duyulan ihtiyaç ortaya çıkmıştır. Aktif kontrol yöntemleri sisteme dışarıdan enerji aktarımını gerektirmektedir. Aktif kontrol yöntemlerine örnek olarak salınımlı kapaklar, kütle enjeksiyonu, jet üfleme ve lazer enerjisi bırakımı örnek verilebilir. Aktif kontrol yöntemleri açık devre ve kapalı devre kontrol yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Kapalı devre kontrolünde düzenli olarak uçuş koşullarına uyumu sağlayabilmek adına geri besleme döngüsü bulunmaktadır [29].

Aktif kontrol yöntemleri pasif kontrol yöntemlerine kıyasla daha geniş aralıktaki akış koşullarında iyi performans göstermektedir. Fakat dışarıdan eklen yeni parçalar, enerji üretimi için gerekli destek cihazlarının maliyeti gibi sebeplerden ötürü uygulamada daha az tercih edilmektedir. Pasif kontrol yöntemleri daha özel bir aralıktaki akış koşullarına uygun olsa da aktif kontrol yöntemlerine göre daha ucuz, uçağa daha kolay yerleştirilebilir ve sistem performansı üzerinde daha az olumsuz etkiye sahiptir. Literatürde daha geniş akış koşullarına uygun olan pasif kontrol yöntemi arayışı çalışmaları sürmektedir [30].

Kavite ön duvarı üzerinden gerçekleştirilen kontrol mekanizmaları kayma tabakasını kaldırıp kayma tabakasının arka duvar ile olan etkileşimini azaltarak kavite içindeki ses basınç seviyelerini ve basınç salınımlarını düşürmeyi amaçlamaktadır. Kavite ön

duvarına farklı konfigürasyonlarda kapaklar yerleştirerek deneyler gerçekleştiren Rossiter, ses altı hızlardaki kavitelere herhangi bir ön duvar kapağının kavite içi basınç salınım yoğunluğunu düşürebildiğini açıklamıştır [5], [10].

Maurya ve diğerleri [31] L/D değeri 3 olan 1.65 Mach kavite akışında çeşitli arka duvar yüksekliği ve açılarının etkisi üzerine deneyler yapmışlardır. Arka duvar yüksekliği nominal değer % 25'ine düşürülmüş ve arka duvarın üst kısmına 90°, 60° ve 30° açılar verilmiştir. Arka duvar uzunluğunun değiştirilmesi ile baskın frekans modunun ikinci moddan üçüncü moda geçişi gözlenmiştir. Arka duvar açısının verilmesi ile kavite içindeki akışın daha kararlı hale geldiği kaydedilmiştir.

Perng ve Dolling [32], L/D değerleri 3 ile 5 arasında olan 5 Mach kavite akışının pasif kontrolü üzerine deneysel olarak çalışmışlardır. Çalışmada delikli ve eğimli arka duvar konfigürasyonlarının yanısıra engel ve girdap yaratıcı düzeneklerin de etkisi incelenmiştir. Arka duvar geometrisinde değişiklikler yapılarak güçlü salınım modlarında baskılama elde edilebilmiştir. Yüksek Mach sayılarında kayma tabakası dinamikleri ve kavite akustik özelliklerinin etkileşiminin düşük olduğu belirtilmiştir.

Lee ve arkadaşları [33] 1.8 Mach süpersonik kavite akışını LES ile modelleyip, pasif kontrol yöntemi çalışmaları ile ön duvar üzerindeki akışa yoğunlaşmış kayma tabakasını manipüle ederek akıştaki basınç salınımlarını hafifletmeye çalışmışlardır. Bu amaçla kavite girişine üçgen engel koymak ve kavite ön duvarının üst kısmına daha küçük bir iç kavite yerleştirmek olmak üzere iki uygulama gerçekleştirmişlerdir. Üçgen engelin aynı noktadan yapılacak jet üfleme işlemi ile eşdeğer bir etkiye sahip olacağı düşünülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde arka duvar etrafındaki basınç salınımlarının kavite içindeki basınç salınımlarını domine ettiği görülmüştür. Pasif yöntemler arasından özellikle iç kavite yerleştirmenin basınç salınımları üzerinde önemli bir azaltma yarattığı görülürken, üçgen engelin salınım sönümlenme adına kayda değer bir etkisi olmamıştır. Yapılan çalışmada kavite içine yerleştirilen iç kavitenin uzunluğu artırıldıkça basınç salınım enerjilerindeki düşüş artmıştır.

Levasseur ve diğerleri [34], üç boyutlu 0.85 Mach kavite akışını LES yardımı ile modellemişlerdir. Akışı pasif olarak kontrol etmek adına gelen akışın önüne çubuk ve üstü düz bir engel yerleştirilmiştir. Ortalama akışı değiştirmek, kayma tabakasını manipüle etmek, çubuğun ardındaki iz bölgesi ve türbülanslı karıştırma tabakası

arasındaki etkileşimi düşürmek amaçlanmıştır. Kullanılan iki farklı düzenek farklı baskılama mekanizmalarına sahip olmakla birlikte ortalama akıştaki ses basınç seviyesi düşürümleri benzerdir ve bu değerler 3-4 dB civarındadır. Gelen akış önüne yerleştirilmiş engel Rossiter modlarının basınç katılımına katkılarını düşürmüştür. Çubuk ise toplam basınç seviyesi dağılımında görülen güçlü tepe nokta değerlerini azaltmıştır.

Kim ve Chokani [35], L/D değeri 17.5 olan kapalı kavite üzerindeki 1.6 Mach süpersonik akışına pasif kontrol yöntemi uygulamışlardır. Pasif kontrol, Darcy Basınç-Hız kanunu kullanılıp kavite tabanı pürüzlü yapılarak uygulanmıştır. Pasif kontrol sonucu kapalı kavite akışının açık kavite akışına oldukça benzer bir yapıya dönüştüğü görülmüştür. Kapalı kavite akışında gözlenen güçlü sıkışma ve genleşme dalgaları yok olmuştur. Akış açık kavite akışına benzese de açık kavite akışında rastlanan güçlü salınımlar görülmemiştir. Sürüklenme katsayısının dörtte birine düştüğü görülmüştür. Pürüzlü yüzeyden üflenen hava hızı serbeş akış hızının % 5'i ve altında seçilmiştir. Uygulanan pasif kontrol yöntemi sonrası elde edilen sonuçlar oldukça umut vadeci bulunmuştur.

Rizzetta ve Visbal [36], L/D değeri 5 olan 1.19 Mach kavite akışını LES yöntemi kullanarak incelemiştir. Akış özellikleri incelendikten sonra aktif kontrol yöntemi olarak yüksek frekansta kütle enjeksiyonu uygulamasının akışa etkisi araştırılmıştır. Kayma tabakasına kütle enjeksiyonu yapmanın girdap özelliklerini değiştirdiği ve kayma tabakasının kararsız karakteristiğinin hafiflettiği anlaşılmıştır.

Apaçoğlu ve diğerleri [37], Reynolds sayısı 20,000 olan 2 boyutlu silindir üzerindeki akışın hava üfleme yöntemi ile kontrolü üzerine sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Silindir yüzeyindeki 4 delikten serbest akış hızının % 50'sine sahip hızda hava üfleme ile sürüklenme katsayısında % 23 azalma elde edilmiştir. Akışa dikgen ayrıştırma uygulanıp kipler incelendiğinde von Karman girdap yolu açık bir şekilde görülmüştür.

Vakili ve Gauthier [38], kavite üfleme parametresi adı verilen bir parametre geliştirmişlerdir. Mach sayısı 1.8 ve L/D değeri 2.54 olan kavite geometrisinde kütle enjeksiyonu yaparak deneyler gerçekleştirmişlerdir. Kütle enjeksiyonu için kavite girişinde yüksek yoğunluklu ve düşük yoğunluklu enjeksiyonu temsil eden iki farklı tasarım üzerinde çalışmışlardır. Düşük yoğunluklu enjeksiyon ile düşük debi

değerlerinde basınç salınımlarında daha fazla düşüş elde edilebilmiştir. Öne sürülen kavite üfleme parametresi Denklem 1.3'te gösterilmiştir. Kavite girişinden yapılan sürekli üfleminin kayma tabakasındaki kararsız yapıyı oldukça değiştirebildiği kaydedilmiştir. Kavite üfleme parametresi 0.04 iken kavite içindeki basınç salınımlarının 174 dB'den 147'ye düşürüldüğü kaydedilmiştir.

$$B_c = \left( \rho_w V_w / \rho_e V_e \right) \left( A_{inj} / A_{cavity} \right) \quad (1.3)$$

Arunajatesan vd. [39] kavite içi basınç salınımlarının baskılanması için hibrit RANS/LES bazlı analizler gerçekleştirmişlerdir. Serbest akışı hızı 1.5 Mach olan akış kavite girişinde üç farklı konfigürasyon ile kontrol edilmeye çalışılmıştır. İlk konfigürasyonda kavite girişine genişlik boyunca uzanan bir engel yerleştirilmiş ve bu engelin kayma tabakasının hareketini ve dolayısı ile kavite içinde gözlenen geri besleme döngüsünü değiştirdiği anlaşılmıştır. İkinci ve üçüncü konfigürasyonlarda kavite girişinden mikrojetler ve slot jetler ile hava üfleme yapılmış ve bu konfigürasyonlarda kayma tabakası içindeki türbülans yapısının değiştirilebildiği kaydedilmiştir. 2 ve 3 boyutlu basınç ve hız modları incelenmiştir. 2 boyutlu basınç modlarının akışın temsilinde yeterli olduğu anlaşılmıştır. Hız modlarının 2 boyutlu ve 3 boyutlu sonuçlarının farklı olduğu görülse de, akış kontrolündeki temel etkenin uzunluk boyunca ileyen kayma tabakasının yapısı olmasından ötürü 2 boyutlu hız modlarının incelenmesinin akış öngörüsünü verebildiği sonucuna varılmıştır.

Zhuang ve diğerleri [40], 2 Mach kavite akışı üzerine yaptıkları deneysel çalışmalarda kavite içindeki kararsız yapıları ortadan kaldırmak için kavite ön duvarı üzerinde süpersonik mikrojetler ile hava üfleme metodunu kullanmışlardır. Jetlerde kullanılan üfleme katsayısı küçük tutulmuş ve 0.0015 ( $B_c$ ) değeri seçilmiştir. Uygulama sonucu kavite içi tonların genlik değerlerinde 20 dB, toplam ses basınç seviyelerinde 9 dB ve üstü değerler elde edilmiştir. Mikrojet enjeksiyonu kavite karıştırma tabakasını değiştirmiş ve kavite içindeki kararsız yapılarda azalma gözlemlenmiştir.

Choi ve arkadaşları [41], serbest akış hızı 1.5 Mach olan akış üzerinde sürekli ve palslı mikrojet enjeksiyonlarının etkilerinin deneysel incelemesini yapmışlardır. Mikrojet tasarımı 27.5 mm çapındaki bir deliğin etrafına dairesel olarak konumlandırılmış 400µm çapındaki 16 delikten oluşmaktadır. Deneyler sonucunda 8-10 dB civarında



ses basınç seviyesi düşüşü elde edilmiştir. Paslı mikrojetlerin kullanımıyla sürekli mikrojet kullanımının aynı sonucu yakayabildiği görülürken, palslı mikrojet enjeksiyonunda sürekli mikrojet enjeksiyonundaki debinin %40'ının kullanıldığı not düşülmüştür.

Aradağ ve diğerleri [42] 2 boyutlu 1.5 Mach süpersonik kavite akışının aktif ve pasif kontrolü üzerine sayısal çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Aktif yöntem olarak kavite ön ve arka duvarları üzerine konumlandırılmış 2 mm çaptaki deliklerden jet üfleme yapılmıştır. Pasif kontrol yöntemleri olarak kavite girişine çeşitli açılarda plaka yerleştirmek, arka duvara çeşitli açılarda eğim vermek ve çeşitli çaplarda radius vermek uygulanmıştır. Jet üfleme yöntemi pasif kontrol yöntemleri kadar etkili olamamış ve en fazla 5 dB değerinde ses basınç seviyesi düşüşü gözlenmiştir. Kontrolsüz duruma göre kavite girişine eklenen 45° açılı plaka ile % 10, arka duvara radius vererek % 12-13, en etkili durum olan arka duvara 60° açı vererek yaklaşık % 20 oranda ses basınç seviyesi düşüşü elde edilmiştir.

Literatürde akış kontrolü için enerji bırakımı üzerine yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır. 1963 yılında lazer etkilenmiş kıvılcımın keşfedilmesinden beri, lazer enerjisi bir enerji bırakım yöntemi olarak kullanılmaya başlanmıştır [43].

Lazar vd. [30], 1.4 Mach serbest akış hızına ve L/D değeri 5.29 olan kavite akışına enerji aktarımının etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Bunun için kavite girişine lazer enerjisi palsı uygulanmıştır. Schlieren fotoğrafları incelendiğinde lazer bırakımı yapılan konumun etrafında büyük ölçekli bir girdap oluşumu gözlenmiştir. Schlieren fotoğraflarında lazer bırakımı sonucu büyük ölçekli girdabın oluşumu ve dağılımı aşamalı olarak gösterilmiştir. Sonuçlar hız vektörleri ile uyumlu bulunmuştur.

Yan ve arkadaşları [44], lazer enerjisi bırakımını sayısal olarak modellemişlerdir. Durgun hava üzerine lazer enerjisi bırakımı yapılmış, sabit yoğunluk ve ideal gaz kabulü altında lazer bırakımı yapılan bölgede küresel ve simetrik bir dıcaklık dağılımı olduğu varsayılmıştır. Oluşan sıcaklık dağılımı Gauss profili kullanılarak düzenlenmiştir. Sayısal olarak elde edilen sonuçlar deneyler sonuçları ile uyumlu bulunmuştur.

Aradağ ve diğerleri [45], 3 boyutlu 1.5 Mach kavite akışındaki basınç dalgalanmalarının lazer enerjisi ile kontrolü üzerine sayısal bir çalışma

gerçekleştirmişlerdir. Lazer enerjisi ile kavite içindeki akış yapısının değiştirilebildiği ve basınç dalgalanmalarının azaltılabildiği sonucuna varılmıştır. Enerjinin miktarı, fazı ve konumu gibi parametreler için optimum değerlerin araştırılmasının gerekliliği ortaya konmuştur.

Yılmaz ve Aradağ [46], süpersonik açık kavite akışına lazer enerjisi bırakımının basınç salınımları ve ses basınç seviyeleri üzerindeki etkilerini sayısal olarak araştırmışlardır. Periyot başına 30 kez bırakımı gerçekleştirilen 100 mJ değerindeki lazer enerjisi ile kavite arka duvarındaki ses basınç seviyelerinde 7 dB'ye varan düşüşler elde edilmiştir. Lazer enerjisi bırakım süresi arttıkça kontrolün etkinliğinin arttığı kaydedilmiştir. Kavite duvarlarından elde edilen basınç verilerine bir boyutlu dikgen ayrıştırma uygulanıp gerçek zamanlı akış kontrol çalışmalarında kullanılacak kritik sensör konumları belirlenmiştir.

### **1.2.3 Dikgen Ayrıştırma Yöntemi literatürü**

Dinamik sistemlerin matematiksel modeller ile ifade edilmesi ile çeşitli mühendislik problemleri kolaylıkla çözülebilir hale gelmektedir. Problemlerin çözümünde fayda sağlması amacıyla karmaşık sistemler düşük mertebeli sistemlere indirgenirse çözüme daha hızlı ulaşılmakta, sayısal çözüm süresi kısalmaktadır. Problemin amacına uygun olarak kesin sonuç ya da basit sistem arasında seçim yapmak gerekmektedir. Düşük mertebeye indirgenen sistemlerde kesin sonuçtan ödün verilerek amaca uygun olarak işlevsellik kazanılmaktadır. Karmaşık sistemleri daha basit modellere indirmek teorik ve deneysel akışkanlar mekaniği disiplinlerinde de son zamanlarda ilgi duyulan bir konu haline gelmiştir [47],[48].

Dikgen Ayrıştırma Metodu (DAY) veri setlerini analiz edip, veri setinin içindeki baskın özellikleri ortaya çıkarmada ve karmaşık sistemlerin düşük mertebeli modellere indirgenmesinde kullanılan güçlü bir yöntemdir. Akışkanlar mekaniğine Lumley tarafından tanıtılan DAY, diğer disiplinlerde Temel Bileşenler Analizi ya da Karhunen-Loève Ayrıklaştırması olarak bilinmektedir. Veri gruplarına DAY uygulamasında en çok kullanılan yöntemler ise Tekil Değer Ayrıklaştırması ve Galerkin Projeksiyonu'dur. İlk olarak hava tahmini yapmak adına geliştirilen bu yöntem sonrasında görüntü işleme, sinyal analizi, veri sıkıştırma, akışkanlar mekaniği,

kimya mühendisliği ve okyanus bilimi gibi çok çeşitli alanlarda da kullanılır hale gelmiştir [49],[50].

Lineer bir yöntem olması DAY'ı oldukça cazip kılmaktadır. Arkasındaki matematiksel teori güçlüdür ve kompakt bir halde sunulmuştur. Bu durum lineer olmayan yöntemlere kıyasla daha çok tercih edilmesini sağlamıştır. Bununla birlikte DAY problemin doğrusallığı hakkında bir varsayım da yapmamaktadır. DAY kesin ve detaylı sonuçlardansa, daha optimum ve sistemin baskın özelliklerini gösteren genel sonuçlar sağlamaktadır [50].

Literatürde atmosfer ve okyanus sistemlerinin modellenmesi için yürütülen DAY uygulamaları bulunmaktadır. Bu sistemler doğaları gereği oldukça karmaşıktır ve modellenmenin yapılacağı akış alanı oldukça geniştir. Bu sistemlerin sayısal çözüm süresi uzun ve maliyeti oldukça yüksektir. Aynı zamanda bu sistemler bilgisayarlar için büyük bir hafıza yükü teşkil etmektedir. Atmosfer ve okyanus sistemleri gibi büyük ölçekli sistemlerde bu sorunların önüne geçmek adına düşük mertebeli modeller oluşturmak oldukça fayda sağlamaktadır. Cao ve arkadaşları [51], DAY ve Galerkin projeksiyonu yardımı ile tropik pasifik okyanusunun büyük ölçekli üst sirkülasyon bölgesinin düşük mertebeli modellenmesini yapmıştır. Düşük mertebeli model sonuçları orijinal model ile yüksek uyumluluk göstermiştir. Çalışmada büyük ölçekli atmosfer ve okyanus sistemlerinin kaç ekran görüntüsü kullanılarak modellenebileceği, modellemede kullanılan temel fonksiyonlarının ve mod sayılarının çözüme etkisi ayrıca incelenmiştir. Düşük mertebeli sistem modeli oluştururken kullanılan ayırık verilerin sonuca etkisi oldukça büyüktür. Sistemin temel özelliklerini yakalayabilmek ve doğru bir sistem modellenmesi yapmak için alınacak verilerin örnekleme frekansı ve veri topluluğunun boyutunun önemi oldukça yüksektir. Uzunoğlu ve arkadaşlarının [52], sayısal hava tahmininde kullanılan veri topluluğunun belirlenmesi üzerine çalışmaları bulunmaktadır. Kullanılan veri topluluğunun boyutunu artırmanın ve azaltmanın sonuç üzerine etkisi ampirik ortogonal fonksiyonlar kullanılarak incelenmiştir.

Feeny ve Kappagantu [53], dikgen ayrıştırma ile tahmin edilen modlar ile gerçek titreşim modları arasındaki ilişkiyi anlamak adına çalışmalar yürütmüşlerdir. Lineer olan ve dışarıdan bir titreşim sönümlemesine maruz kalmayan sistemlerde dikgen ayrıştırma kipleri sisteme ait lineer normal kiplere yakınsamıştır. Bu durumun hafif

sönümlü lineer sistemler için de geçerli olduğu görülmüştür. Bazı deneysel uygulamalarda, sistemlere ait kiplerin bulunmasında Dikgen Ayırıştırma Yöntemi'nin geleneksel modal analizin yerini alabileceği düşünülmüştür [53].

DAY, Kappagantu ve Feeny tarafından [54] sürtünme ile uyarılmış bir sistemin optimum modal indirgemesi için kullanılmıştır. DAY ile oluşturulan indirgenmiş model nitel ve nicel araçlarla doğrulanmış ve çalkantı oluşumları gözlemlenmiştir. Sistemin doğal lineer kiplerinden dikgen ayırıştırma sonucu elde edilmiş kiplerin kullanılmasının daha faydalı olacağı sonucuna varılmıştır [54].

Lumley, Holmes ve Aubry akışkanlar mekaniğine dikgen ayırıştırma metodu uygulayan öncülerdendir. Dikgen ayırıştırma ve Galerkin metodlarını kullanarak, ampirik eigen fonksiyonlar (temel fonksiyonlar) yardımı ile türbülanslı sınır tabakayı modellemişlerdir. Akım yönündeki girdap yapılarının temel davranışları deneysel çalışmalarla uyumlu bulunmuştur. Sınır tabakanın dışındaki basınç sinyallerinin girdap oluşumunu, dağılımını ve ortalama frekans değerlerini belirleyen faktör olduğu sonucuna varılmıştır [55].

Cohen ve arkadaşları [56], silindir arkasındaki akışı kontrol etmek ve “von Karman vortex street” yapısını baskılamak için çalışmışlardır. Akış kontrolünde kullanılacak sensör sayısını ve sensörlerin yerlerini belirlemek adına akış alanından elde edilen vortisite verilerine DAY uygulanmıştır. İncelenen laminar akışın Reynolds sayısı 100'dür. Sayısal simülasyonlardan elde edilen verilere DAY uygulanıp sensör sayısı ve sensör yerleri belirlenmiştir. Yapılan çalışmayı doğrulamak adına su tüneli deneyleri yapılmıştır. Veriler hem sayısal çalışma ile hem de su tüneli deneyleri ile incelenmiştir. Deneysel verilerin kök ortalama kare hataları incelendiğinde ilk iki kipte % 6, sonraki iki kipte ise % 20 hata görülmüştür. Elde edilen değerler kısmi dayanımlı kontrolcüler için kabul edebilir seviyede çıkmıştır [56].

Aradağ ve arkadaşları [57] 3 boyutlu silindirin arkasındaki akışa filtrelenmiş DAY uygulamışlardır. Akış içindeki farklı boyutlardaki yapıları ayırıştırmak için Hibrit Filtrelenmiş DAY ve FFT Esaslı 3B Filtrelenmiş DAY olmak üzere iki metot incelenmiştir. Her iki metot için de Reynolds sayısı 20,000 olan 3 boyutlu silindirin ardındaki iz bölgesinden alınan verilere mekansal alçak geçişli filtreleme uygulanmış, sonrasında ise DAY uygulaması ile akış kipleri (modları) belirlenmiştir. Her iki metot ile de von Karman iz bölgesi gibi akışa ait büyük ölçekli yapılar yakalanabilmiştir.

Hibrit Filtrelenmiş DAY metodu akış yönündeki yapıların genliklerini ve faz değişimlerini yakalamakta başarılı olmuştur. FFT Esaslı 3B Filtrelenmiş DAY ise akışın içindeki iki boyutlu özellikleri olan yapıları yakalamakta umut verici bulunmuştur. Bu yöntemde öncelikle bir boyut ölçeği belirlenmiş ve bu ölçeğin altındaki oluşumlar ayrı ayrı filtrelenerek veri grubu son halini almıştır. Hibrit Filtrelenmiş DAY akış yönünde iyi sonuçlar verirken, FFT Esaslı Filtrelenmiş DAY metodunun 3 boyutlu türbülanslı akışlar için daha faydalı sonuçlar verdiği için daha iyi bir alternatif olduğu sonucuna varılmıştır [57].

Paksoy [58] zaman ve maliyet ihtiyacı yüksek olan Hesaplama Akışkanlar Dinamiği simülasyonlarına duyulan ihtiyacı düşürmek adına iki boyutlu silindir üzerindeki laminer ve türbülanslı akış ile iki boyutlu sürülmüş kavite akışı üzerinde çalışmalar yürütmüştür. Sürülmüş kavite akışı farklı Reynolds sayıları için vortisite-akım fonksiyonu yaklaşımı kullanılarak iki boyutlu Navier-Stokes denklemlerinin sayısal çözümü ile oluşturulmuştur. Uygun akış kontrolü yöntemini geliştirebilmek için silindir arkasındaki iz bölgesine ve sürülmüş kavite akışına Dikgen Ayırıştırma Yöntemi uygulanmıştır. DAY ile elde edilen kipi genlikleri, akışın zaman bağlı davranışının tahmin edilmesi için Yapay Sinir Ağları (YSA) uygulamasında girdi olarak kullanılmış ve girdiler ile çıktılar arasındaki ağlar eğitilerek uygun ilişki oluşturulmuştur. Sonuç olarak akış kontrolü için DAY ve YSA kullanılarak akışın yeterli düzeyde tamin edilebileceği belirtilmiştir [58].

Rowley ve arkadaşları [59] düşük Reynolds sayılarına ve laminer sınır tabakaya sahip kavite akışı üzerinde DAY çalışmaları yürütmüşlerdir. Kavite içindeki hız verileri DNS kullanılarak elde edilmiştir. Öncelikle Euler denklemleri ayrıştırılıp, DAY ve Galerkin yöntemi kullanılarak kavite içindeki akış karakteristikleri düşük mertebeli modeller ile temsil edilmiştir. Denklemlere viskoz terimler eklendiğinde modeller daha iyi sonuç vermiştir. Salınım genlikleri viskoz olmayan akışta artar iken, viskoz terimlerin olduğu modellerde DNS ile oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Düzgün çözüm ağı kullanılarak interpolasyondan kaynaklanabilecek hataların önüne geçilmiştir ve çözüm ağı noktalarından elde edilen hız değerleri kullanılarak akışa ait kipler elde edilmiştir. Modeller daha az kipi kullanıldığında ve daha kısa simülasyon sürelerinde daha iyi sonuç vermektedir. Simülasyon süresi uzatıldığında genlik tahminlerinde hatalar oluşmaya başlamaktadır. Bunun sebebi olarak modellerde

ortalama akışın değişmesi durumunda kayma tabakası yayılımı ve çalkantıların büyüme oranı hakkında etkileri barındıracak terimler olmaması gösterilmiştir [59].

Rowley ve arkadaşları [60] sıkıştırılabilir akışlar için DAY ve Galerkin projeksiyonu uygulamaları için alternatif bir metod sunmuşlardır. Bu metod düşük Reynolds sayısına ve ortalama Mach sayısına sahip soğuk akışlar için geçerlidir. Navier-Stokes denklemlerinin izotropik bir versiyonu kullanılmış, denklemleri karmaşıklaştıran kübik terimler ve zaman türevleri çıkarılmıştır. Literatüre durma noktası entalpisi ve durma noktası enerjisine dayanan yeni bir iç çarpım tanıtılmıştır. Method serbest akış hızı 0.6 olan kavite akışına uygulanmış ve elde edilen DAY kipleri ile kayma tabakası ve akustik dalgaların içindeki girdap benzeri yapıların ayırt edilebildiği görülmüştür [60].

Gloerfelt [61], Rowley ve arkadaşlarının [60] izotropik modelini sıkıştırılabilir 2 boyutlu ve 3 boyutlu açık kavite akışlarına uygulamıştır. Uzun zamanlı akış davranışında stabilizasyon gereksinimi görülmüş ve 2 boyutlu kavite üzerinde çeşitli stabilite metotları denenmiştir. 3 boyutlu konfigürasyon sonuçlarının kavitenin zengin dinamiklerini daha fazla yansıtabildiği, eş zamanlı iki mod (kip) oluşumunun gözlemlendiği ve modlar arası pek çok lineer olmayan etkileşimin olduğu açıklanmıştır. Çok uzun zamanlı davranış incelemesi yapıldığında ise fazın yavaşça kaybolduğu ve etkileşimlerin sürdürülebilirliğinin azaldığı görülmüştür. Akıştan ortalama değeri çıkarmanın 2 boyutlu akış incelemelerinde pek bir etkisi olmadığı belirtilmiştir. Fakat 3 boyutlu akışta ortalama akış ile olan lineer olmayan etkileşimlerin etkisi ile DAY ve Galerkin projeksiyonunun dinamik davranışının geliştiği gözlemlenmiştir [61].

Kasnakoğlu [62] kavite akışının düşük mertebeli modellenmesi, lineer olmayan analizi ve akış kontrolü için genellenebilir bir matematiksel bir yöntem geliştirmiştir. Hilbert uzayı optimizasyonuna dayanan sistem girdisi ayırımı, DAY ve Galerkin projeksiyonu üzerine uygulanmıştır. Model içinde gömülü belirli yapıları ortaya çıkarmak için Ortalama Teorisi ve Merkez Dağıtıcılık Teori yardımı ile yeni bir teknik geliştirilmiştir [62].

Nagarajan ve arkadaşları [63] L/D oranı 2 olan sıkıştırılabilir açık kavite akışının kontrolü için düşük mertebeli sistem oluşturmada Dikgen Ayırıştırma Yöntemi'nden faydalanmışlardır. Kavite derinliği baz alınarak hesaplanan Reynolds sayısı 1500 olan

akışın Mach sayısı 0.6'dır. 112 anlık görüntü kullanılarak akışın 2 Rossiter periyodu incelenmiştir. Akış kalibrasyonu Tikhonov düzenlileştirmesi ile yapılmıştır. Kalibre edilmemiş durumdan elde edilen kiplerde iraksamaya meyil görülürken, kalibre edilmiş akıştan elde edilen kiplerde bu duruma rastlanmamıştır. Çalışma nihayetinde kalibre edilmiş düşük mertebeli laminer kavite akışı modeli oluşturulmuş ve gelecekte yapılacak çalışmalar için kontrol edilebilir akış modeli yaklaşımı ortaya atılmıştır [63].

Bortz ve arkadaşları [64] L/D değeri 4.5 ve serbest akış hızı 0.9 Mach olan açık kavite akışına ait aktif kontrol sisteminin optimizasyonu için DAY'a başvurmuşlardır. Kavite içine düzenli olarak kavite hücum kenarının üst köşesinden 60°'lik açı ile 0.005-0.45 Mach aralığında hava enjeksiyonu yapılmıştır. Düzgün hava enjeksiyonunda, 0.2 Mach'tan düşük enjeksiyonlarda titreşim genliklerinde ciddi düşüşler elde edilirken, daha yüksek seviyede hava üflemesi kavite içinde sürüklenmeye bağlı düzensizliklere sebep olmuştur. Düzenli enjeksiyonun yanı sıra harmonik uyarımın da etkisi araştırılmıştır. Genlik değeri ortalama değere göre küçük olan salınımlı hava enjeksiyonlarında (harmonik uyarım) kavite için salınım genliklerinde düşüş elde edilmiştir. En iyi durum sonucunda düzensiz titreşim yükünde 17 dB'ye varan düşmeler gözlenmiştir. Basınç verilerine DAY uygulandığında toplam enejinin % 99'unun ilk 4 kip ile ifade edebildiği görülmüştür. Bu sonuçtan ötürü ilk 10 kip seçilmiş ve bu 10 kipi sistemdeki önemli bilgileri fazlasıyla içerdiği düşünülmüştür. Dikgen Ayırıştırma Metodu'nun smilasyon sonrası ard işleme yöntemleri için öneminin kaydadeğer olduğu ve büyük bir depolama alanı kazanımı sağladığı belirtilmiştir [64].

### **1.3 Tezin Amacı**

Bu tez çalışmasında 1.5 Mach serbest akış hızına sahip ve L/D değeri 5.07 olan açık kavite akışının zamana bağlı değişen karmaşık yapısının ve akustik özelliklerinin anlaşılması için iki ve üç boyutlu HAD simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucu tespit edilen yüksek basınç değerlerini ve salınım genliklerini düşürmek, gözlenen yüksek akustik etkileri hafifletmek amacı ile kavite akışına pasif ve aktif kontrol yöntemleri uygulanmış ve uygulanan yöntemlerin süpersonik kavite akışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Uygulanan pasif yöntemler kavite arka duvarına çeşitli açılarda eğim vermek, kavite girişine farklı uzunluklarda plaka eklemek ve

kavite duvarlarına engeller yerleştirmektir. Aktif yöntemler ise mikrojetler ve jetler ile hava flemdir. Kontrollü ve kontrolsüz akış dinamiklerinin daha ayrıntılı incelenmesi için simülasyonlardan elde edilen hız verilerine uygun dikgen ayrıştırma uygulanmıştır. Gerçek zamanlı akış kontrolünde için uygun sensör konumlarının belirlemek amacıyla kavite duvarlarından elde edilen basınç verilerine bir boyutlu dikgen ayrıştırma uygulanmıştır.





## 2. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

Bu tez çalışmasında süpersonik kavite akışı simülasyonları için iki ve üç boyutlu sıkıştırılabilir Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes denklemleri (RANS) yoğunluk tabanlı algoritma kullanılarak çözülmüştür. Simülasyonlar ticari bir yazılım olan ANSYS Fluent çözücüsü ile gerçekleştirilmiştir. Türbülans modellemesinde standart  $k-\omega$  modeli kullanılmıştır. Simülasyonlarda zamanda ve mekanda ikinci derece ayrıklaştırma uygulanmıştır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği sonuçları ard işleme yöntemleri ile incelenmiştir. Akışın daha detaylı araştırılması için HAD sonucundan elde edilen hız verilerine Dikgen Ayrıştırma Yöntemi uygulanmıştır.

### 2.1 Korunum Denklemleri

Hareket denklemleri kütle, momentum ve enerji korunum denklemleridir. Bu denklemlerin sıkıştırılabilir akış için kartezyen koordinatlara göre düzenlenmiş halleri Denklem 2.1, 2.2, 2.3'te verildiği gibidir [65].

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

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j + p \delta_{ij} - \tau_{ij}) = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial(\rho e_0)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j e_0 + u_j p + q_j - u_i \tau_{ij}) = 0 \quad (2.3)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $x_i$  ve  $x_j$  kartezyen koordinatları,  $\rho$  yoğunluğu,  $u_i$  ve  $u_j$  hız bileşenlerini,  $t$  zamanı ve  $p$  basıncı temsil etmektedir.  $\delta_{ij}$  kronecker deltadır.  $i = j$  iken  $\delta_{ij} = 1$ 'dir ve  $i \neq j$  iken  $\delta_{ij} = 0$ 'dir.

Gerilim tensörü  $\sigma_{ij}$  Denklem 2.4'te verildiği gibidir ve Denklem 2.2'deki momentumun korunumu denkleminde bu şekilde eklenmiştir. Viskoz gerilim tensörü  $\tau_{ij}$  Denklem 2.5'teki şekilde açılır. Burada  $S_{ij}$  açılmal deformasyon tensörüdür ve Denklem 2.6'da gösterildiği gibidir.  $\mu$  kayma viskozitesi iken  $\mu_v$  yığın viskoziteyi temsil etmektedir.

$$\sigma_{ij} = p\delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (2.4)$$

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \left(\frac{2}{3}\mu - \mu_v\right)\delta_{ij}S_{kk} \quad (2.5)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (2.6)$$

Hareket eden bir parçacığın birim kütleyle karşılık gelen toplam enerjisi  $e_0 = e + k$  şeklindedir. Burada  $e$  iç enerji iken  $k$  birim kütle için kinetik enerjisidir.  $k$  Denklem 2.7'deki gibi gösterilir.

$$k = \frac{1}{2}u_i u_i \quad (2.7)$$

Denklem 2.3'te verilen enerjinin korunumunda  $q_j$  ısı akısıdır ve açılımı Denklem 2.8'de verilmiştir. Bu denklemde  $T$  sıcaklığı temsil ederken  $\kappa$  ısı iletkenlik katsayısıdır. Isı iletkenlik katsayısına Denklem 2.9'da verilen Prandtl sayısından,  $Pr$ , ulaşılabilir. Burada  $C_p$  sabit basınçta ısı kapasitesidir.

$$q_j = -\kappa\left(\frac{\partial T}{\partial x_j}\right) \quad (2.8)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\kappa} \quad (2.9)$$

Sıkıştırılabilir akış çözümlerinde korunum denklemlerine ek olarak Denklem 2.10 ve 2.11'de verilen ideal gaz denklemi (hal denklemi) ve termodinamik ilişki göz

önünde tutulmalıdır. Denklem 2.10'da verilen ideal gaz denkleminde  $R$  ideal gaz sabitidir ve  $R = C_p - C_v$  şeklinde gösterilir.  $C_p$  sabit basınçta ısı kapasitesi iken  $C_v$  sabit hacimde ısı kapasitesidir. İdeal gazlar için  $C_p$  ve  $C_v$  sabittir. Denklem 2.11'de verilen termodinamik ilişkide  $e$  iç enerjidir ve  $e = C_v T$  eşitliği sağlanır.

$$p = \rho RT \quad (2.10)$$

$$e = e(T, v) \quad (2.11)$$

## 2.2 Türbülans

Günlük hayatta ya da mühendislik uygulamalarında karşılaştığımız akışların çoğu türbülanslıdır. Binaların, arabaların ve uçakların etrafındaki akış, boru ve kanallardaki akış türbülanslı akışın en tipik örneklerindedir. Türbülansın herkes tarafından benimsenmiş bir tanımı olmasa da bir akış içinde ortalama değer üzerine etkiyen kendi kendini besleyen salınımlı akış özellikleri olarak açıklanabilir. Türbülanslı akışta her bir akış özelliğinin zamana bağlı ortalama değeri ve ortalama değerden sapan çalkantılı değeri birlikte bulunur. Örnek verilecek olursa; hız  $u_i = \bar{u}_i + u'_i$  şeklinde ifade edilir. Burada  $\bar{u}_i$  ortalama hız değerini temsil ederken  $u'_i$  çalkantılı hızı yani ortalama değerden sapan salınımlı hız değerini ifade etmektedir [66], [67].

Türbülanslı akışın tek bir tanımı olmasa da kabul görmüş bir takım özellikleri bulunmaktadır [66]:

- Türbülanslı akış düzensiz ve kaotiktir. Kaotik davranış rastgele değildir ve Navier-Stokes denklemi tarafından tanımlanmıştır. Akış içinde farklı ölçeklerde girdaplara rastlanır. Girdaplar karakteristik hız ve karakteristik uzunluk değerlerine sahiptir. Büyük bir girdap yapısı bünyesinde birden fazla daha küçük girdap yapısını barındırabilmektedir. Büyük ölçekli girdap yapıları küçük ölçekli girdaplı yapılara göre daha karmaşıktır ve eş zamanlı yapılara sahiptir. Küçük ölçekli girdaplar daha düzenlidir ve benzer karakteristikler içerir.

- Türbülanslı akışta yayılım katsayısı artar. Artan yayılım katsayısı duvar sürtünmesini ve ısı transferini artırır.
- Türbülanslı akış yüksek Reynolds sayılarında oluşur. Boru içindeki akışta türbülans koşulu  $Re_D \geq 2300$  iken, dış akışlarda  $Re_x \geq 5 * 10^5$  şeklindedir. Reynolds sayısı arttıkça gidap ölçek genişliği artar ve en küçük girdap ölçeği küçülür.
- Türbülanslı akış zamana bağlıdır ve üç boyutludur. Denklemler zaman ortalamalı ve geometri iki boyutlu özelliklere sahip ise iki boyutlu akış kabulü yapılabilir.
- Türbülanslı akışta enerji yitimi gözlenir. Büyük boyutlu girdaplar enerjilerini daha küçük girdaplara aktarır. En küçük ölçekli girdap yapısına gelindiğinde girdabın barındırdığı kinetik enerji viskozitenin etkisi ile ısı enerjisine dönüşür. En büyük ölçekli girdaplardan en küçük ölçekli girdaplara yapılan enerji aktarım süreci Kolmogorov tarafından açıklanmıştır ve Kolmogorov'un Enerji Şelalesi olarak adlandırılır. Reynolds sayısı arttıkça enerji şelalesi uzamaktadır.
- Türbülanslı ölçekler moleküler ölçekten yüksek olduğu için akışın continuum olduğu kabul edilir.

Serbest akış türbülansı, basınç gradyeni, ısı transferi, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey eğriliği laminer akıştan türbülanslı akışa geçişi etkileyen faktörlerdir. Sınır tabaka akışı, kayma tabakası akışı ve ızgara ardındaki akış (grid turbulence) uygulamalarda sıklıkla karşılaşılan türbülanslı akış örnekleridir [67].

Türbülanslı akışın içinde barındırdığı büyük ölçekli girdaplar ve içerdikleri yüksek çalkantılar uzun ömürlüdür. Küçük ölçekli girdaplar ise barındırdıkları düşük çalkantılar sebebiyle daha kısa ömürlüdür. Kolmogorov'un Evrensel Denge Teoremine (Universal Equilibrium Theory) göre büyük ölçekli girdaplardan daha küçük ölçekli girdaplara aktarılan enerji transferi en küçük ölçekli girdabın enerji yitimine neredeyse eşit kabul edilir. En küçük ölçekli girdapları etkileyen birincil parametreler ortalama enerji yitimi ve dinamik viskozite olduğu için Denklem 2.12'deki eşitlik kullanılarak boyut analizi yapılır [66].

$$v_\eta [m/s] = \nu^a [m^2/s] \varepsilon^b [m^2/s^3] \quad (2.12)$$

Denklem 2.12’de  $v_\eta$  Kolmogorov ölçeğindeki hızı,  $\nu$  dinamik viskoziteyi ve  $\varepsilon$  yitimi ifade eder. Alt indis  $\eta$  en küçük girdap ölçeği olan Kolmogorov ölçeğini temsil eder. Denklemdeki a ve b katsayılarına uygun değerler verilerek Kolmogorov ölçeğinde uzunluk ( $l_\eta$ ), hız ( $v_\eta$ ) ve zaman ( $\tau_\eta$ ) ifadeleri sırasıyla Denklem 2.13, 2.14 ve 2.15’teki gibi elde edilir [66].

$$l_\eta = \left( \frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (2.13)$$

$$v_\eta = (\nu\varepsilon)^{1/4} \quad (2.14)$$

$$\tau_\eta = \left( \frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (2.15)$$

### 2.2.1 Türbülansın modellenmesi RANS ve FANS

Türbülanslı akışta her bir akış özelliği ortalama bir değer ve ortalamadan sapan çalkantılı değerlerin toplamı olarak ifade edilir. Ortalama değerler elde edilirken iki farklı yaklaşım kullanılır. Bunlar Reynolds ortalaması ve Favre ortalamasıdır. Reynolds ortalamasında Denklem 2.16’da gösterildiği şekilde zaman ortalaması alınır. Favre ortalamasında ise Denklem 2.17’deki gibi yoğunluk ağırlıklı zaman ortalaması alınır.

$$\bar{f} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} f dt \quad (2.16)$$

$$\bar{f} = \frac{1}{\rho} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \rho f dt = \frac{\overline{\rho f}}{\bar{\rho}} \quad (2.17)$$

Türbülans modellenirken Navier-Stokes denklemleri ortalama alma işlemi uygulanarak yeniden düzenlenir. Uygulanan ortalama alma işlemi zaman ortalaması

ise Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes denklemleri (RANS), yoğunluk ağırlıklı zaman ortalaması ise Favre Ortalamalı Navier-Stokes denklemleri elde edilir. RANS geliştirilirken yoğunluk salınımlarının olmadığını varsayan Morkovin's hipotezi baz alınmıştır. Daha yüksek Reynolds sayılarındaki uygulamalarda bu hipotezin varsayımı ortadan kaldırılmış ve FANS denklemleri oluşturulmuştur. Favre ortalaması alınacak akış özellikleri Denklem 2.18'deki gibi ayrıklaştırılabilir. Burada  $\tilde{f}$  Favre ortalama değerini,  $f''$  ise Favre çalkantılı değerini temsil etmektedir. Favre ortalamasına dair daha detaylı bilgi Hoffman'ın Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği III adlı kitabında bulunmaktadır [67].

$$f = \tilde{f} + f'' \quad (2.18)$$

Korunum denklemlerinin Favre ortalaması alınacak şekilde Favre ortalama ve çalkantılı değerlerinin ayrıklaştırılıp düzenlenmiş biçimleri Denklem 2.19, 2.20 ve 2.21'de gösterilmiştir.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j + \bar{p} \delta_{ij} + \overline{\rho u_i'' u_j''} - \bar{\tau}_{ij}) = 0 \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{e}_0)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{e}_0 + \tilde{u}_j \bar{p} + \overline{u_j'' \bar{p}} + \overline{\rho u_j'' e_0''} + \bar{q}_j - \overline{u_i \tau_{ij}}) = 0 \quad (2.21)$$

Denklemlerin düzenlenmesi sonucunda  $\overline{\rho u_i'' u_j''}$  terimi ortaya çıkar. Bu terim denklemde türbülansın etkisini temsil eden türbülanslı Reynolds gerilmesi olarak tanımlanmıştır ve açılımı Denklem 2.22'deki gibi yapılmaktadır. Burada  $\mu_t$  türbülanslı viskozitedir.

$$-\overline{\rho u_i'' u_j''} = 2\mu_t \widetilde{S_{ij}^*} - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \delta_{ij} \quad (2.22)$$

Denklem sayısı ve bilinmeyen sayısı birbiri ile örtüşmediğinden kapalılık problemi (closure problem) ortaya çıkar. Bu problemi çözmek için Reynolds gerilmesini ya da türbülanslı viskoziteyi hesaplayabilmek gereklidir. Bu ihtiyacı karşılamak adına türbülans modelleri geliştirilmiştir.

Türbülans modelleri türbülanslı viskoziteyi baz alan modeller ya da Reynolds gerilme tensörünü ( $u'_i u'_j$ ) elde etmek için cebirsel denklemleri veya diferansiyel denklemleri kullanan modeller olmak üzere ikiye ayrılır. Türbülanslı viskozite modellerine örnekler k- $\epsilon$ , k- $\omega$  ya da k- $\epsilon$  ve k- $\omega$ 'nın kombinasyonları olan modellerdir. Reynolds Gerilmesi Taşınım Modeli, Cebirsel Reynolds Gerilmesi Modeli ve Kapalı Cebirsel Reynolds Gerilmesi Modeli ise Reynolds gerilmesini baz alan türbülans modelleridir [66].

### 2.2.1.1 k- $\omega$ türbülans modeli

İki-denklemlilerden olan k- $\omega$  türbülans modeli bünyesinde türbülanslı kinetik enerji  $k$  ve türbülanslı yitim oranı (specific turbulent dissipation rate)  $\omega$  için birer denklem içerir. Kolmogorov  $\omega$  parametresine ait konsepti oluşturmuş ve adını birim türbülanslı kinetik enerjinin yitimi olarak belirlemiştir. Yitim oranının küçük ölçekli girdaplara aktarılan türbülanslı kinetik enerji oranına eşit olması sebebiyle yitim sürecinde büyük ölçekli girdaplar belirleyicidir.

Türbülanslı kinetik enerji,  $k$ , ve spesifik yitim oranı,  $\omega$ , Denklem 2.23 ve 2.24'te verilen taşınım denklemlerinden elde edilir [68]. Bu denklemlerde  $G_k$  ortalama hız gradyanlarının türbülanslı kinetik enerji üretimini,  $G_\omega$  ise  $\omega$ 'nın üretimini ifade etmektedir.  $\Gamma_k$  ve  $\Gamma_\omega$  sırasıyla  $k$  ve  $\omega$ 'ya ait etkin yayılım değerleridir.  $Y_k$  ve  $Y_\omega$  türbülanslı kaynaktan  $k$  ve  $\omega$ 'ya ait yitim ifadeleridir.  $Y_k$  ve  $Y_\omega$  kullanıcı tarafından belirlenebilen kaynak terimi değerleridir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (2.24)$$

k- $\omega$  türbülans modeline ait etkin yayılım değerleri Denklem 2.25 ve 2.26'da verildiği gibi hesaplanmaktadır. Bu denklemlerde  $\mu_t$  türbülanslı viskozite değeri iken  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\omega$  türbülanslı Prandtl sayılarını temsil etmektedir.

$$\Gamma_k = \mu \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (2.25)$$

$$\Gamma_\omega = \mu \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (2.26)$$

Türbülanslı viskozite değeri  $k$  ve  $\omega$  kullanılarak Denklem 2.27'deki gibi hesaplanmaktadır.

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

$k$  ve  $\omega$ 'nın üretimini ifade eden  $G_k$  ve  $G_\omega$  ifadeleri Denklem 2.28 ve 2.29'daki verildiği gibidir. Boussinesq hipotezi ile uyumlu olacak şekilde  $G_k = \mu_t S^2$  eşitliği geçerlidir.

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (2.28)$$

$$G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k \quad (2.29)$$

$\alpha$  katsayısının hesabı Denklem 2.30'daki gibidir. Burada  $Re_\omega=2.95$  iken  $\alpha^*$  ve  $Re_t$  Denklem 2.31 ve 2.32'deki gibi hesaplanmaktadır. Yüksek Reynolds sayılarında  $\alpha = \alpha_\infty = 1$ 'dir.  $Re_k = 6$ ,  $\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3}$  ve  $\beta_i = 0.072$  ifadeleri geçerlidir.

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left( \frac{\alpha_0 + Re_t/Re_\omega}{1 + Re_t/Re_\omega} \right) \quad (2.30)$$



$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left( \frac{\alpha_0^* + Re_t/Re_k}{1 + Re_t/Re_k} \right) \quad (2.31)$$

$$Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (2.32)$$

$k$ 'ya ait yitim ifadesi Denklem 2.33'te verilmiştir. Burada geçerli olan diğer ifadeler Denklem 2.34, 2.35, 2.36 ve 2.37'de verilmiştir. Ayrıca  $\zeta^* = 1.5$ ,  $R_\beta = 8$  ve  $\beta_\infty^* = 0.09$ 'dur.

$$Y_k = \rho \beta^* f_\beta k \omega \quad (2.33)$$

$$f_\beta = \begin{cases} 1 & x_k \leq 0 \\ \frac{1 + 680x_k^2}{1 + 400x_k^2} & x_k > 0 \end{cases} \quad (2.34)$$

$$x_k \equiv \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (2.35)$$

$$\beta^* = \beta_i^* [1 + \zeta^* F(M_t)] \quad (2.36)$$

$$\beta_i^* = \beta_\infty^* \left( \frac{4/15 + (Re_t/Re_\beta)^2}{1 + (Re_t/Re_\beta)^2} \right) \quad (2.37)$$

$\omega$ 'ya ait yitim ifadesi Denklem 2.38'de verilmiştir. Burada geçerli olan diğer ifadeler Denklem 2.39, 2.40, 2.41 ve 2.42'de verilmiştir.

$$Y_\omega = \rho \beta f_\beta \omega^2 \quad (2.38)$$

$$f_\beta = \frac{1 + 70x_\omega}{1 + 80x_\omega} \quad (2.39)$$

$$x_\omega = \left| \frac{\Omega_{ij}\Omega_{jk}S_{ki}}{(\beta_\infty^*\omega)^3} \right| \quad (2.40)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.41)$$

$$\beta = \beta_i \left[ 1 - \frac{\beta_i^*}{\beta_i} \zeta^* F(M_t) \right] \quad (2.42)$$

Bu çalışmada standart k- $\omega$  türbülans modeli sıkıştırılabilir akış etkileri ve kayma akışı düzeltmeleri fonksiyonları aktifleştirilerek kullanılmıştır. Sıkıştırılabilirlik fonksiyonu  $F(M_t)$  Denklem 2.43'te verildiği gibidir. Burada  $M_t^2 \equiv \frac{2k}{a^2}$ ,  $M_{t0} = 0.25$  ve  $a = \sqrt{\gamma RT}$  ifadeleri geçerlidir. Yüksek Reynolds sayılarında  $\beta_i^* = \beta_\infty^*$  ifadesi geçerlidir. Kayma akışı düzeltmeleri seçimi ile Denklem 2.34 ve 2.39 denklemleri hesaba katılmaktadır.

$$F(M_t) \begin{cases} 0 & M_t \leq M_{t0} \\ M_t^2 - M_{t0}^2 & M_t > M_{t0} \end{cases} \quad (2.43)$$

### 2.3 Sayısal Yöntemler

Süpersonik kavite akışının sayısal olarak çözümünde ANSYS FLUENT [68] çözücüsünün yoğunluk tabanlı algoritması kullanılmıştır. Yoğunluk tabanlı algoritmanın kullanılma nedeni sıkıştırılabilir akış ve süpersonik hız koşullarına uygun bir çözücü olmasıdır. Çözümde kullanılan yöntemler çizelge 2.1'de gösterilmiştir. Zamanda ve mekanda ikinci derece ayrıklaştırma uygulanmıştır.

Çizelge 2.1 : Çözüm Yöntemleri

Formülasyon	Kapalı yöntem	
Akış şeması	Roe-FDS	
Mekan ayrıklaştırması	Gradyan	Düğüm noktası bazlı Green-Gauss
	Akış	İkinci derece Upwind
	Türbülanslı kinetik enerji	İkinci derece Upwind
	Spesifik yitim oranı	İkinci derece Upwind
Zamana bağlı formülasyon	İkinci derece kapalı yöntem	

### 2.3.1 Yoğunluk tabanlı algoritma

Yoğunluk tabanlı çözücü kütle, momentum ve enerji korunum denklemlerini ve türlerin taşınımını eş zamanlı olarak çözen bir algoritmadır. Türbülans, radyasyon vb. ek skaler terimler için geçerli denklemler korunum denklemlerinin ardından çözülür. Fazlar arası eşleşmenin dahil edildiği durumlarda kaynak terimleri uygun sürekli faz denklemleri ile hesaplanır. Bu işlemler belirlenen yakınsama kriteri sağlanana kadar iç iterasyonlar çözülmektedir. Yakınsama kriteri sağlandığında bir sonraki zaman adımına geçilir [68].

Yoğunluk tabanlı algoritma çözüme ulaşmada açık ve kapalı metod olmak üzere iki yaklaşım kullanılmaktadır. Açık metotta bir defada bir hücredeki tüm değişkenler çözülürken, kapalı metotta ise tüm hücrelerde tüm değişkenler aynı anda çözülmektedir [68].

Bu çalışmada korunum denklemlerinin lineerleştirilmesi kapalı metod kullanılarak yapılmıştır. Denklemlerin ayrıklaştırılmasının detayları için FLUENT teori kılavuzuna başvurulabilir [68].

Çözücüde viskozite hesabı için üç katsayılı Sutherland yasası kullanılmıştır ve Denklem 2.44'te gösterilmiştir. Denklemde  $\mu$  dinamik viskoziteyi,  $\mu_0$  referans viskozite değerini,  $T$  Kelvin cinsinden sıcaklığı,  $T_0$  Kelvin cinsinden referans sıcaklığı ve  $S$  Sutherland sabitini temsil etmektedir. Denklemde  $\mu_0 = 1.716 \times 10^{-5} \text{ kg/(ms)}$ ,  $T_0 = 273.11 \text{ K}$  ve  $S = 110.56 \text{ K}$  eşitlikleri geçerlidir.

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + S}{T + S} \quad (2.44)$$

### 2.3.2 Roe-FDS

Bu çalışmada akış şeması olarak seçilen Roe-FDS çözücünde varsayılan ve çoğu durumda önerilen bir akış şemasıdır. Roe-FDS (Roe flux-difference splitting) belirli bir alandaki akıyı hesaplamak için incelen sistemin öz değerlerini kullananmaktadır. İkinci derece merkezi ayrıklaştırmaya ek olarak matris yitim terimi içermektedir. Matris yitim terimi süpersonik akışta taşınım terimlerinin, basınç ve akının yükseltilmesini (upwinding) sağlamaktadır [69].

Akı vektörü  $F$ 'i ayrıklaştırılması Denklem 2.45'teki gibi yapılır. Burada  $\delta Q$  mekansal farkı ( $Q_R - Q_L$ ) temsil etmektedir. Belirlenen alanın sağındaki ve solundaki çözüm matrisleri ( $Q_R$  ve  $Q_L$ ) kullanılarak sağ ve soldaki akı değerleri ( $F_R$  ve  $F_L$ ) hesaplanmaktadır.

$$F = \frac{1}{2}(F_R + F_L) - \frac{1}{2}\Gamma|\hat{A}|\delta Q \quad (2.45)$$

$|\hat{A}|$  matrisi Denklem 2.46'daki gibi tanımlanmaktadır.  $\Lambda$  diagonal özdeğer matrisi iken  $M$  kipsel matristir.

$$|\hat{A}| = M|\Lambda|M^{-1} \quad (2.46)$$

### 2.3.3 Green-Gauss Node Based hesabı

Bir skalerin hücre merkezindeki gradyanının hesabında kullanılan Green Gauss teoremi Denklem 2.47'de gösterilmiştir.  $\phi$  gradyanı alınan skaleri,  $c_0$  hücre merkezini,  $\phi_f$   $\phi$ 'nın hücre yüzey merkezindeki değerini ifade etmektedir.

$$(\nabla\phi)_{c0} = \frac{1}{v} \sum_f \bar{\phi}_f \vec{A}_f \quad (2.47)$$

Bu çalışmada kullanılan düğüm noktası bazlı Green Gauss bir düğüm noktasında lineer bir fonksiyonun değerlerini ikinci dereceden mekansal bir doğruluğu koruyarak hesaplamaktadır. Bu şemada  $\bar{\phi}_f$  Denklem 2.48'deki gibi açılmaktadır. Burada  $N_f$  yüzeydeki düğüm noktası sayısını temsil etmektedir.

$$\bar{\phi}_f = \frac{1}{N_f} \sum_n^{N_f} \bar{\phi}_n \quad (2.48)$$

### 2.3.4 İkinci derece Upwind yöntemi

Mekansal bir ayrıklaştırma metodu olan ikinci derece Upwind yöntemi ile hücre yüzeylerindeki skalerler çok boyutlu bir doğrusal yeniden yapılandırmaya uğratarak ikinci dereceden doğruluk elde edilmektedir. Bu yaklaşımda hücre merkezli bir çözümün Taylor serisi açılımı yapılarak yüksek doğruluk elde edilmektedir [70].

İkinci dereceden Upwind yöntemi ile ayrıklaştırma Denklem 2.49'daki gibi yapılmaktadır. Denklemde  $\phi$  ve  $\nabla\phi$  hücre merkezli bir skaler ve onun gradyanını ifade etmektedir.  $\vec{r}$  yer değiştirme vektörüdür.

$$\phi_f = \phi + \nabla\phi \cdot \vec{r} \quad (2.49)$$

### 2.4 Dikgen Ayrıştırma Yöntemi

Düşük mertebeli modelleme akışkanlar mekaniği uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir yaklaşımdır. Karmaşık sistemler daha düşük mertebeli sistemlere indirgenerek çözüme daha hızlı ulaşılmakta, veri topluluğuna karşılık gelen hafıza yükü hafiflemektedir [47]. Dikgen Ayrıştırma Yöntemi veri setlerinin analizlerinde ve veri setlerinin içindeki baskın özelliklerin tespitinde kullanılan güçlü bir düşük mertebeli modelleme yöntemidir [49].

### 2.4.1 Dikgen Ayrıştırma Yöntemi teorisi

Proje kapsamında kavite içindeki yapıları daha iyi anlamak, akış karakteristiklerini daha detaylı incelemek adına kavite içindeki akış alanına ait x-yönündeki hız verilerine DAY uygulanmıştır. Kavite içindeki eşit aralıklı  $\vec{x} = (x, y)$  noktalarına ait x-yönündeki hız verileri  $M$  sayıdaki gözlem anı için  $U_i(\vec{x})$  matrisinde toplanmıştır.  $M$  sayıdaki gözlem anı  $M$  sayıdaki zaman adımını temsil etmektedir. Akış alanının  $M$  sayıdaki anlık görüntüsü  $U_i(\vec{x})$  matrisinde toplanmıştır ve Denklem 2.50'de gösterilmiştir. Bir diğer anlamda, akış alanında gözlemlenen fiziksel davranışın sayısal ifadesi  $U_i(\vec{x})$  matrisinde taşınmaktadır.

$$U_i(\vec{x}) = U_1(x, y), U_2(x, y), \dots, U_M(x, y) \quad (2.50)$$

Veri topluluğu  $U_i(\vec{x})$  matrisinde toplandıktan sonra, bu veri topluluğunun ortalaması alınarak orijinal veri topluluğundan çıkarılmıştır. Bu işlem yapılarak ölçekleme yapma ihtiyacının önüne geçmek amaçlanmıştır [47],[71]. Bu işlem Denklem 2.51'de gösterilmiştir. Elde edilen  $K_i(\vec{x})$  matrisi incelenecek esas veri topluluğunu içermektedir.

$$K_i(\vec{x}) = U_i(\vec{x}) - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_i(\vec{x}) \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2.51)$$

DAY ile serbestlik derecesi düşürülen veri topluluğunun en iyi şekilde temsil edilebilmesi istenmektedir. Veri topluluğunu en iyi şekilde ifade edebilmek adına temel fonksiyonlar elde etmek hedeflenmektedir. Temel fonksiyonlar kipleri ve bağlı kip genliklerini içerir ve Denklem 2.52'deki gibi tanımlanır.  $\emptyset(\vec{x})$  temel fonksiyonları ifade ederken,  $\alpha_{ik}$  kip genliklerini,  $K_i(\vec{x})$  ise  $M$  tane anlık görüntü sayısından alınan verilerden ortalama değer çıkarıldığı veri topluluğunu temsil etmektedir [47], [71], [72].

$$\emptyset(\vec{x}) = \sum_{i=1}^M \alpha_{ik} K_i(\vec{x}) \quad k = 1, 2, \dots, S(\text{kip sayısı}) \quad (2.52)$$

Temel fonksiyonların veri topluluğunu düzgün bir şekilde temsil edebilmesi için uygun kip genliği değerlerinin bulunması gerekmektedir. Temel fonksiyona ait değerlerin mümkün olan en yüksek mertebeye çıkartılması gerekmektedir [73]. Bu

amaçla  $L^2$  iç çarpım ve norm alma işlemleri kısıt olarak kullanılmıştır. Kısıtlar Denklem 2.53 ve Denklem 2.54'te gösterilmiştir [72]. İç çarpım işlemi  $(\cdot, \cdot)$  ile gösterilirken,  $\|\cdot\|$  ifadesi normu temsil etmektedir. İncelenen veri topluluğunun etkinlik alanı ise  $\Omega$  sembolü ile gösterilmiştir.

$$F = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |K_i, \emptyset| \quad (2.53)$$

$$\|\emptyset\|^2 = (\emptyset, \emptyset) = \int_{\Omega} |\emptyset|^2 dA = 1 \quad (2.54)$$

Euler-Lagrange integral eşitliğinin çözümü ile temel fonksiyonlar elde edilebilmektedir [47], [72], [74], [75]. Euler-Lagrange integral eşitliği Denklem 2.55'te gösterilmiştir. Öz değerler  $\lambda$  sembolü ile, öz fonksiyonlar  $\emptyset(\vec{x})$  ifadesi ile gösterilmektedir.  $C(\vec{x}, \vec{x}')$  korelasyon tensörüdür. Rastgele iki farklı noktadaki değişkenlerin birbirleri ile olan bağıntıları, korelasyon tensörü ile noktalar arası uzaklığın mekansal ya da zamansal ifadesi şeklinde tutulmaktadır [75].

$$\int C(\vec{x}, \vec{x}') \emptyset(\vec{x}') d\vec{x}' = \lambda \emptyset(\vec{x}) \quad (2.55)$$

Euler-Lagrange integral eşitliğinin çözümünde hesaplamalarda önemli ölçüde sadeleştirmelere imkan verdiği için Sirovich [76] tarafından önerilen Anlık Görüntü Sayıları Metodu tercih edilmiştir. Bu method yardımı ile birkaç anlık görüntü analiz edilerek akış karakteristiklerini ifade eden temel fonksiyonlar (kipler, modlar) elde edilebilmektedir. Temel fonksiyonlar bir anlamda anlık görüntülerin doğrusal kombinasyonlarını ifade etmektedir. Temel fonksiyon ifadesi  $(\emptyset(\vec{x}))$  Euler-Lagrange integral eşitliğinde yerine koyulduğunda  $M \times M$  boyutlarındaki  $C$  kovaryans matrisinin cebirsel öz değer problemi Denklem 2.56 ve Denklem 2.57'de olduğu gibi elde edilmektedir [74], [76].

$$C \alpha_n = \lambda_n \alpha_n \quad n = 1, 2, \dots, M \quad (2.56)$$

$$(C)_{ij} = \frac{1}{M} \int_{\Omega} K_i(\vec{x}) K_j(\vec{x}) dx \quad i, j = 1, 2, \dots, M \quad (2.57)$$

Negatif olmayan kovaryans matrisi simetriktir. Kovaryans matris verilerine Tekil Değer Ayırıştırma yöntemi Denklem 2.58'deki gibi uygulanarak öz değerler ve öz fonksiyonlar elde edilebilmektedir [49]. R, öz fonksiyonları (kip) içeren dikgen bir matristir. Tekil Değer Ayırıştırma Metodu uygulandıktan sonra dikgen P matrisi elde edilir, fakat bu matrisin sonuca bir etkisi bulunmamaktadır.  $\Sigma$  matrisi ise köşegenlerinde öz değerleri taşıyan negatif olmayan bir matristir. Öz değerler büyüken küçüğe doğru sıralanırsa,  $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_M \geq 0$  ifadesi elde edilir.

$$C = R\Sigma P^T \quad (2.58)$$

Özdeğerler (kipler), temel fonksiyonların temsil ettiği veri topluluğuna ait baskın özelliklerin bir ölçüsüdür. Bu çalışmada veri topluluğu olarak ortalama değerden sapan veriler alınmıştır. Özdeğerlerin enerji içeriği, o öz değerın akış alanındaki baskın karakteristikleri yansıtabilme becerisini ifade etmektedir. Sistemi ifade etmede kullanılan kiplerin toplam enerji içeriği ne kadar fazla ise o sistemin ifade edilebilme oranı da o kadar yükselmektedir [50].

Sistemi ifade etmede kullanılan kiplerin toplam enerji içeriği yeterli bulunduktan sonra, kullanılan kipler ve bağıl kip genlikleri yeniden yapılandırılarak esas veri topluluğunun düşük mertebeli bir ifadesi olan alt bir uzay oluşturulabilmektedir [56]. Denklem 2.59'daki  $U$  esas veri topluluğunu,  $\bar{U}$  esas veri topluluğunun ortalama değerini,  $\phi_k$  elde edilen kipleri,  $\alpha_k$  bağıl kip genliklerini,  $S$  ise yeterli enerji düzeyini sağlayan kip sayısını temsil etmektedir.

$$U = \bar{U} + \sum_{k=1}^S \alpha_k \phi_k \quad (2.59)$$

Bu proje kapsamında serbest akış hızı 1.5 Mach olan ve L/D değeri 5.07'ye karşılık gelen iki boyutlu süpersonik kavite akışı incelenmiştir. Kavitenin içinden alınan x-yönündeki hız verilerine DAY uygulamak adına oluşturulan Matlab kodu EK-1'de verilmiştir.

#### 2.4.2. Dikgen Ayırıştırma Yöntemi uygulaması

Bu tez çalışmasında 1.5 Mach sayısına sahip ve L/D değeri 5.07 olan süpersonik kavite akışına DAY uygulanmıştır. Bu amaçla kavite içindeki akış periyodik hale geldikten



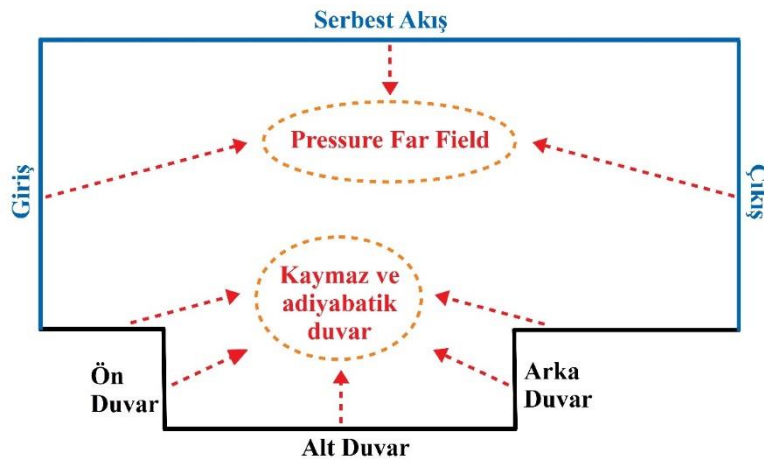
sonra bir dizi anlık görüntü sayısı için kavite içinde eşit aralıklı noktalardan x-yönündeki hız verisi alınıp, bu hız verilerine DAY uygulanmıştır.

İki boyutlu kavite akışı düzene oturduktan sonra, 8. İle 14. Rossiter periyoduna denk gelen aralık incelenmek için seçilmiştir. 6 periyoda denk gelen bu aralıkta 6000 anlık görüntü kullanılmıştır. Boyutları 0.12065 m x 0.02381 m olan kavite içindeki akış alanı eşit aralıklı parçalara bölünmüştür. 255x51 'lik bir matris oluşturulmuş ve oluşturulan 13,005 noktadaki x-yönü hız bileşenine DAY uygulanmıştır.

## 2.5 Sınır Koşulları

Verilen bir sistemin tek ve doğru bir çözümünü elde etmek için sisteme uygun sınır koşulları tanımlamak gereklidir. İç akıslarda fiziksel akış alanı belirli olduğu için sayısal çözüm alanı belirlemek oldukça kolaydır. Dış akıslarda ise sayısal akış alanını belirlemek iç akıslarda olduğu kadar kolay değildir. Dış akıslarda doğruluk ve verimlilik hesaba katılarak optimum bir dış sınır kabulü yapılmalıdır. İdeal olarak dış sınırların geometriden mümkün olduğu kadar uzakta tutulması iyi olsa da sayısal alandaki hücre sayısının ve çözüm süresinin sınırlayıcılığı sebebiyle optimum bir uzaklık değeri belirlenmelidir. Serbest akışın görüldüğü dış sınırlar belirlenip uygun bir sayısal akış alanı oluşturulduktan sonra akış alanının sınırlarına uygun sınır koşulları tanımlanmalıdır. Akış bu sınır koşullarından geçebilmeli ve dalga yansıması gibi durumların önüne geçilmelidir [77].

Bu tez çalışmasında süpersonik kavite akışının iki boyutlu modellemesinde kullanılan sınır koşulları Şekil 2.1 'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 1 : Sınır koşulları

Girişte, serbest akışta ve çıkışta Pressure Far Field sınır koşulu verilip, bu sınırların yeterince uzakta olması ve geometrik değerlerinin çözümü etkilememesi sağlanmıştır. Aradağ'ın [1] düz levha üzerinde yaptığı çalışma sonucu elde ettiği tam gelişmiş akış sonuç verileri giriş sınır profili olarak verilmiştir. Uçağın gövdesini temsil eden duvarlarda kaymazlık ve adiyabatiklik sınır koşulları tanımlanmıştır. Üç boyutlu simülasyonlarda üçüncü boyuta simetri sınır koşulu tanımlanmıştır. Sınır koşullarına karşılık gelen özelliklere Çizelge 2.1'de yer verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Sınır koşullarına karşılık gelen değerler

	Sınır Koşulu	Değerler
Giriş	Pressure Far Field	-
Çıkış	Pressure Far Field	P = 17893 Pa Mach sayısı = 1.5 Türbülans yoğunluğu = % 7 Türbülanslı uzunluk ölçeği = 0.00203 m
Serbest Akış	Pressure Far Field	P = 17893 Pa Mach sayısı = 1.5 Türbülans yoğunluğu = % 7 Türbülanslı uzunluk ölçeği = 0.00203 m
Duvar	Kaymaz ve adiyabatik duvar	T = 304.8 K
Ön Duvar	Kaymaz ve adiyabatik duvar	T = 304.8 K
Alt Duvar	Kaymaz ve adiyabatik duvar	T = 304.8 K
Arka Duvar	Kaymaz ve adiyabatik duvar	T = 304.8 K

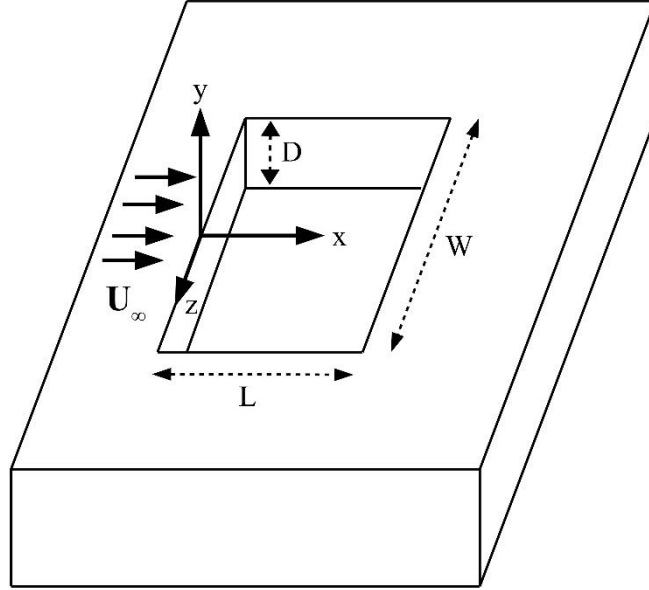
## 2.6 Akış Koşulları

Kaufman ve Clark'ın [15] farklı serbest akış hızlarına ve farklı geometrik özelliklere sahip kavite üzerine yaptığı deneylerden 1.5 Mach sayısına sahip, L/D değeri 5.07 ve L/W değeri 1.90 olan çalışma bu tezde referans alınmıştır. Deney koşulları ve kavite geometrisine ait bilgiler Çizelge 2.2'de belirtilmiştir.

Çizelge 2.3 : Deney koşulları ve geometri

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

Üç boyutlu geometri Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Burada kavite uzunluğu  $L$ , kavite derinliği  $D$  ve kavite genişliği  $W$  ile gösterilmektedir. Simülasyonların yapıldığı akış alanı  $-0.2525 \leq x/L \leq 1.5$ ,  $-1 \leq y/D \leq 3.698$ ,  $0 \leq z/(W/2) \leq 2$  şeklindedir. Akış alanı ve geometri  $z=0$  düzlemi düzlemine göre simetrik olduğu için üç boyutlu simülasyonlarda akış alanının sadece bir yarısı modellenmiştir. İki boyutlu simülasyonlarda ise orta kesit olan  $z=0$  düzlemi seçilerek bu düzlem üzerindeki zamana bağlı kavite akışı simüle edilmiştir.

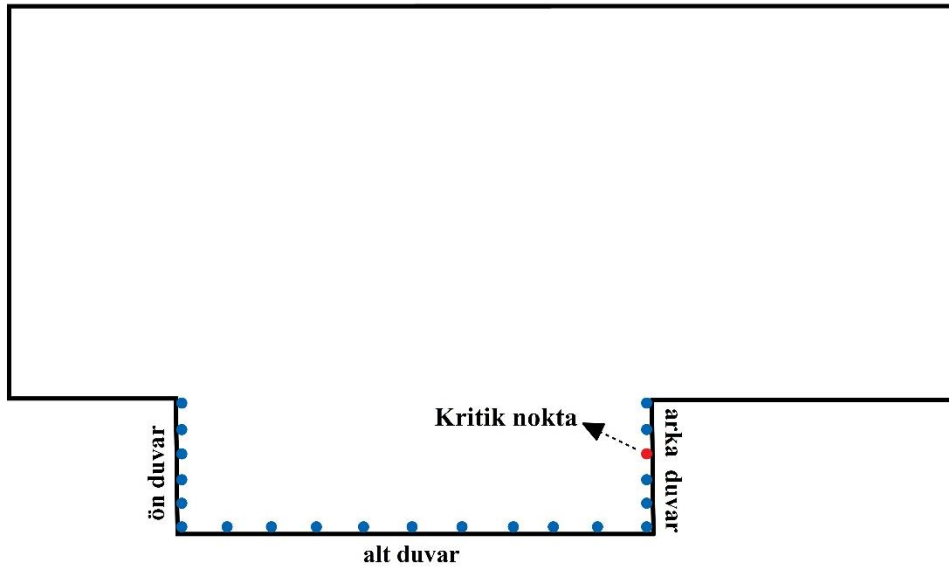


Şekil 2.2 : 3 boyutlu geometri

## 2.7 Ard İşleme Yöntemleri

HAD sonuçlarını değerlendirmek için ard işleme yöntemleri uygulanmıştır. Bu amaçla ANSYS FLUENT [68], ANSYS CFD-Post [78] ve MATLAB [79] programları kullanılmıştır.

Sonuçları değerlendirmek için kavitenin ön, arka ve alt duvarları boyunca duvarların önündeki ilk hücrenin içine denk gelecek şekilde noktalar belirlenmiş ve simülasyonlar boyunca bu noktaların zamana bağlı değişen basınç değerleri elde edilmiştir. Bu noktalar kontrol noktaları olarak adlandırılmış ve sembolik gösterimi Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Alt duvar doğrultusu  $y/D=0$  olarak kabul edilecek olursa arka duvarda  $y/D=0.6$  noktası en yüksek basınç değerlerinin görüldüğü yer olduğu için referans çalışmada kritik nokta olarak belirtilmiştir [15]. Bu nedenle tez çalışması boyunca bu noktadan kritik nokta olarak bahsedilmiş ve bu noktadan elde edilen zamana bağlı basınç değerleri incelenmiştir. Ek olarak bu noktadan elde edilen basınç verilerine Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanarak baskın modlar ve bunlara karşılık gelen frekans değerleri elde edilmiştir. Elde edilen frekans değerleri geliştirilmiş Rossiter formülasyonu sonuçları ile kıyaslanmıştır.



Şekil 2.3 : Kontrol noktaları

Her bir duvardaki kontrol noktalarından elde edilen basınç verileri ses basınç seviyelerine dönüştürülerek ön, alt ve arka duvarlar boyunca gözlemlenen ses basınç

seviyeleri incelenmiştir. Alt duvarda gözlemlenen ses basınç seviyeleri deneysel sonuçlar ile kıyaslanarak çalışma doğrulanmıştır. Deney sonuçlarında diğer duvarlar için benzer bir bilgi bulunmamaktadır.

1 Rossiter periyoduna denk gelen süre boyunca akış alanına ait basınç, Mach sayısı, sıcaklık, yoğunluk dağılımları ve akım çizgilerinin değişimi ANSYS CFD-Post programı yardımı ile çizilmiş ve detaylı olarak incelenmiştir.

### 2.7.1 Hızlı Fourier dönüşümü (FFT)

Kendini düzenli bir şekilde tekrarlamayan karmaşık dalga formlarının frekans içeriğinin araştırılmasında Fourier dönüşümü kullanılır. Hızlı Fourier dönüşümü (FFT) büyük veri topluluklarının içindeki baskın frekansların hesabının hızlı ve verimli bir şekilde yapılmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada kontrol noktalarından zamana bağlı olarak elde edilen basınç verilerinin frekans analizi FFT uygulanarak yapılmıştır. FFT uygulanarak zaman alanındaki veriler frekans alanına dönüştürülmüş ve akışın içinde barındırdığı periyodik davranış araştırılmıştır.

Bir veri topluluğunu  $F_k$  ile gösterecek olursak bu veri topluluğunun ayrık Fourier dönüşümü (DFT) Denklem 2.60'daki gibidir. Burada  $\omega_0 = 2\pi/N$  iken  $N$  toplam veri sayısını temsil eder.  $f_n$   $n$ . terime karşılık gelen katsayıdır ve Denklem 2.61'deki şekilde hesaplanmaktadır. Denklem 2.60 ve 2.61 kullanılarak zaman ve frekans alanlarında dönüşüm ve ters dönüşüm işlemleri gerçekleştirilebilir.

$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-ik\omega_0 n} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.60)$$

$$f_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F_k e^{-ik\omega_0 n} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.61)$$

Ayrık Fourier dönüşümünde her bir  $F_k$  için  $N^2$  adet çarpma ve  $N(N-1)$  adet toplama işlemi gereklidir. Büyük veri topluluklarının analizi yapılırken DFT hesabı oldukça büyük bir hafıza ve zaman yükü teşkil eder. Ayrık Fourier dönüşümü hesabı için gerekli işlem miktarının azaltılması ve çözüme hızlı bir şekilde ulaşabilmek için çeşitli

algoritmalar geliştirilmiş ve Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) olarak adlandırılmıştır. FFT, DFT'ye göre daha etkili ve ekonomik bir işlemdir.

### 2.7.2 Ses Basınç Seviyesi (SPL) hesabı

Ses basıncını logaritmik ölçekte ses basınç seviyesi olarak ifade edilir. Duyulabilir ses bandı oldukça geniş olduğu için ses basıncını logaritmik ölçekte kullanmak oldukça elverişlidir. Ses basınç seviyesi Denklem 2.62'deki gibi hesaplanır. Denklemde  $P$  ölçülen basınç değeri iken  $P_{ref}$  referans basınç değeridir. Ses basınç seviyesinin birimi desibeldir (dB) [80].

$$SPL = 20 \log(P/P_{ref}) \quad (2.62)$$

Bu çalışmada kontrol noktalarından elde edilen statik basınç verileri ses basınç seviyesine çevrilirken Denklem 2.62'deki eşitlik kullanılmıştır. Hava için referans ses basıncı  $2 \times 10^{-5}$  Pa alınmıştır.

### 2.8 Hesaplama Kaynakları

Çalışmada kullanılan bilgisayarın özellikleri aşağıdaki gibidir:

- İşlemci: Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2640 v3 @ 2.60GHz
- Yüklü bellek (RAM): 64.0 GB
- Sistem tipi: 64-Bit işletim sistemi

Simülasyonlar ANSYS FLUENT [68] çözücüsünde 16 paralel işlemci kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu simülasyonlar simülasyonların tamamlanma süresi 12 ile 24 saat arasında değişmiştir. Üç boyutlu simülasyon ise 96 çekirdekli öbek bilgisayar kullanılarak 2 ayda tamamlanmıştır.

### 3. İKİ VE ÜÇ BOYUTLU KONTROLSÜZ KAVİTE AKIŞI SİMÜLASYONLARI

Süpersonik kavite akışının anlaşılması amacıyla 1.5 Mach sayısına sahip ve uzunluğun derinliğe oranı (L/D) 5.07 olan açık kavite akışının kontrolsüz iki ve üç boyutlu HAD simülasyonları yapılmıştır. Simülasyonlarda ANSYS programının FLUENT [68] çözücüsü kullanılmıştır. İki ve üç boyutlu zamana bağlı değişen sıkıştırılabilir Navier-Stokes denklemleri yoğunluk tabanlı algoritma ile çözülmüştür. Türbülansın modellenmesinde “standart k- $\omega$  türbülans modeli” kullanılmıştır. Kullanılan sayısal yöntemler, akış koşulları, sınır koşulları ve ard işleme yöntemleri Bölüm 2’de detaylı olarak anlatılmıştır. Her bir zaman adımının içerisinde yakınsama kriteri sağlanana kadar iç iterasyonlar yapılmıştır. Ayrıca yakınsama durumu için akış alanı içerisinde belirlenen noktalardaki basınç verileri anlık olarak incelenerek de kontrol edilmiştir.

Kaufman ve Clark’ın [15] dikdögen kavite içinindeki akışı incelediği deneyler dizisi içinden 1.5 Mach sayısına sahip, L/D değeri 5.07 ve L/W değeri 1.90 olan çalışma bu tez çalışması için referans alınmıştır. Deney koşulları ve kavitenin geometrik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Kavite uzunluğu “L”, kavite derinliği “D” ve kavite genişliği “W” ile gösterilmektedir. İki ve üç boyutlu simülasyonlar deneysel koşullara uygun bir biçimde gerçekleştirilmiştir. Akış alanı  $-0.2525 \leq x/L \leq 1.5$ ,  $-1 \leq y/D \leq 3.698$ ,  $0 \leq z/(W/2) \leq 2$  şeklinde oluşturulmuştur.

Çizelge 3. 1 : Deney Koşulları ve Kavite Geometrisi

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

Sayısal çalışmalarda doğru sonuçlar elde edebilmek için probleme uygun ağ yapısının ve zaman adımının belirlenmesi yüksek önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasındaki kavite problemi için sayısal parametreler daha önce Aylı [25] tarafından detaylı olarak çalışılmış, uygun ağ yapısı ve zaman adımı belirlenmiştir. Bu sebeple bu tezde ağ yapısı ve zaman adımı üzerine detaylı bir çalışma yürütülmemiştir. Kontrolsüz simülasyonlar Aylı'nın [25] çalışması doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.

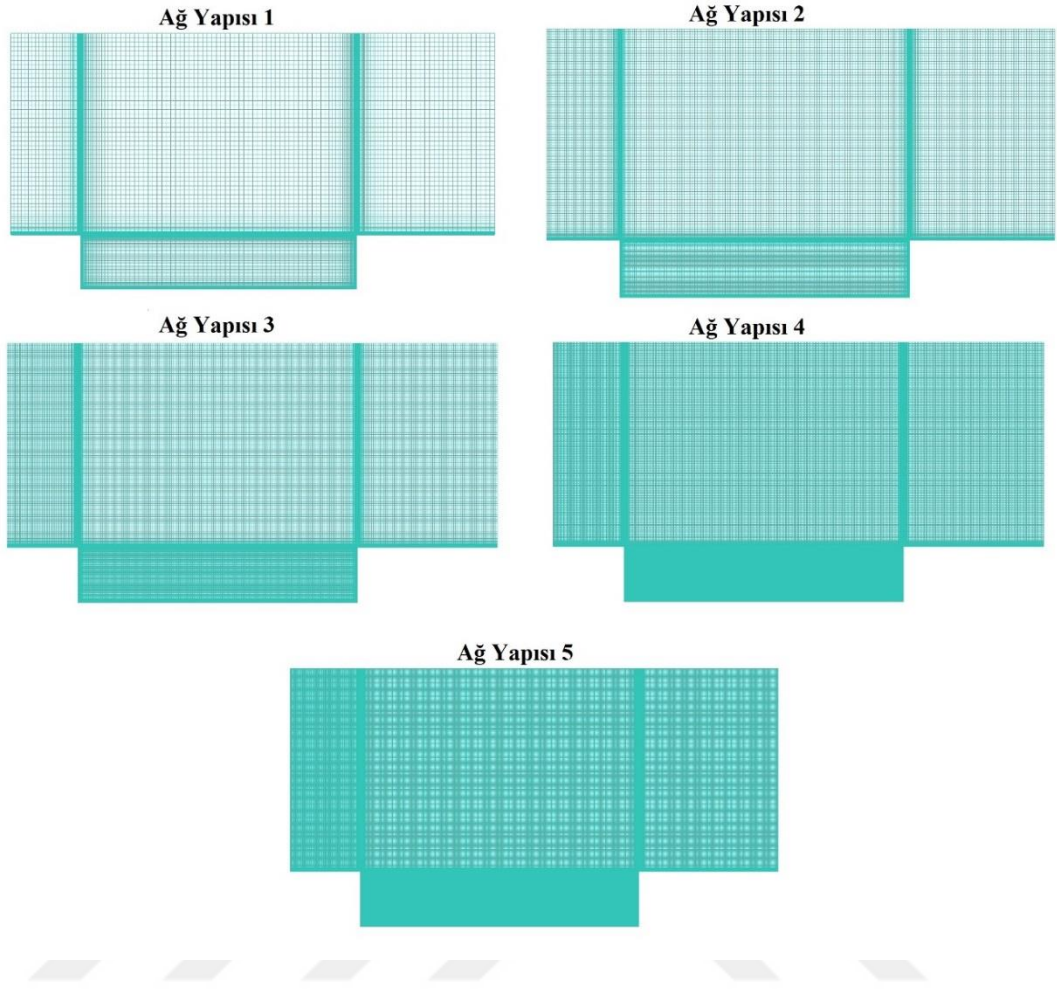
### 3.1 İki Boyutlu Simülasyonlar

İki boyutlu simülasyonlar kavitenin uzunluk yönündeki orta düzlemindeki akışı temsil edecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Öncelikle ağ yapısı çalışması yapılmıştır. Oluşturulan ağ yapılarında duvar kenarlarındaki ve kayma tabakasındaki hücre boyutları küçültülmüş ve sıklaştırılmıştır. Akış fiziğinin sayısal olarak doğru çözülebilmesi için viskoz alt tabakanın içinde kalacak şekilde  $y^+$  değerleri her grid için 5'in altında tutulmuştur. Bu sayede küçük ölçekli özelliklerin yakalanılabileceği düşünülmüştür. Her bir ağ yapısında hücre büyüme oranı sabit tutulup 1.13 alınmıştır. Ek olarak bir elemanın x yönündeki uzunluğunun y yönündeki uzunluğuna oranı olan boyut oranları tüm ağ yapılarında birbirleri ile yakın tutulmuştur. Öncelikle az eleman sayılı bir ağ yapısı oluşturulmuş, sonraki her bir ağ yapısında ilk hücre yüksekliği düşürülüp eleman sayısı artırılmıştır. Oluşturulan ağ yapılarının özellikleri Çizelge 3.2'de, gösterimi Şekil 3.1'de yapılmıştır.

Çizelge 3. 2 : İki Boyutlu Ağ Yapısı Özellikleri

	Eleman Sayısı	İlk Hücre Yüksekliği	Hücre Büyüme Oranı	Boyut Oranı	Eriksson Çarpıklığı	Kalite
Ağ yapısı 1	16,919	$1 \times 10^{-4}$	1.13	20.3	1	1
Ağ yapısı 2	37,780	$7.5 \times 10^{-5}$	1.13	15.1	1	1
Ağ yapısı 3	67,077	$5 \times 10^{-5}$	1.13	16.1	1	1
Ağ yapısı 4	150,475	$2.5 \times 10^{-5}$	1.13	20.7	1	1
Ağ yapısı 5	267,113	$4.8 \times 10^{-6}$	1.13	82.5	1	1

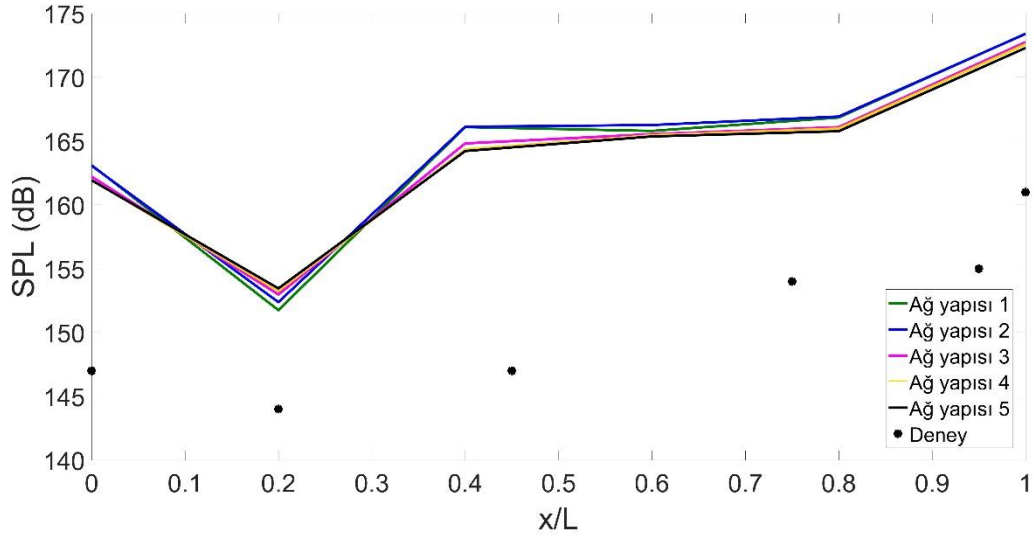




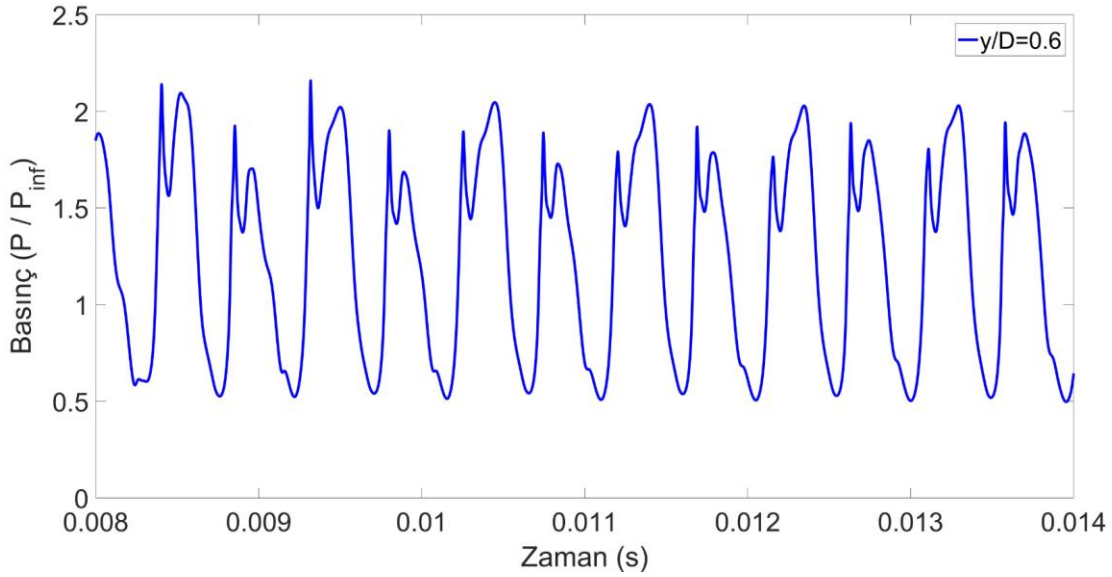
Şekil 3. 1: İki boyutlu ağ yapıları

İki boyutlu ağ yapılarından elde edilen alt duvar ses basınç seviyesi karşılaştırmaları Şekil 3.2’de yapılmıştır. Bütün ağ yapılarında oldukça yakın değerler elde edilse de özellikle Ağ yapısı 3’ten sonra değerler neredeyse aynı çıkmıştır. En az sayıda elemanla en iyi sonucun alındığı ağ yapısı 3’e ait parametrelerle çalışmaya devam edilmiştir. Tez çalışmasının geri kalanında ağ yapısı 3 kullanılarak yapılan simülasyonlar iki boyutlu simülasyon ya da kontrolsüz simülasyon olarak adlandırılmıştır.

İki boyutlu simülasyonda arka duvardaki kritik noktadan elde edilen basınç verileri Şekil 3.3’te, bu verilere FFT uygulanarak elde edilen güç-frekans grafiği Şekil 3.4’te gösterilmiştir. Kritik nokta basınç salınımlarının oldukça periyodik olduğu anlaşılmıştır. İlk mod 1000 Hz, ikinci mod 2167 Hz çıkarken, ikinci modun gücü ilk moddan yüksektir.

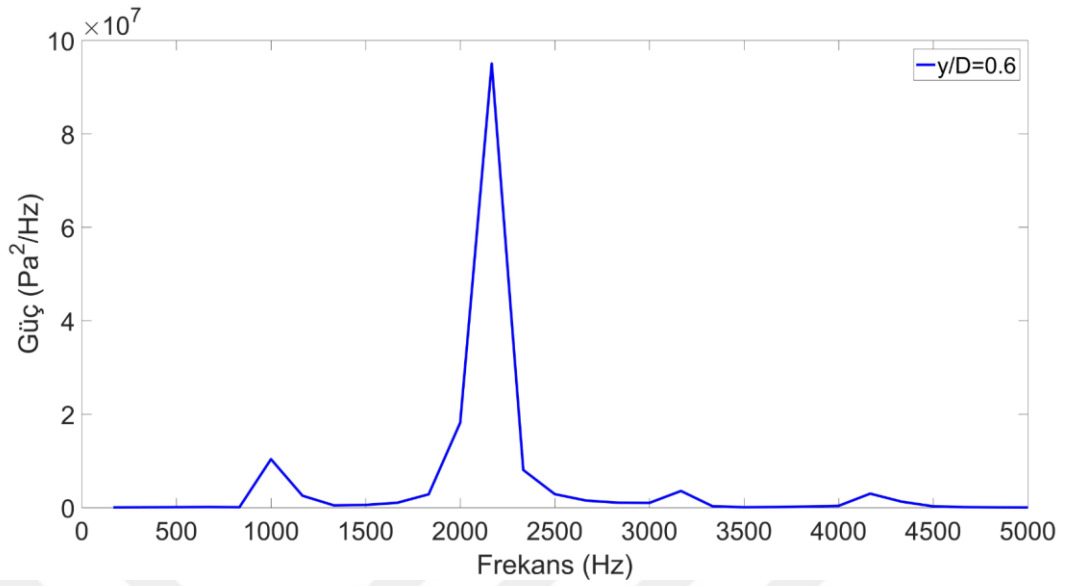


Şekil 3. 2 İki boyutlu ağ yapıları için alt duvar SPL-konum grafiği



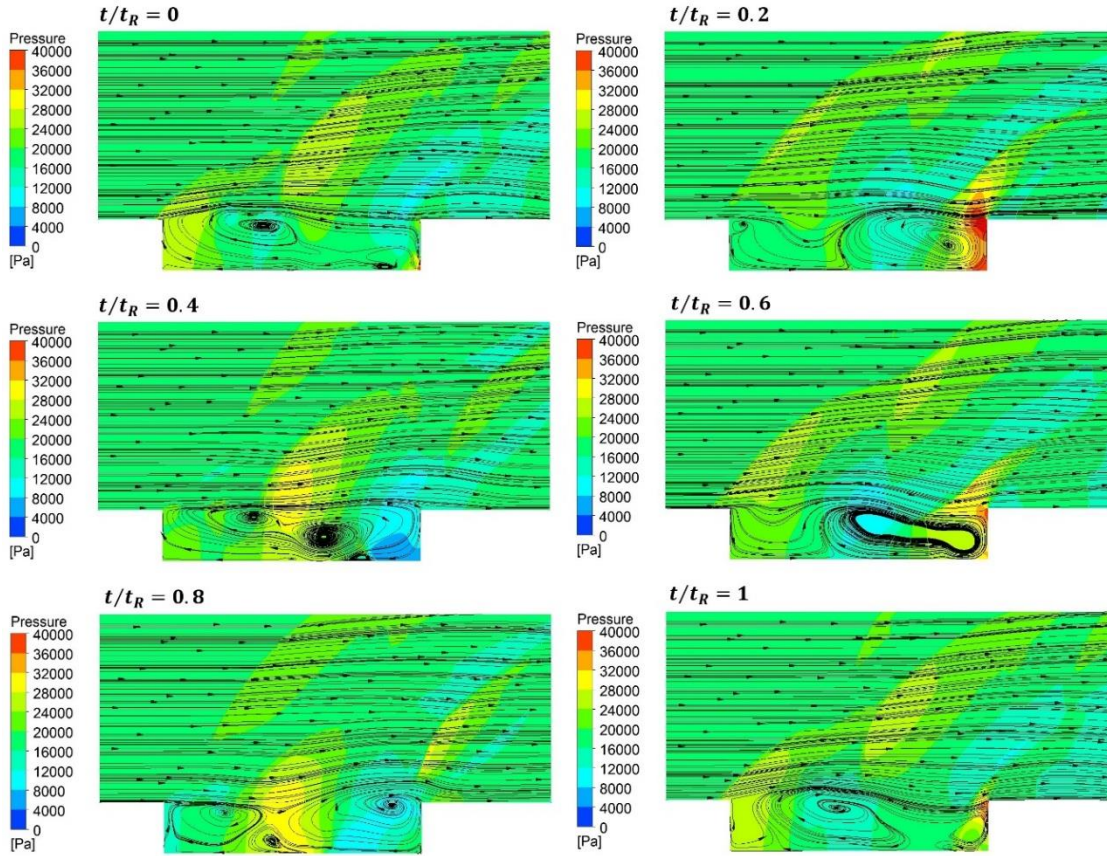
Şekil 3. 3 : İki boyutlu simülasyonda kritik nokta için basınç-zaman grafiği

İki boyutlu simülasyon için bir Rossiter periyoduna denk gelen süre için basınç, Mach sayısı, sıcaklık, yoğunluk, vortisite dağılımları ve akım çizgileri çizdirilmiştir. Her bir dağılım için bir Rossiter periyodunun başından sonuna kadar, aralarında eşit aralık olan altı anın kontürleri çizilmiştir. Her bir dağılım için  $t/tR=0$  anında başlayıp değişen yapılar  $t/tR=0$  anında ilk duruma geri dönmüştür.



Şekil 3. 4 : İki boyutlu simülasyonda kritik nokta için güç-frekans grafiği

İki boyutlu simülasyon için basınç dağılımı ve akım çizgileri Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Akım çizgileri incelendiğinde kavite hücum kenarında başlayıp firar kenarında biten kayma tabakası ve kavite içinde oluşan girdap yapılanmaları görülmektedir. İki büyük girdap göze çarpmaktadır, bunlardan arka duvara yakın olanı daha büyük bir yapıya sahiptir. Bu girdap, oluşumuna alt duvar ve arka duvarın keşistiği bir noktada başlamaktadır. Diğer girdap ise oluşumuna ön duvarın üst noktasında, hücum kenarına ve akış ayrılmasının başladığı yerin biraz altında başlamaktadır. Bu girdaplardan biri çözülmeye başladığında diğer girdabın gelişiminin başladığı, gelişen girdap en son halini aldığı anda önceki girdabın yok olduğu görülmektedir. Ayrıca alt duvar üzerinde daha küçük ölçekli girdap oluşumları da göze çarpmaktadır. Bu küçük ölçekli girdaplara yitime uğrayan büyük ölçekli girdapların sebep olduğu düşünülmektedir. Basınç dağılımına bakılacak olursa, en yüksek basınç değerleri arka duvar üzerinde görülmektedir. Şekil 3.3'teki basınç salınımlarına bakıldığında arka duvardaki yüksek basınç değerlerinin bazı anlarda azalıp sonra tekrar yükselmesi oldukça mantıklıdır. Kavite hücum kenarından, alt duvarın orta noktasında ve firar kenarından başlayıp ilerleyen yüksek basınç dalgaları görülmektedir. Bu dalgalar yukarı doğru çıkarken akım doğrultusunda da ötelenmektedir.



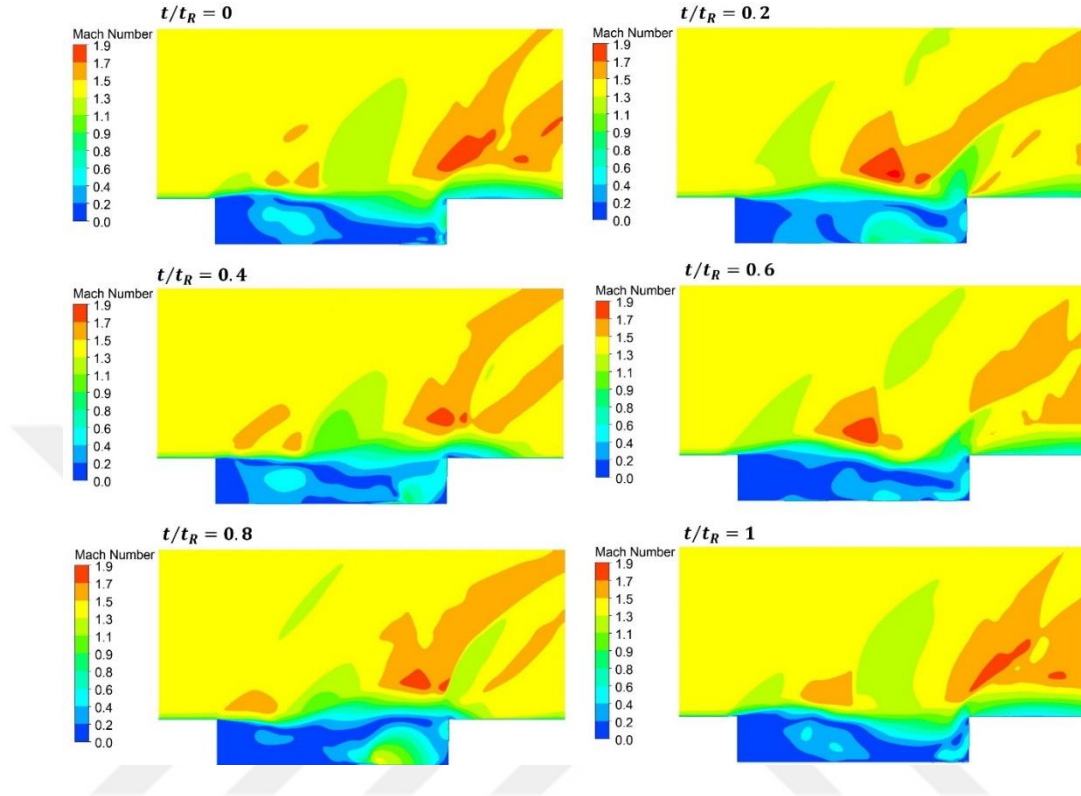
Şekil 3. 5 : İki boyutlu simülasyon akış alanında basınç dağılımı ve akım çizgileri

İki boyutlu simülasyon akış alanında bir periyot boyunca Mach sayısı dağılımı Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Basınç dalgalarının oluştuğu yerlerde Mach sayısının, serbest akış Mach sayısı olan 1.5'tan daha yüksek değerlere çıktığı görülmektedir. Kavite içinde ise 1'in altına düşen değerlere rastlanmaktadır. Akış alanındaki Mach sayısı dağılımı ile girişteki sınır tabaka ve daha sonra ayrılma ile beraber oluşan kayma tabakası basınç dağılımına kıyasla daha net bir şekilde görülmektedir.

İki boyutlu simülasyon akış alanındaki bir periyot boyunca değişen sıcaklık dağılımı Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Sıcaklık birimi olarak Kelvin (K) kullanılmaktadır. Kavite içinde ve kavite duvarlarında serbest akışa göre daha yüksek sıcaklıklar görülmektedir. En yüksek sıcaklık değerlerine ise arka duvarda rastlanmaktadır.

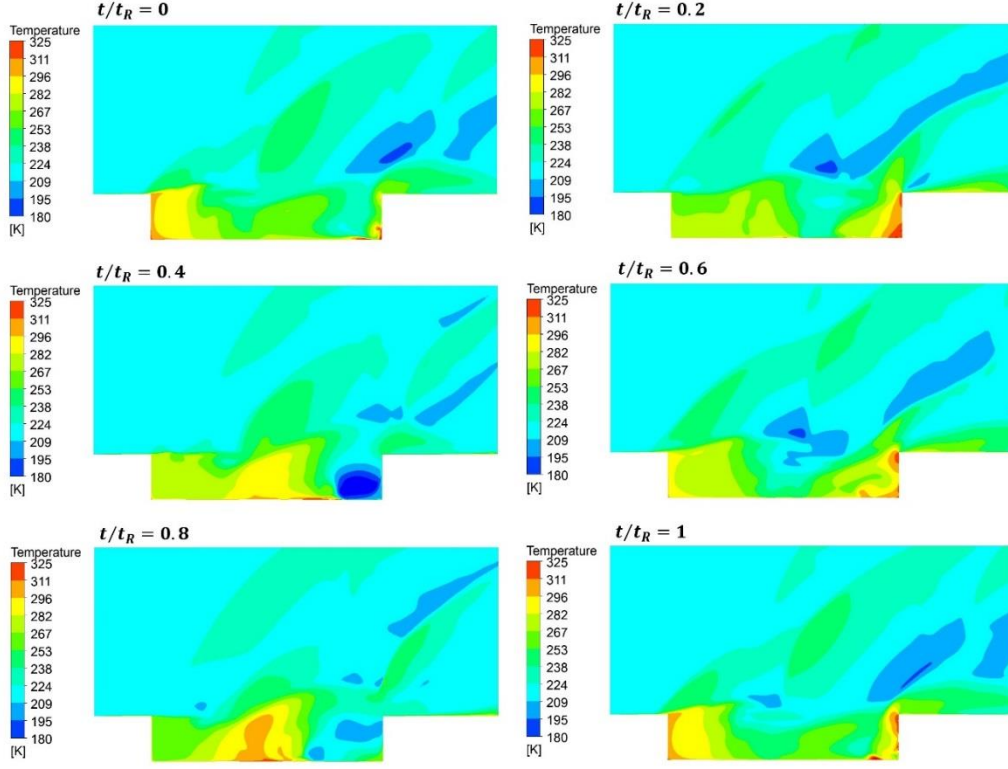
İki boyutlu simülasyon için bir periyot boyunca yoğunluk dağılımı Şekil 3.8'de verilmiştir. Yüksek basınç dalgalarının görüldüğü yerlerde yoğunluğun da arttığı görülmektedir. Bu bölgelerde akışın sıkıştığı anlaşılmaktadır. Kayma tabasının arka

duvara çarpması ile arka duvar etrafında yoğunluk değerlerinin arttığı ve daha sonrasında akışın kavite içine yönelmesi ile yoğunluk değerlerinin tekrar düştüğü görülmektedir.

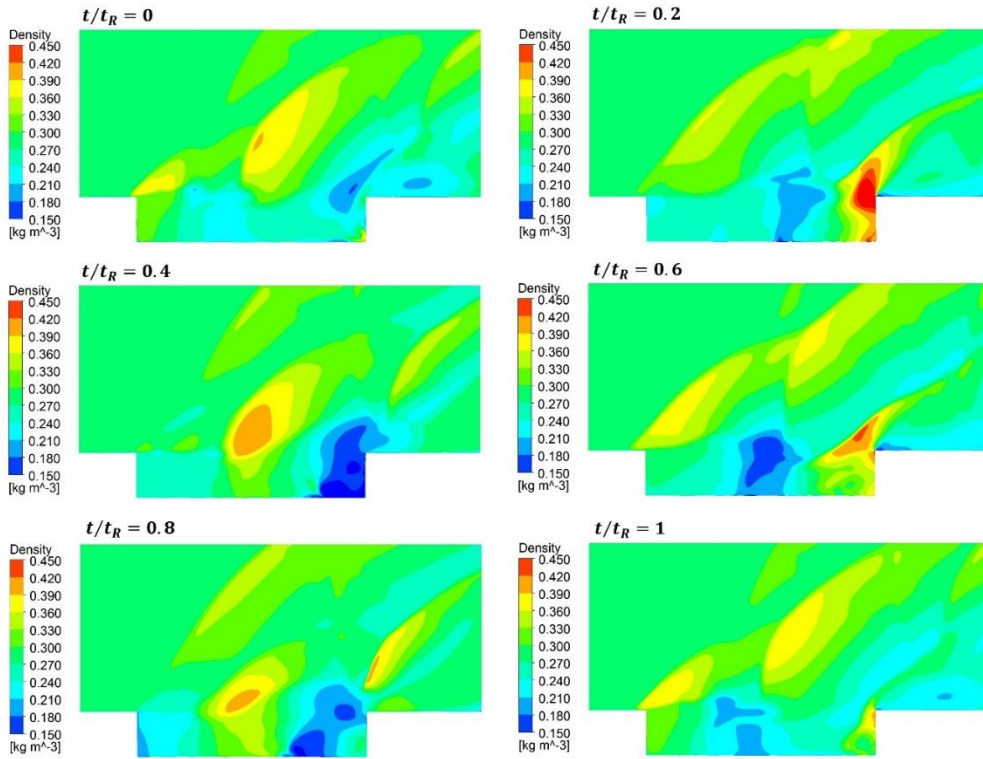


Şekil 3. 6 : İki boyutlu simülasyon akış alanında Mach sayısı dağılımı

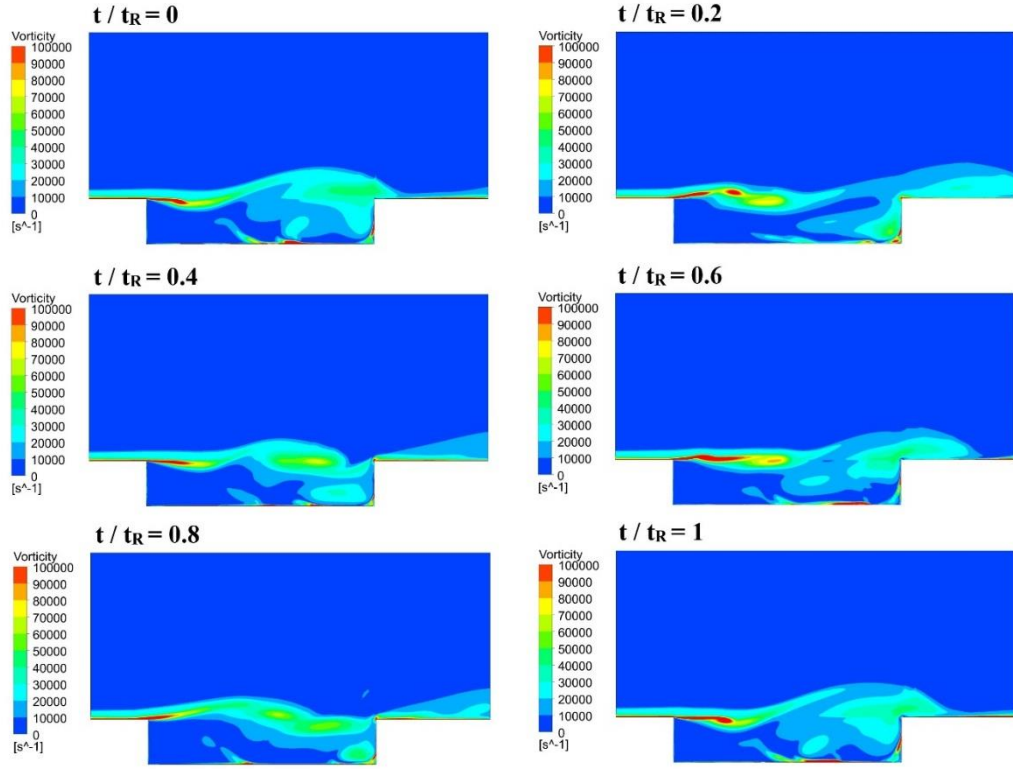
Akıştaki gidap yapılarını ve kayma tabakasını daha detaylı anlamak adına bir periyot boyunca farklı anlarda vortisite dağılımı Şekil 3.9'da yapılmıştır. Şekil 3.9'da kayma tabakasının salınımlı hareketi oldukça net bir şekilde görülmektedir. Kavite girişinde ayrılmanın etkisiyle daha düzensiz olan akışta vortisite değerleri daha yüksektir. Kayma tabakasının bir kısmı kavite içine girerken bir kısmı da kavite dışında akıntı yönünde ilerlemektedir. Girdap yoğunluğunun kavitenin arka duvara yakın ikinci yarısında olduğu gözlenmektedir. Arka duvarda ve alt duvarın arka duvara yakın kısımlarında vortisite değerlerinde artış görülmektedir.



Şekil 3. 7 : İki boyutlu simülasyon akış alanında sıcaklık dağılımı



Şekil 3. 8 : İki boyutlu simülasyon akış alanında yoğunluk dağılımı



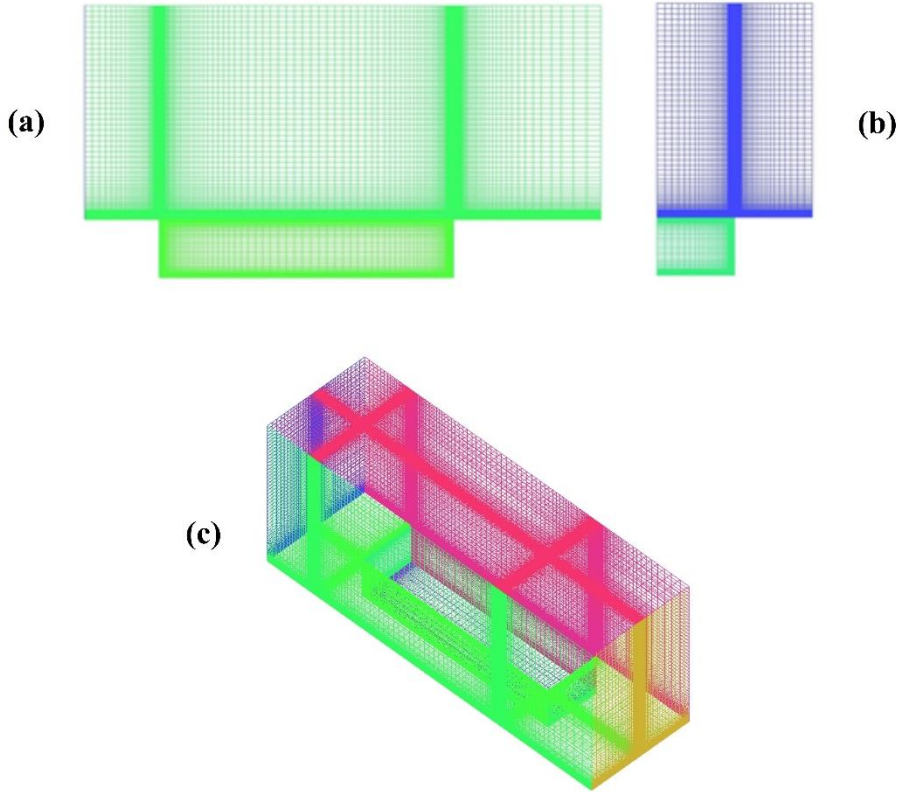
Şekil 3. 9 : İki boyutlu simülasyon akış alanında vortisite dağılımı

### 3.2 Üç Boyutlu Simülasyon

Süpersonik kavite akışında üçüncü boyutun etkisini araştırmak adına üç boyutlu bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu kavite geometrisi  $z=0$  düzlemine göre simetriktir. Bu durum göz önünde tutularak hesaplama süresinin makul bir seviyede tutulması amacıyla akış alanının sadece bir yarısı modellenerek simülasyon gerçekleştirilmiştir.

Üç boyutlu akış alanı iki boyutlu akış alanı ile uyumlu bir şekilde oluşturulmuştur. İki boyutta kullanılan sınır koşullarına ek olarak  $z$  yönünde simetri sınır koşulu tanımlanmıştır. Oluşturulan üç boyutlu ağ yapısı Şekil 3.10'da ön, sol yan ve izometrik görünüşleri ile gösterilmiştir. Toplam eleman sayısı 1,020,020 iken kavite içinde  $96 \times 55 \times 36$  ve kavite dışında  $180 \times 63 \times 72$  eleman bulunmaktadır. İki boyutlu ağ yapısında olduğu gibi kayma tabakası ve duvarlar etrafında hücreler küçültülmüş ve sıkılaştırılmıştır. İlk hücre yüksekliği  $4.8 \times 10^{-6}$  metredir ve hücre büyüme oranı 1.2'dir.

Sınırlarda en yüksek  $y^+$  değeri 2.78 iken ortalama  $y^+$  değeri 0.13'tür. Simülasyonda zaman adımı olarak  $10^{-7}$  saniye kullanılmıştır.

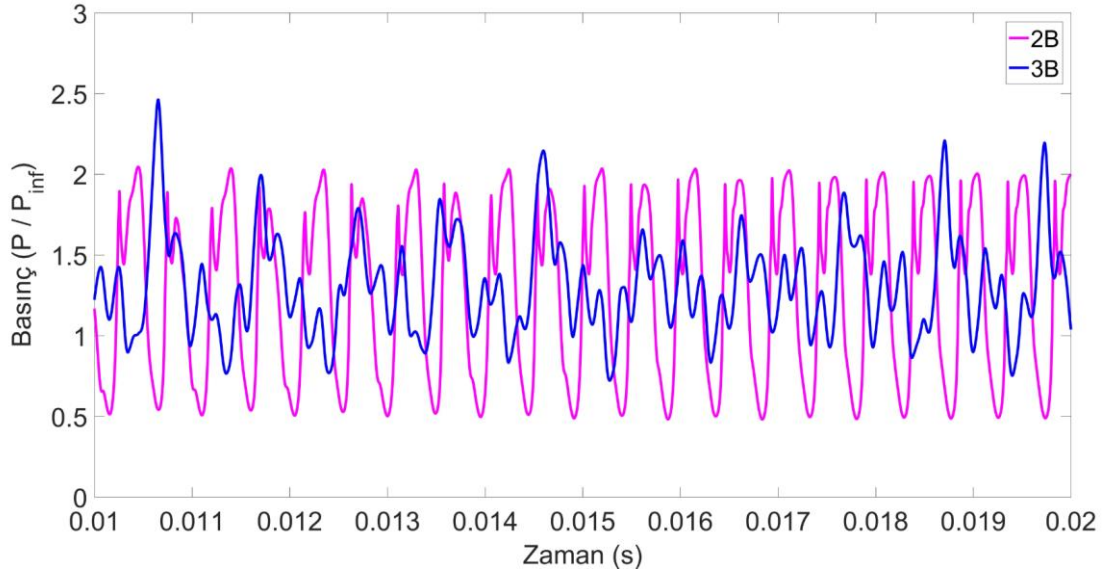


Şekil 3. 10 : Üç boyutlu ağ yapısı (a) Ön görünüş, (b) Sol yan görünüş, (c) İzometrik görünüş

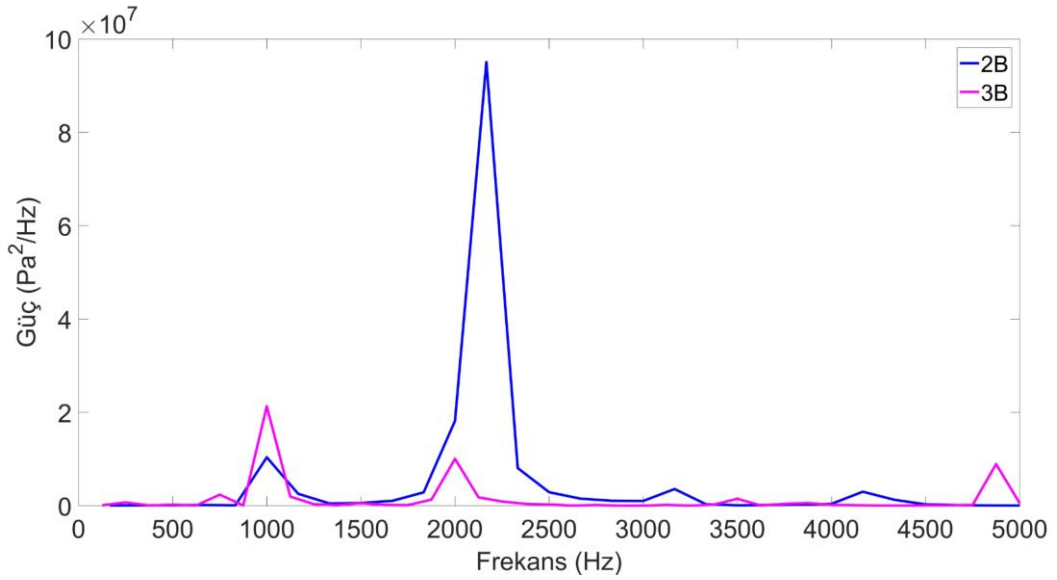
Simetri düzleminde arka duvardaki kritik noktadan elde edilen basınç verileri Şekil 3.11'de iki boyutlu simülasyon ile kıyaslanmıştır. Üç boyutlu simülasyonda ağ elemanı sayısı oldukça fazla olduğu için akışın düzene oturması daha uzun sürmektedir. Bu sebeple kıyas 10. ile 20. Rossiter periyotları arasında yapılmıştır. İki boyutlu simülasyonun aksine üç boyutlu simülasyonda basit ve düzgün bir periyodik salınım görülmemektedir. Salınım yapısı oldukça karmaşıktır. Üçüncü boyutun etkisi ile salınım genliklerinin düştüğü görülmektedir.

Şekil 3.12'de verilen iki ve üç boyutlu simülasyonların kritik noktadaki güç-frekans grafiği incelendiğinde üçüncü boyutta davranışın değiştiği görülmektedir. İki boyutlu simülasyonda ikinci modun ilk moda göre gücü yüksek iken üç boyutlu simülasyonda birinci modun gücü ikinci moddan daha yüksektir. Modlara ait güç değerleri farklı çıksa da frekans değerleri birbirine oldukça yakındır.



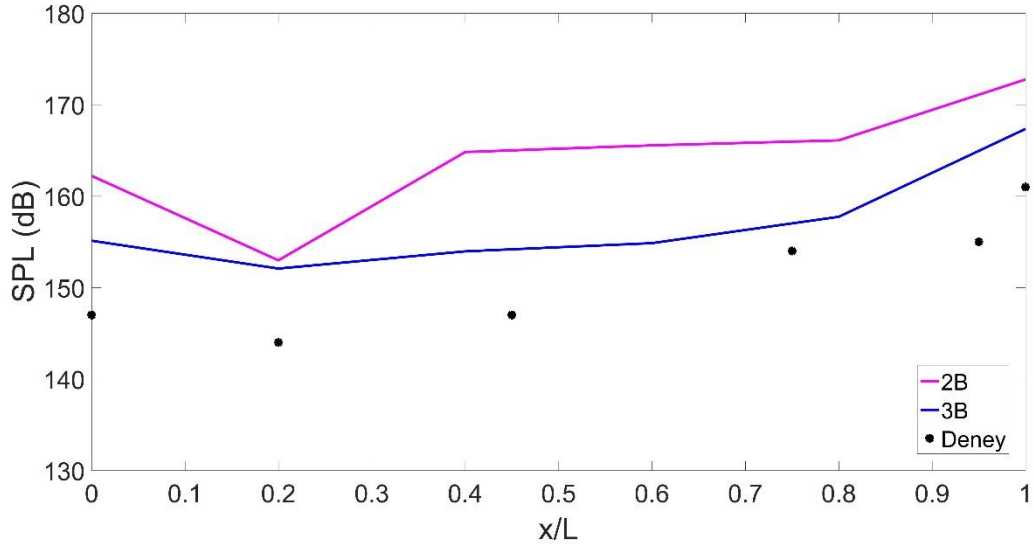


Şekil 3. 11 : İki ve üç boyutlu simülasyonlar için basınç-zaman grafiği



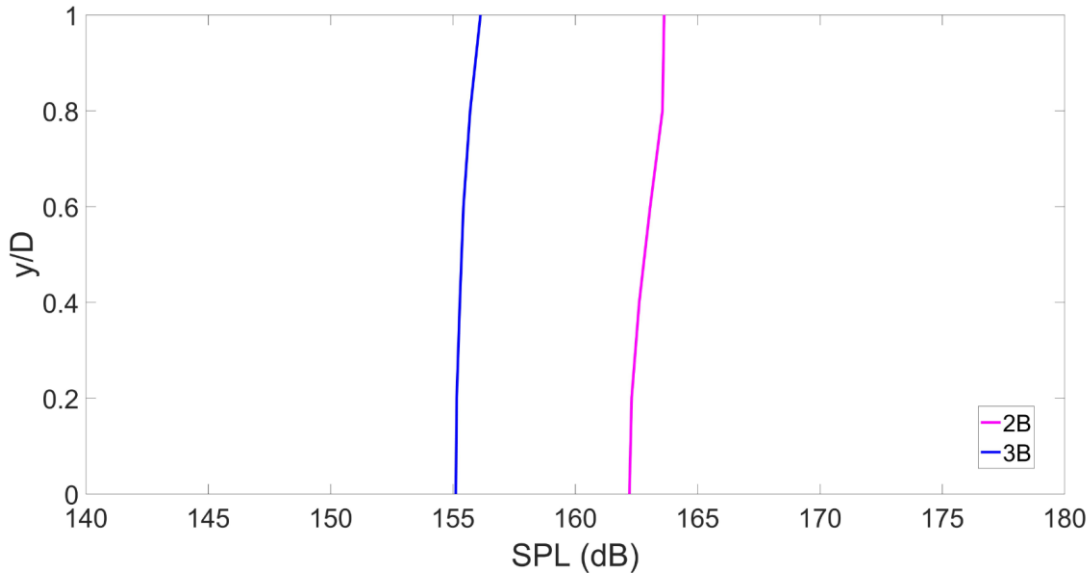
Şekil 3. 12 : İki ve üç boyutlu simülasyonlar için güç-frekans grafiği

İki ve üç boyutlu simülasyonlarda simetri düzleminde alt duvardan elde edilen ses basınç seviyeleri deney ile Şekil 3.13'te kıyaslanmıştır. Akışın üçüncü boyuta yayılmasının etkisiyle ses basınç seviyeleri deneye oldukça yaklaşmıştır. İki boyutlu simülasyon ile deney arasındaki fark 10-15 dB civarında iken, üç boyutlu simülasyon ile deney arasında fark 5 dB ile 7 dB arasında değişmektedir. İki boyutlu simülasyon ile deney arasındaki fark yaklaşık % 8 iken, bu fark üç boyutlu simülasyon için % 4 civarındadır. Her iki simülasyonun da ses basınç seviyesi dağılım davranışı deneye oldukça yakındır.

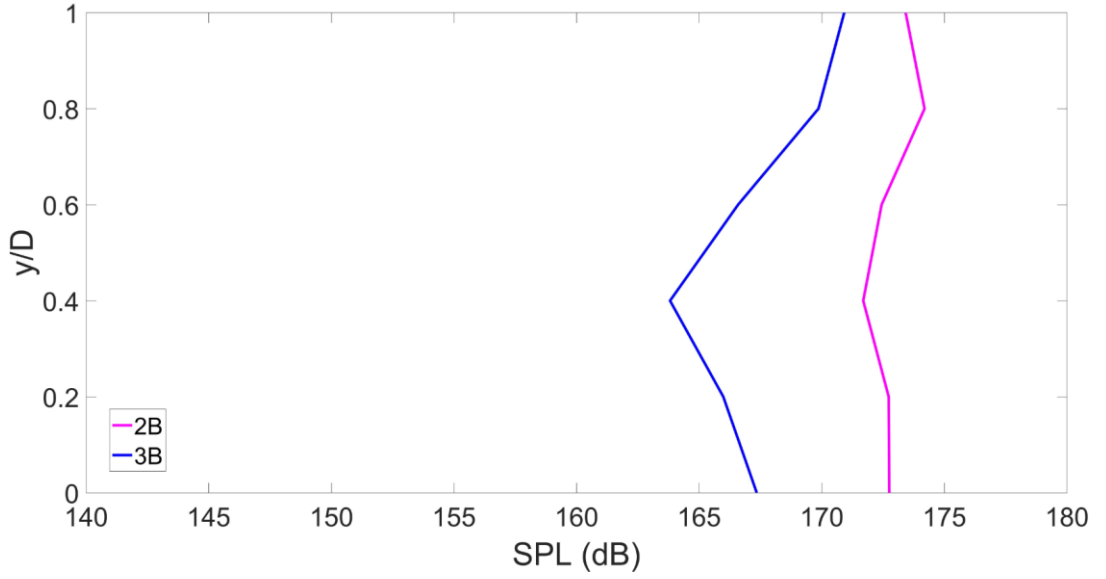


Şekil 3. 13 : İki ve üç boyutlu simülasyonlar için alt duvar SPL-konum grafiği

İki ve üç boyutlu simülasyonların simetri düzleminde ön ve arka duvardan elde edilen ses basınç seviyelerinin kıyası Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te sırasıyla yapılmıştır. Bütün duvarlarda üç boyutlu simülasyona ait ses basınç seviyeleri iki boyutlu simülasyon değerlerinden düşüktür. Aradaki fark ön duvarda 8 dB civarında iken arka duvarda 5 dB civarındadır. Duvarlar boyunca ses basınç seviyelerinin dağılım davranışı oldukça benzerdir.



Şekil 3. 14 : İki ve üç boyutlu simülasyonlar için ön duvar SPL-konum grafiği



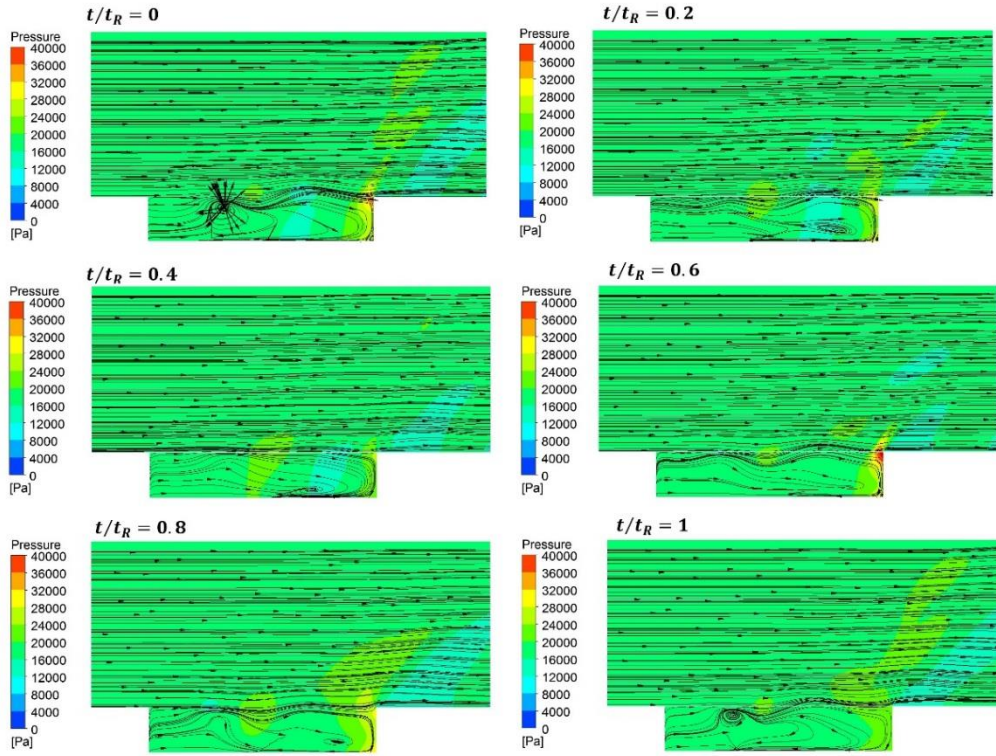
Şekil 3. 15 : İki ve üç boyutlu simülasyonlar için arka duvar SPL-konum grafiği

1 Rossiter periyodu için üç boyutlu simülasyon akış alanının simetri düzlemindeki basınç, Mach sayısı, sıcaklık, yoğunluk, vortisite dağılımları ve akım çizgileri çizdirilmiştir.

Şekil 3.16'da üç boyutlu simülasyonun simetri düzlemindeki basınç dağılımı ve akım çizgileri gösterilmiştir. Akım çizgileri incelendiğinde üç boyutlu simülasyonda iki boyutlu simülasyonda da olduğu gibi iki ana girdap yapılanması görülmektedir. Fakat her iki girdap yapılanması da Şekil 3.5'te gösterilen iki boyuttaki girdap yapılarına kıyasla daha zayıf görünmektedir. Özellikle arka duvara yakın olan girdabın oldukça zayıf yapıda olduğu anlaşılmaktadır. Akış alanındaki basınç dağılımı incelendiğinde arka duvar üzerinde yüksek basınç değerleri gözlemlense de iki boyuttaki değerlerden daha düşüktür. Ayrıca yüksek basınç dalgalarının değerleri de iki boyutlu simülasyonlara göre daha düşüktür. Üç boyutlu kavitede arka duvar ile etkileşim sonucu oluşan ve yukarı doğru ilerleyen akım yönünde de ötelenen bir yüksek basınç dalgası dikkat çekmektedir. En yüksek basınç değerlerine arka duvarda rastlanmaktadır. İki boyutlu simülasyonda ön duvarda başlayan yüksek basınç dalgasına üç boyutlu simülasyonda rastlanmamaktadır.

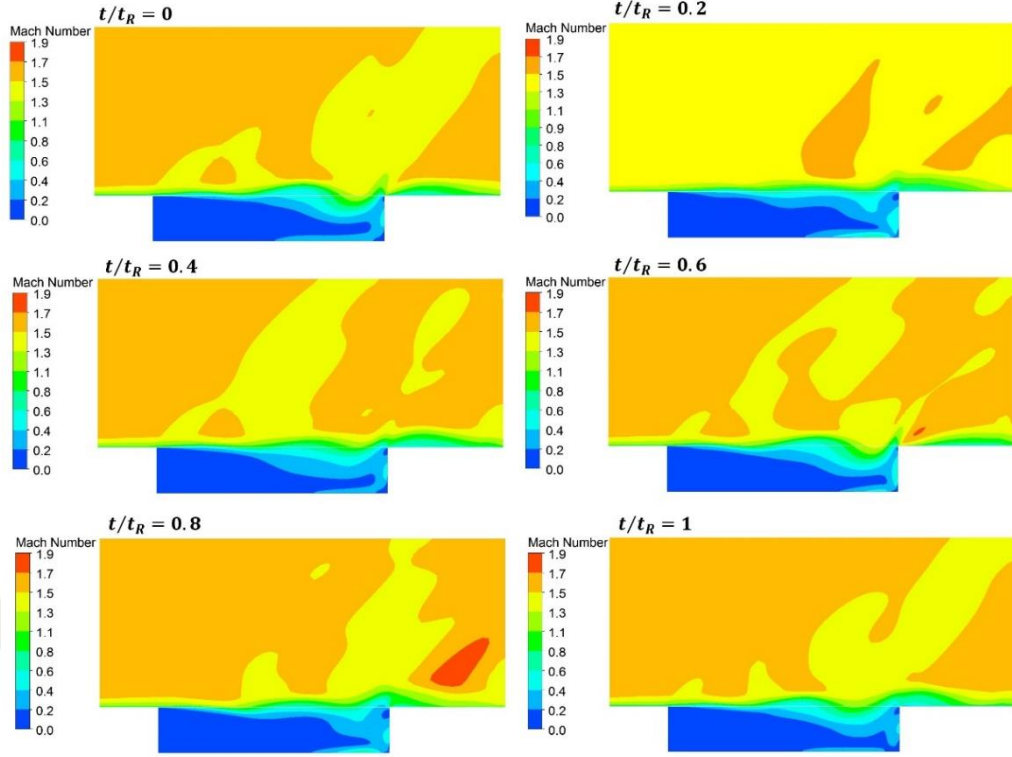
Üç boyutlu simülasyonun simetri düzleminde Mach sayısı dağılımı Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Şekil 3.6 ve Şekil 3.17'deki Mach sayısı dağılımları karşılaştırıldığında, iki boyutlu simülasyonda üç boyutlu simülasyona göre daha yüksek değerler görülmektedir. İki boyutlu simülasyonda üst limit 1.9 Mach iken üç boyutlu

simülasyonda bu değer 1.7 Mach'tır. Kavite içi girdap yapılarının gücünün azalmasından anlaşılacağı üzere, kavite içindeki Mach sayısı dağılımı iki boyutlu simülasyona göre daha düzgündür. Sadece arka duvardan kavite içine kütle girişi sebebiyle, arka duvar önünde yüksek hızlar görülmektedir.

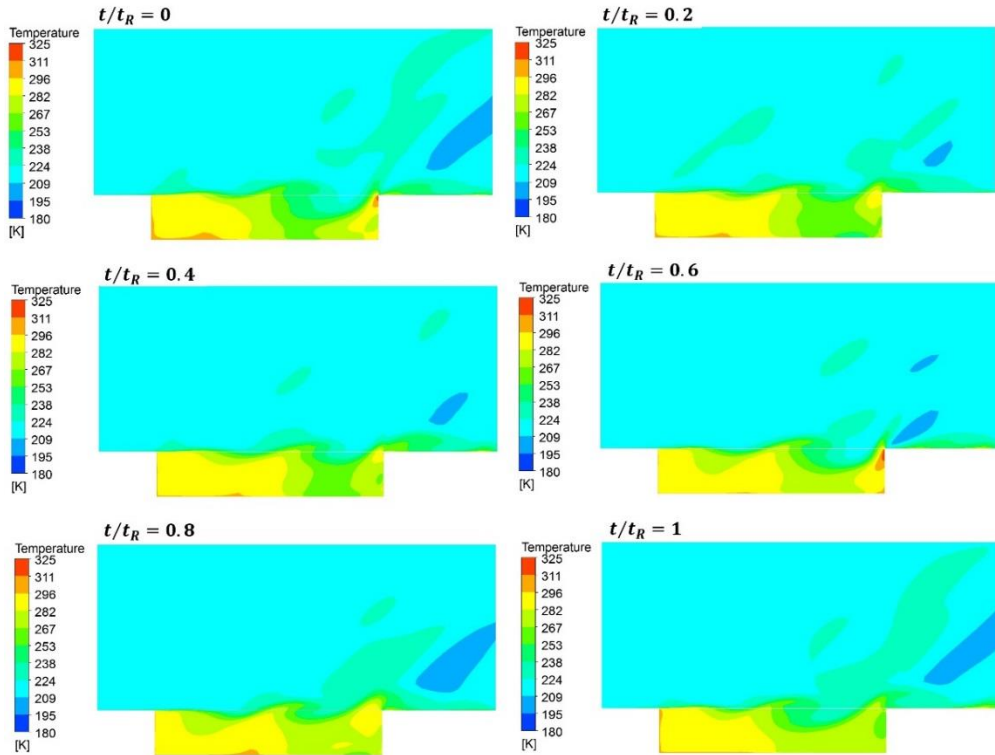


Şekil 3. 16 : Üç boyutlu simülasyon simetri düzleminde basınç dağılımı ve akım çizgileri

Üç boyutlu simülasyonun simetri düzlemindeki sıcaklık dağılımı Şekil 3.18'de gösterilmektedir. Sıcaklık dağılımı incelendiğinde kavite içindeki sıcaklık değerlerinin kavite dışına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. En yüksek sıcaklıklar kavite duvarlarına yakın yerlerde gözlemlenirken kavite çıkışında sıcaklığın çok düştüğü bir dalga göze çarpmaktadır. Şekil 3.7, Şekil 3.18 ile kıyaslandığında iki boyutlu simülasyonlarda kavite içi sıcaklık farkının üç boyutlu simülasyonlara göre daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. İki boyutlu simülasyonlarda kavite içinde, girdap yapılarının gücünden ötürü arka duvar önünde sıcaklığın çok düştüğü bir alan oluşmaktadır. Ayrıca iki boyutlu simülasyonlarda duvarlarda gözlemlenen sıcaklıklar da üç boyutlu simülasyonlara göre daha yüksektir.

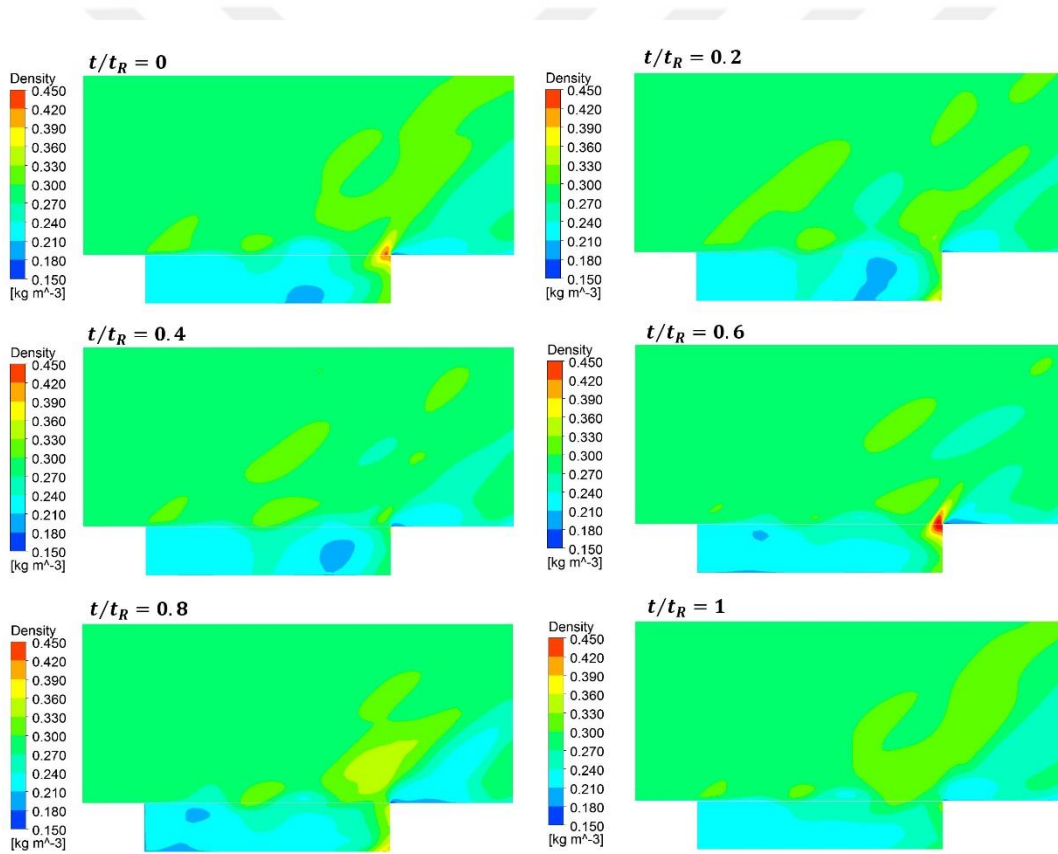


Şekil 3. 17 : Üç boyutlu simülasyon simetri düzleminde Mach sayısı dağılımı



Şekil 3. 18 : Üç boyutlu simülasyon simetri düzleminde sıcaklık dağılımı

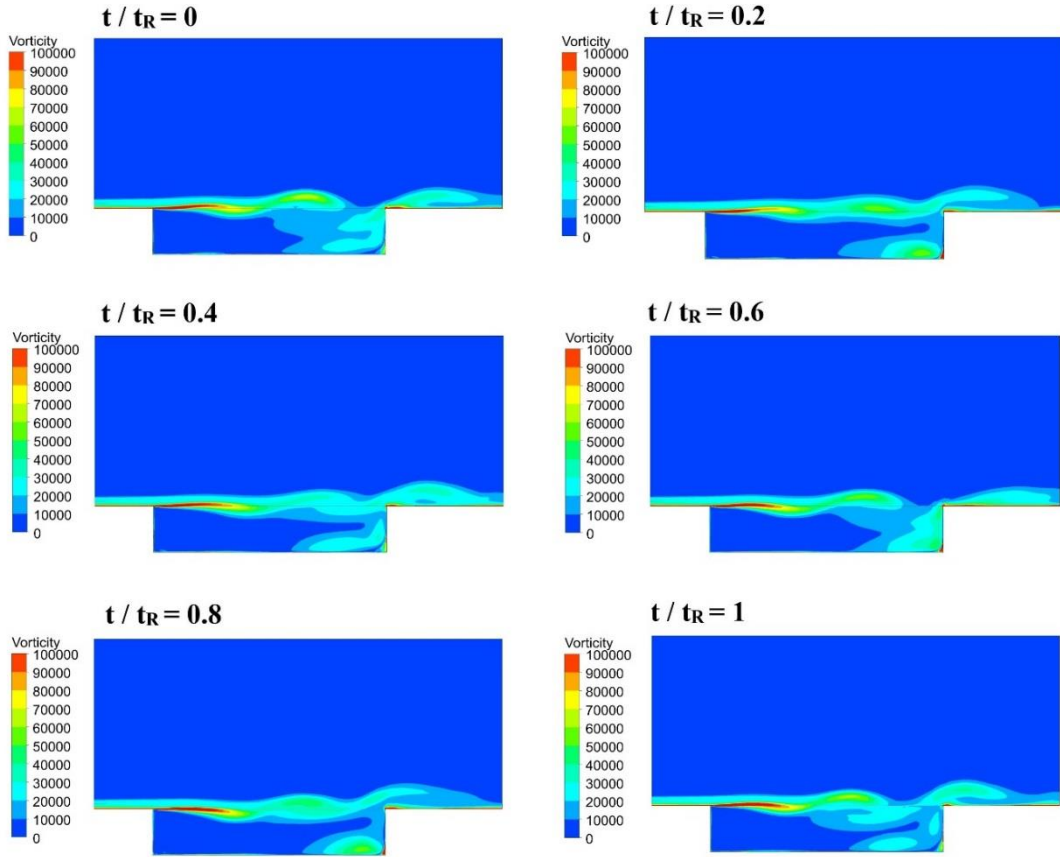
Üç boyutlu simülasyonun simetri düzlemindeki yoğunluk dağılımı Şekil 3.19’da gösterilmiştir. Arka duvardaki firar kenarında yüksek yoğunluk değerleri görülen anlar olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebinin kayma tabakası ile arka duvarın etkileşimi olduğu düşünülmektedir. Bunun dışında kavite içindeki yoğunluk değerlerinin kavite dışındakilere göre daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 3.8 ve Şekil 3.19 karşılaştırıldığında, iki boyutlu simülasyon ile üç boyutlu simülasyonun dağılım açısından benzer sonuçlar verdiği, fakat simülasyonların gözlenen yoğunluk aralığının farklı olduğu görülmektedir. İki boyutlu simülasyonda, arka duvarın etrafında daha geniş bir alanda ve daha yüksek sıkışma oluşurken kavite içinde bazı alanlarda yoğunluğun çok düştüğü de görülmektedir. İki boyutlu simülasyon kavite içi ve dışında daha yüksek yoğunluk farkları içermektedir.



Şekil 3. 19 : Üç boyutlu simülasyon simetri düzleminde yoğunluk dağılımı

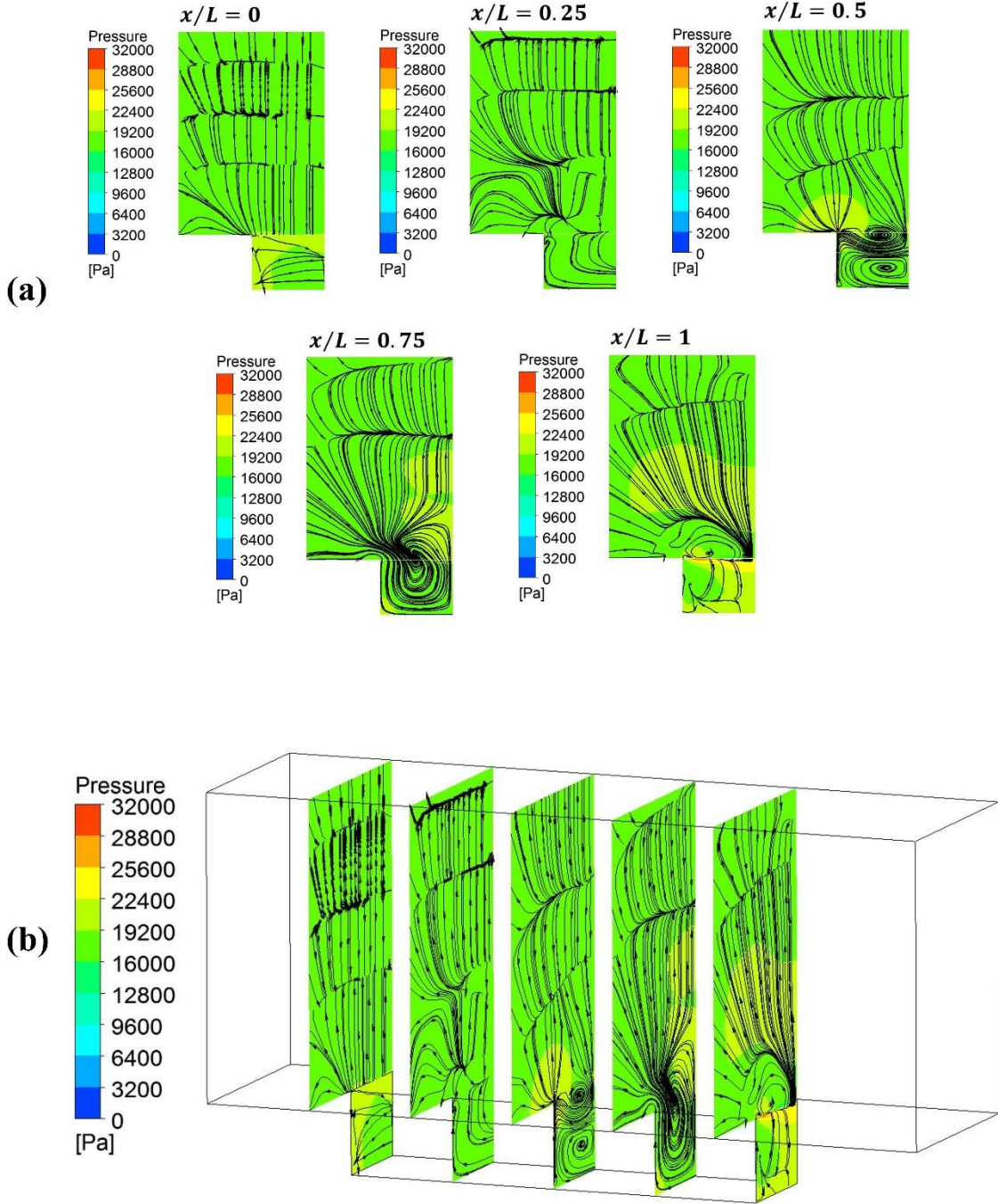
Üç boyutlu simülasyonda kayma tabakası oluşumu ve girdap yapılarının daha iyi anlaşılması adına bir periyot boyunca simetri ekseninde gözlenen vortisite dağılımları Şekil 3.20’de gösterilmiştir. İki boyutlu simülasyonla kıyaslandığında kayma tabakasının incelendiği ve girdap yoğunluklarının azaldığı görülmektedir. Kavite içinde

alt duvar ile arka duvarın kesişim bölgesinde yüksek vortisite değerleri gözlenmektedir.



Şekil 3. 20 : Üç boyutlu simülasyon simetri düzleminde vortisite dağılımı

Akışta üçüncü boyutun etkisinin daha iyi anlaşılması amacıyla akışa dik kesitlerin de incelenmesi önem taşımaktadır. Bu amaçla bir Rossiter periyodun son anı için akışa dik farklı düzlemlerde basınç dağılımı ve akım çizgileri Şekil 3.21’de gösterilmiştir. İncelenen düzlemler  $x/L=0$ ,  $x/L=0.25$ ,  $x/L=0.5$ ,  $x/L=0.75$  ve  $x/L=1$  düzlemleridir. Şekil 3.21’de bu düzlemlerin ayrı ayrı dik bakış görselleri ve birarada gösterimleri bulunmaktadır. Şekil incelendiğinde girdap yapılarının kavite ortası ile arka duvar arasında yoğunlaştığı görülmektedir.

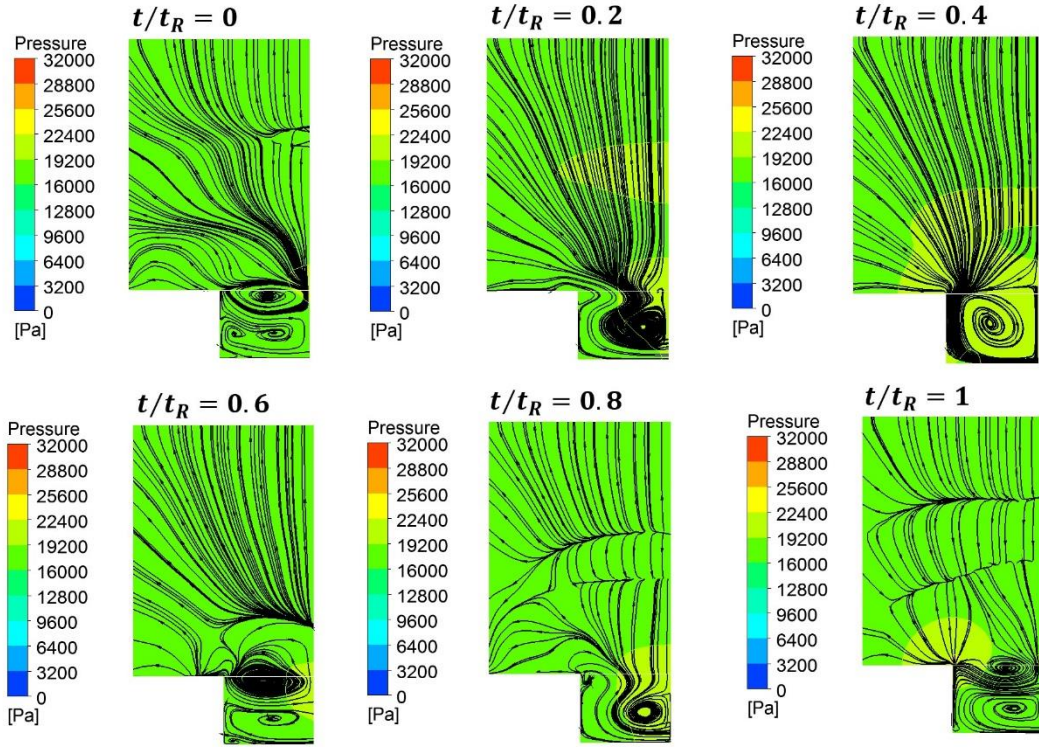


Şekil 3. 21 : Üç boyutlu simülasyon için akışa dik düzlemlerde basınç dağılımı ve akım çizgileri (a) Dik bakış, (b) Akış alanında toplu bakış

Kavite içinde akışa dik orta düzlem ( $x/L=0.5$ ) için bir Rossiter periyodunda basınç dağılımı ve akım çizgileri çizdirilmiş ve Şekil 3.22'de gösterilmiştir. Bu düzlem üzerindeki basınç dağılımı periyodun farklı anlarında belirgin bir şekilde değişmemektedir. Akım çizgileri incelendiğinde öncelikle üst üste iki girdabın olduğu ve daha sonra bu yapının yerini daha büyük tek bir girdaba bıraktığı



anlaşılmaktadır. Bu durum küçük iki girdabın tekrar oluşumu ve yerini tekrar büyük girdaba bırakması şeklinde tekrarlanmaktadır. Ek olarak, çok küçük ölçekte bir köşe girdabı oluşumu da gözlenmektedir.



Şekil 3. 22 : Üç boyutlu simülasyon  $x/L=0.5$  düzleminde basınç dağılımı ve akım çizgileri

### 3.3 İki ve Üç Boyutlu Kontrolsüz Kavite Simülasyonları Hakkında Yorumlar

Süpersonik kavite akışının özelliklerini incelemek adına iki ve üç boyutlu akış simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara genel olarak bakıldığında oldukça karmaşık olmakla birlikte periyodik de olan bir akışla karşılaşılmıştır. Kavite ön ve arka duvarları arasında kayma tabakası oluşumu gözlemlenmiş, kayma tabakasının arka duvar ile etkileşimi sonucunda kavite içine kütle girişi olduğu ve bu kütle kavite içinde girdap oluşumlarına sebep olduğu görülmüştür. Kavite içi duvarlardaki kontrol noktalarından alınan verilere bakıldığında duvarlar üzerinde zamana bağlı değişen basınç salınımları olduğu anlaşılmıştır. Akış alanındaki dağılımlar incelendiğinde ön, alt ve arka duvarlarından başlayan ve kavite dışına doğru ilerleyen yüksek basınç dalganmaları görülmüştür. Kavite içinde kendim kendini tekrar eden girdap yapıları oluşmuştur.

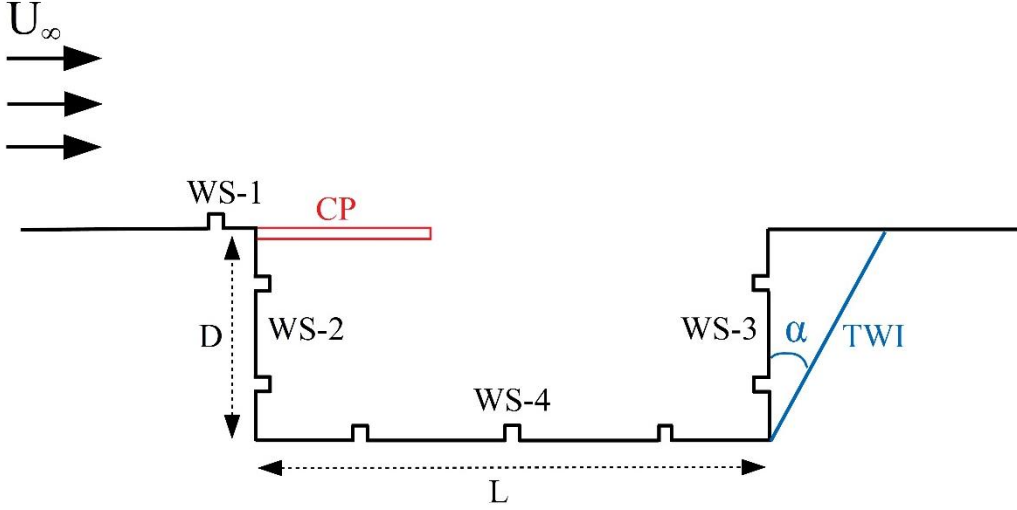
Sonuçlar incelendiğinde süpersonik kavite akışında üçüncü boyutun etkisinin oldukça önemli olduğu anlaşılmıştır. İki boyutlu simülasyonda akıştaki periyodik davranış altıncı periyottan sonra düzene düzene oturmaya başlarken, üç boyutlu simülasyonda bu süre daha uzundur. Anlamlı sonuçlar yaklaşık onuncu periyottan sonra elde edilebilmiştir. İki boyutlu simülasyondaki düzenli ve periyodik davranış üçüncü boyutta değişmiş ve düzensizleşmiştir. İki ve üç boyutlu simülasyonlar için baskın modların frekans değerleri oldukça yakın hesaplanmasına rağmen güç hesabında farklılıklar görülmüştür. Üçüncü boyutun etkisi ile kiplere karşılık gelen güç değerleri düşmüştür. İki boyutlu simülasyonda ikinci kiptin gücü ilk kipten daha yüksek iken üç boyutlu simülasyonda ilk kip en yüksek güce sahip olan kiptir. Alt duvardaki ses basınç seviyeleri incelendiğinde her iki simülasyonun da ses basınç dağılım davranışının deneyle tutarlı olduğu görülse de üç boyutlu simülasyon sonuçları deneye daha yakın çıkmıştır.

Sonuç olarak iki boyutlu simülasyonun akışı oldukça periyodik tahmin etmesine rağmen üç boyutlu simülasyon sonuçlarından anlaşıldığı üzere akışın göz ile kolayca ayırt edilebilecek basitlikte bir periyodikliğe sahip olmadığı anlaşılmıştır. Akış alanındaki dağılımlar ve baskın mod frekansları gibi akıştaki temel özellikler iki boyutlu simülasyon ile doğru şekilde tahmin edilmektedir. Bu sebeple kavite içindeki girdap oluşumlarını önlemek, basınç salınımlarını azaltmak amacıyla akış incelemesi yapmak için iki boyutlu simülasyonun yeterli olacağı sonucuna varılmıştır. İki boyutlu simülasyonda oluşan girdap yapıları ve salınımlar üçüncü boyuttakinden daha yüksek tahmin edilse de, iki boyutta bu etkileri bastırmak üçüncü boyutta da bastırmak anlamına gelecektir. Tezin ileri aşamalarında kavite akışının pasif ve aktif kontrolü iki boyutlu simülasyonlar ile gerçekleştirilmiştir.

#### 4. SÜPERSONİK KAVİTE AKIŞININ PASİF YÖNTEMLER İLE KONTROLÜ

Süpersonik kavite akışının pasif kontrolü kavite geometrisinde kalıcı değişimler yapılarak gerçekleştirilmiştir. Pasif yöntemlerle akış kontrolü üç çalışma altında yürütülmüştür. Bunlar; kavite arka duvarına eğim verme, kavite girişine plaka ekleme ve kavite duvarlarına engel ekleme çalışmalarıdır. Bu çalışmalar kapsamında iki boyutlu kontrollü HAD simülasyonları gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kontrolsüz simülasyon sonuçlarıyla kıyaslanarak akışın kontrol edilebilirliği araştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında arka duvara eğim verme çalışması için “TWI”, kavite girişine rampa ekleme çalışması için “CP” ve kavite duvarlarına engel ekleme çalışması için “WS” kısaltmaları kullanılmıştır. Pasif yöntemlerinin kavite üzerinde gösterimi Şekil 4.1’deki gibidir. Şekilde serbest akış hızı “ $U_{\infty}$ ”, girişe eklenen plakanın uzunluğu “ $L_{CP}$ ” ve arka duvarın y-ekseni ile yaptığı eğim açısı “ $\alpha$ ” ile gösterilmektedir. TWI çalışmasında kavitenin arka duvarına farklı eğim açıları verilerek kayma tabakası ile arka duvarın sert etkileşimi hafifletilmeye çalışılmıştır. CP çalışmasında kavite girişine farklı uzunluklarda plakalar eklenerek kavite girişindeki akış yönlendirilmeye çalışılmıştır. Son olarak WS çalışmasında kavite girişine ve duvarlarına engeller konumlandırılarak akış karakteristiğini değiştirmeye çalışılmıştır. WS çalışmasında kavite girişine eklenen engel WS-1, kavite ön duvarına eklenen eklenen iki engel WS-2, kavite arka duvarına eklenen iki engel WS-3 ve kavite alt duvarına eklenen üç engel WS-4 olarak adlandırılmıştır.



Şekil 4. 1 : Pasif kontrol yöntemleri

#### 4.1 Arka Duvara Eğim Verme Çalışmaları

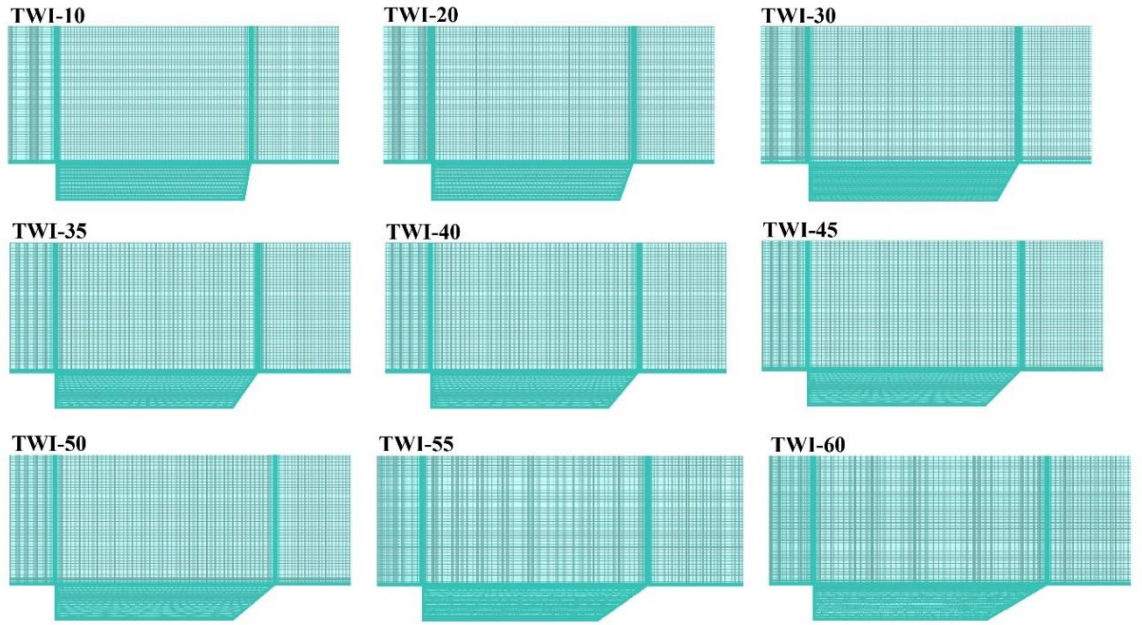
Arka duvara verilen  $\alpha$  eğim açıları  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $55^\circ$  ve  $60^\circ$  şeklindedir. Açının etkisinin daha detaylı incelenebilmesi için  $30^\circ$  ile  $60^\circ$  arasında beşer derecelik dilimler incelenmiştir. Her bir eğim açısına uygun iki boyutlu geometriler oluşturulmuş ve ağ yapıları kontrolsüz simülasyondaki temel özellikler korunarak oluşturulmuştur. Ağ yapılarının özellikleri Çizelge 4.1’de kontrolsüz simülasyonun ağ yapısı özellikleri ile birlikte verilmiştir. Farklı arka duvar eğim açılarına sahip geometrilerde ağ yapıları Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Ağ yapısının daha iyi anlaşılması adına Şekil 4.2’de TWI- $40^\circ$  ağ yapısının normal ve yakın gösterimlerine yer verilmiştir. Simülasyonlarda zaman adımı  $5 \times 10^{-7}$  saniyedir.

Arka duvara eğim verilen kontrollü simülasyonların sonuçları kontrolsüz simülasyon ile 8. ile 14. periyotlar arasındaki 6 periyotluk sürede kıyaslanmıştır.

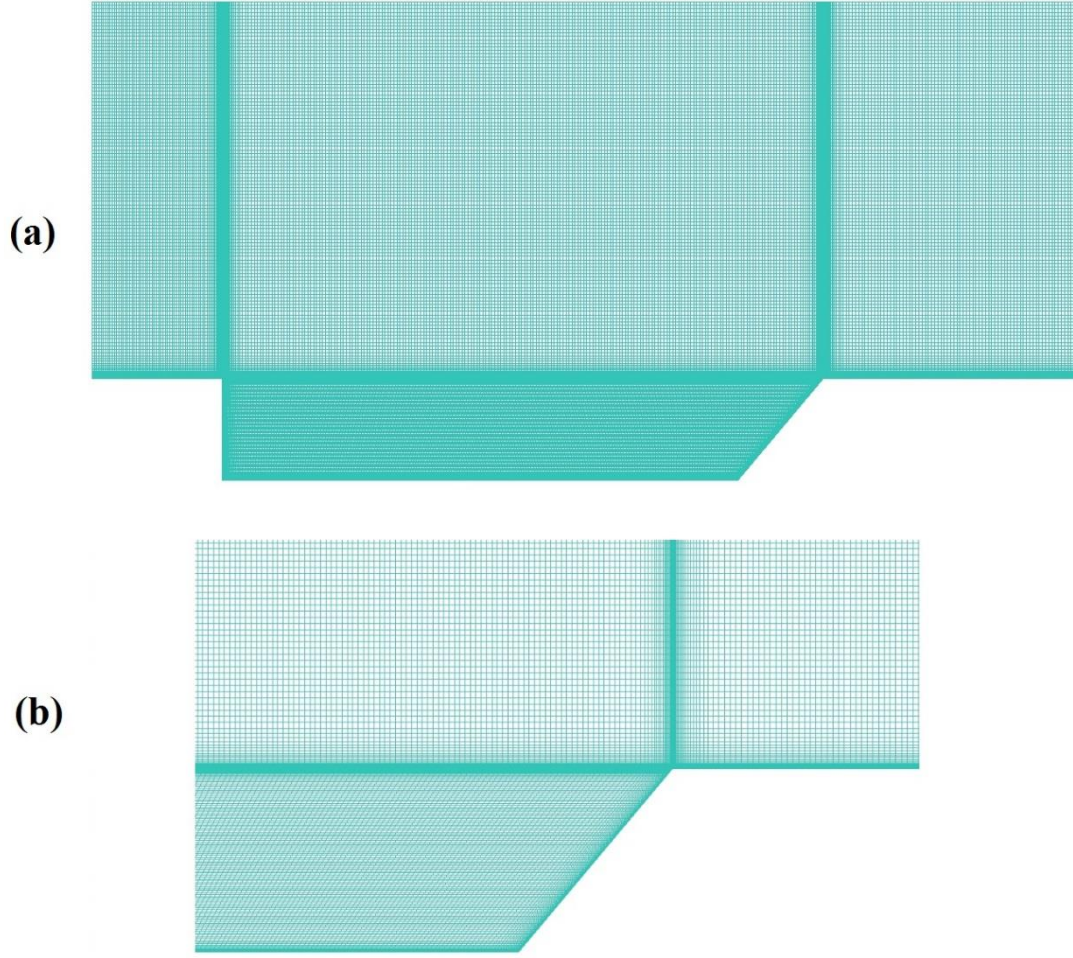
Arka duvardaki kritik noktadan elde edilen zamana bağlı basınç verileri Şekil 4.4’te gösterilmiştir. Arka duvar eğim açısı arttıkça basınç salınım genliklerinin düştüğü görülmektedir.  $30^\circ$ ’lik açıdan itibaren basınç genlikleri oldukça sönümlenmeye başlamaktadır ve daha yüksek açılı simülasyonlar arası farklar kolayca ayırt edilememektedir.

Çizelge 4. 1 : Kavite Arka Duvarına Eğim Verilmiş Geometrilere Ağ Yapısı Özellikleri

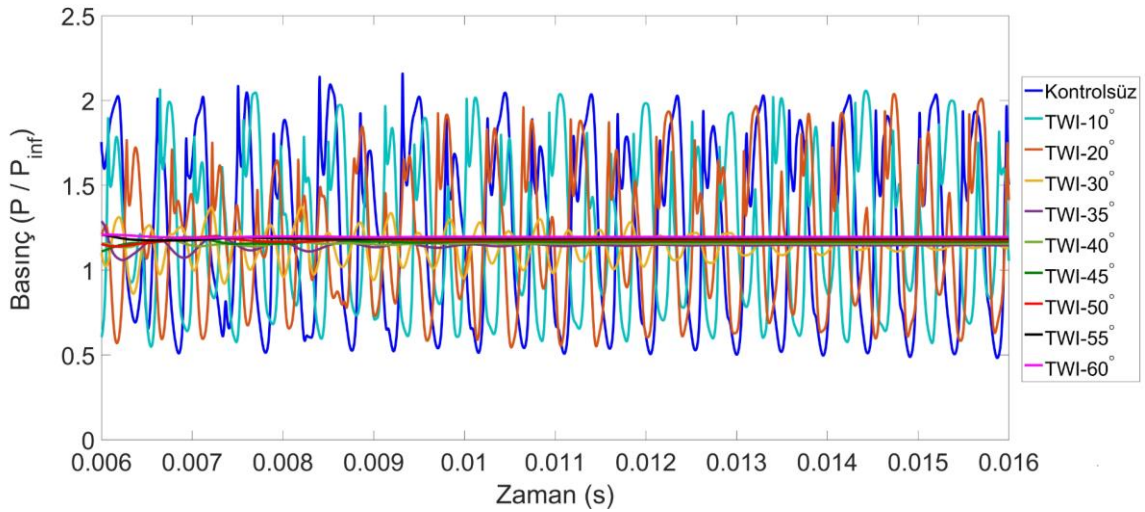
Adlandırma	Eğim Açısı	Eleman Sayısı	İlk Hücre Yüksekliği	Hücre Büyüme Oranı	Boyut Oranı	Eriksson Çarpıklığı	Kalite
Kontrolsüz	-	67,077	$5 \times 10^{-5}$	1.13	16.1	1	1
TWI-10°	10°	68,211	$5 \times 10^{-5}$	1.13	16.1	0.985	1
TWI-20°	20°	70,200	$5 \times 10^{-5}$	1.13	16.1	0.94	0.999
TWI-30°	30°	71,918	$5 \times 10^{-5}$	1.13	16.1	0.866	0.999
TWI-35°	35°	75,406	$5 \times 10^{-5}$	1.13	16.1	0.819	0.999
TWI-40°	40°	76,083	$5 \times 10^{-5}$	1.13	16.1	0.766	0.998
TWI-45°	45°	76,506	$5 \times 10^{-5}$	1.13	16.1	0.707	0.998
TWI-50°	50°	77,640	$5 \times 10^{-5}$	1.13	16.1	0.643	0.998
TWI-55°	55°	81,949	$5 \times 10^{-5}$	1.13	16.1	0.574	0.997
TWI-60°	60°	84,378	$5 \times 10^{-5}$	1.13	27	0.5	0.996



Şekil 4. 2 : Kavite arka duvarına eğim verilmiş geometrilere ağ yapıları



Şekil 4. 3 : (a)TWI-40° ağ yapısı, (b) TWI-40° ağ yapısı-yakın görünüm

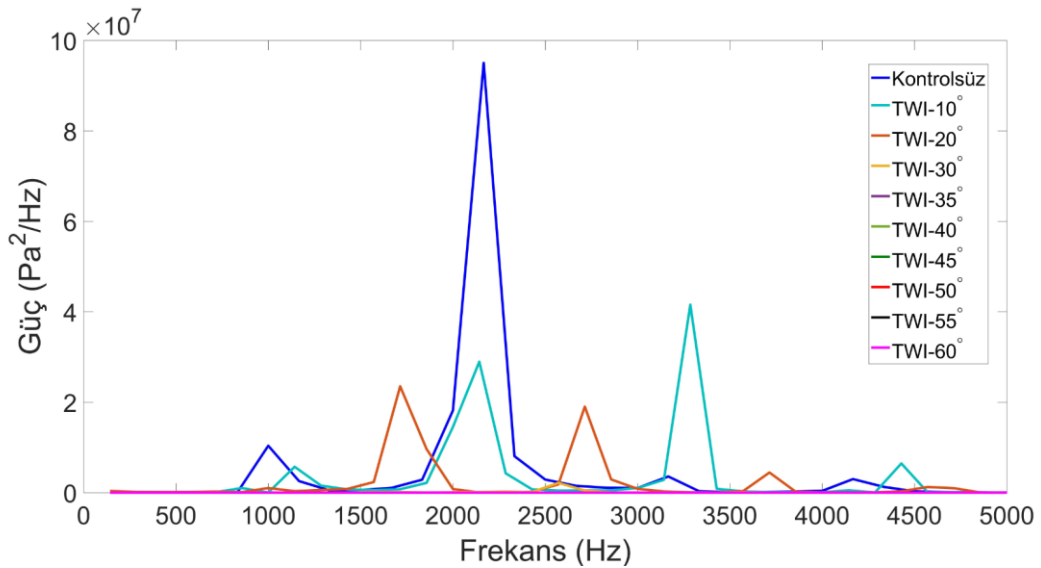


Şekil 4. 4 : TWI kritik nokta basınç-zaman grafiği

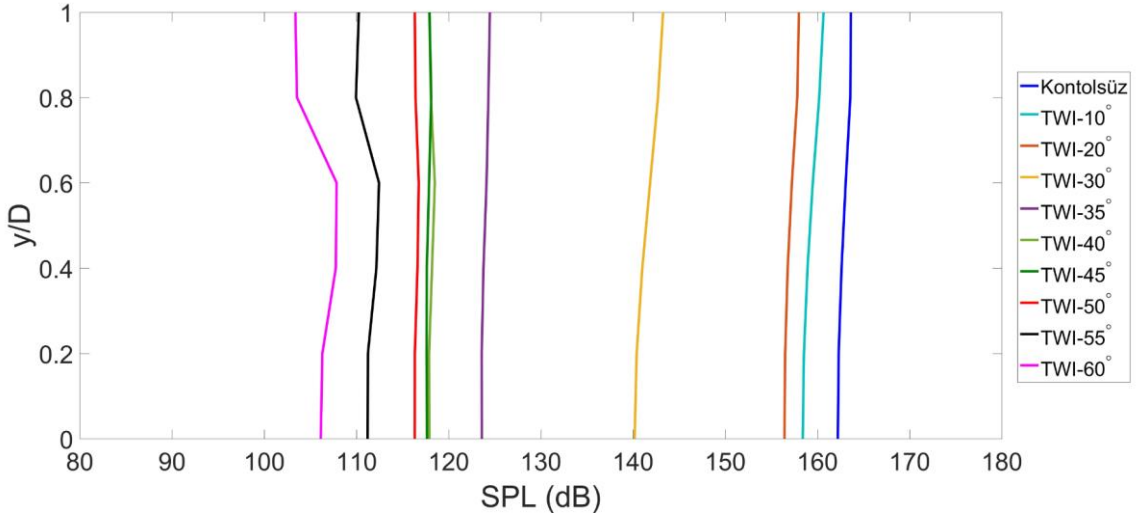
Kritik noktadan alınmış basınç verilerine FFT uygulanmış ve sonuçlar Şekil 4.5'teki güç spektrumunda gösterilmiştir. TWI-10° ve TWI-20° simülasyonlarında ilk iki modun güç değerleri kontrolsüz simülasyondakinden düşük olmakla birlikte üçüncül baskın mod oluşumlarına rastlanmaktadır. TWI-20° simülasyonunda kontrolsüz simülasyona göre daha düşük ikinci ve üçüncü mod frekansları görülmektedir. Basınç salınımlarının genliklerinin düşmesiyle birlikte diğer simülasyonlarda kontrolsüz simülasyon ile kıyaslanabilir ölçekte mod güçleri gözlenmemektedir. TWI-35° simülasyonundan itibaren eğim açısı arttıkça ilk mod frekansı oldukça düşmektedir ve kontrolsüz durumundakinin yarısına karşılık gelen frekans değerleri ile karşılaşmaktadır.

Arka duvar eğim açısının değiştirildiği simülasyonlarda ön duvar, alt duvar ve arka duvarda gözlemlenen ses basınç seviyeleri kontrolsüz simülasyon ile sırasıyla Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de kıyaslanmıştır.

Şekil 4.6'daki ön duvar boyunca gözlenen ses basınç seviyeleri incelendiğinde arka duvar eğim açısı arttıkça ses basınç seviyelerinin düştüğü görülmektedir. TWI-20° ile TWI-30° arasındaki ve TWI-30° ile TWI-35° arasındaki geçişlerde 15'er dB civarında ses basınç seviyesi düşüşü göze çarpmaktadır. TWI-40° ile TWI-60° arasındaki simülasyonlardaki ses basınç seviyeleri birbirine yakın olsa da en düşük değerler TWI-60° simülasyonunda elde edilmiştir.

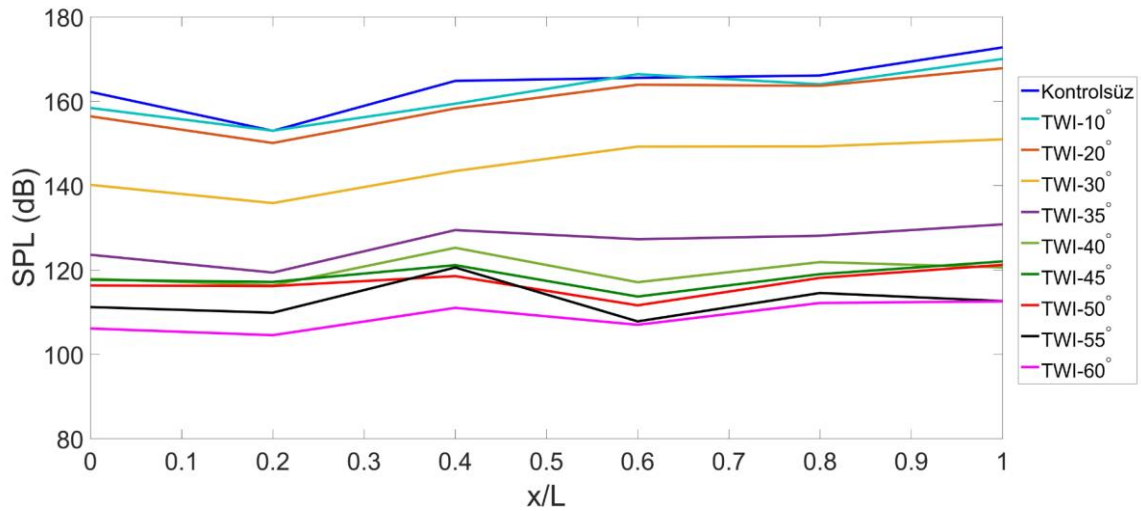


Şekil 4. 5 : TWI kritik nokta güç-frekans grafiği



Şekil 4. 6 : TWI ön duvar SPL-konum grafiği

Şekil 4.7'deki alt duvar ses dağılımı incelendiğinde kontrolsüz ve kontrollü simülasyonlarda farklı ses basınç seviyesi değerleri elde edilse de alt duvar boyunca ses basınç seviyesi dağılım davranışının benzer olduğu görülmektedir. TWI-10° ve TWI-20° simülasyonlarında kontrolsüz simülasyonlara oldukça yakın değerler gözlenmesine rağmen eğim açısı arttıkça alt duvarda gözlenen ses basınç seviyeleri düşmektedir. En düşük ses basınç seviyelerine TWI-60° simülasyonunda rastlanmaktadır.

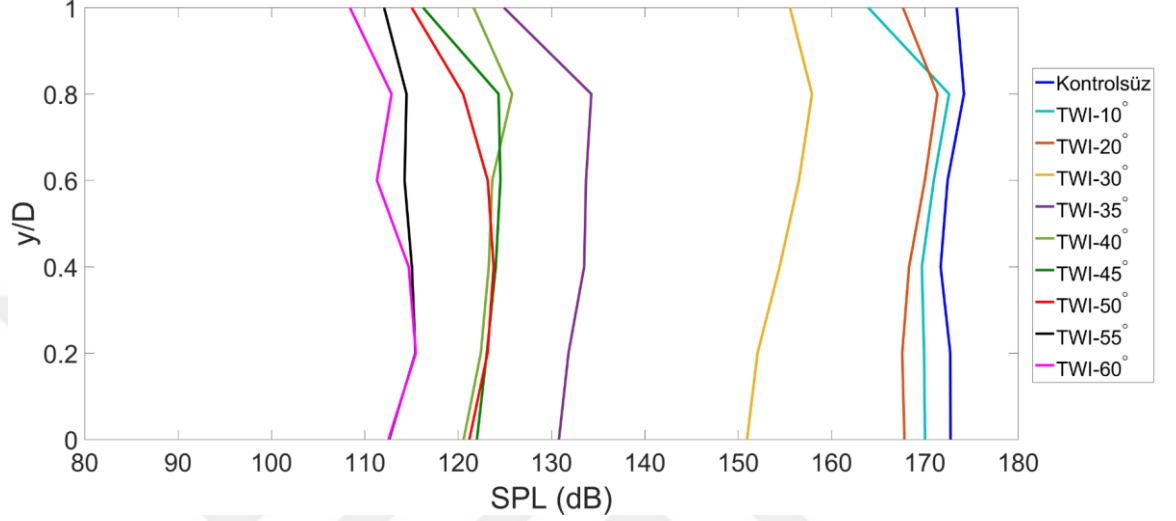


Şekil 4. 7 : TWI alt duvar SPL-konum grafiği

Şekil 4.8'deki grafiğe göre kontrollü simülasyonun arka duvardaki ses basınç seviyesi dağılım davranışının kontrollü simülasyonlarda korunduğu görülmektedir. TWI-30°



ile TWI-35° simülasyonları arasındaki ses basınç seviyesi farkının arka duvarda diğer duvarlara kıyasla daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. En düşük değerlere TWI-60° simülasyonunda rastlanırken TWI-55° simülasyonunda özellikle kavite alt duvarına doğru ilerledikçe elde edilen değerler TWI-60° simülasyonu değerlerine oldukça yaklaşmaktadır.



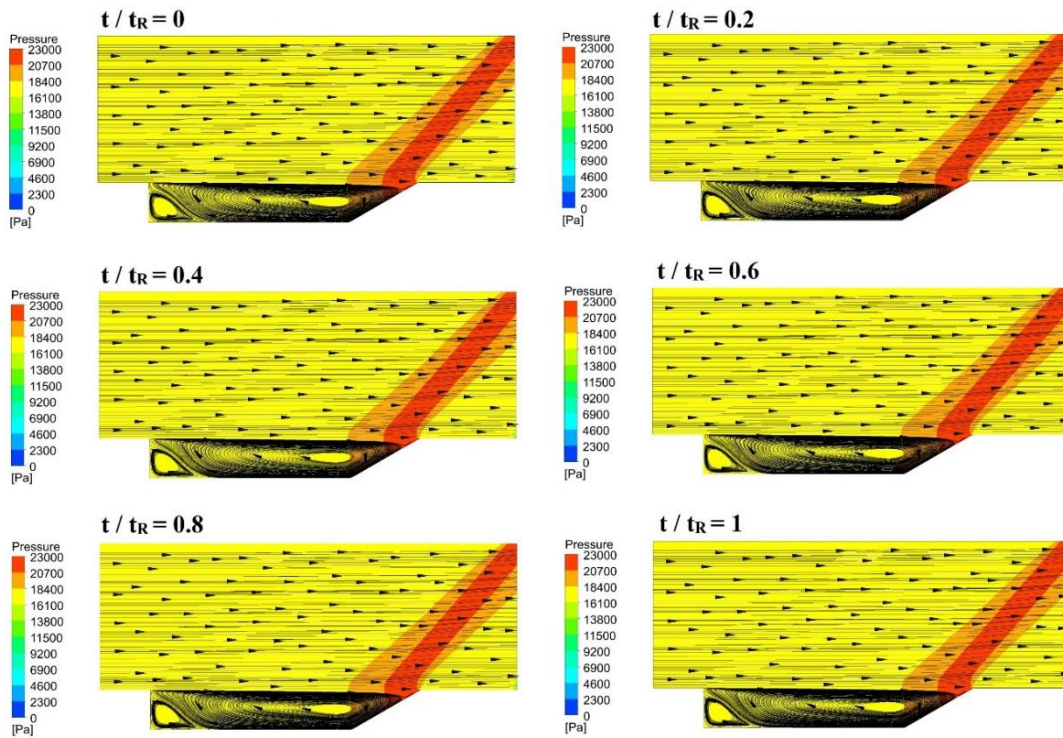
Şekil 4. 8 : TWI arka duvar SPL-konum grafiği

Basınç salınımlarındaki sönümlenme TWI-35°'den sonra kolayca ayırt edilemese de simülasyonlar arası fark ses basınç seviyelerinden anlaşılabilir. Her bir duvarda TWI-10° ve TWI-20° simülasyonlarına ait ses basınç seviyeleri kontrollü duruma oldukça yakındır ve aradaki fark 3-5 dB civarındadır. TWI-20°'den TWI-30°'a ve TWI-30°'dan TWI-35°'e geçişlerde her duvarda ani ses basınç seviyesi düşüşleri görülmektedir. Her üç duvar için en düşük ses basınç seviyeleri kontrolsüz durumla yaklaşık 50 dB fark ile TWI-60° simülasyonunda elde edilmiştir.

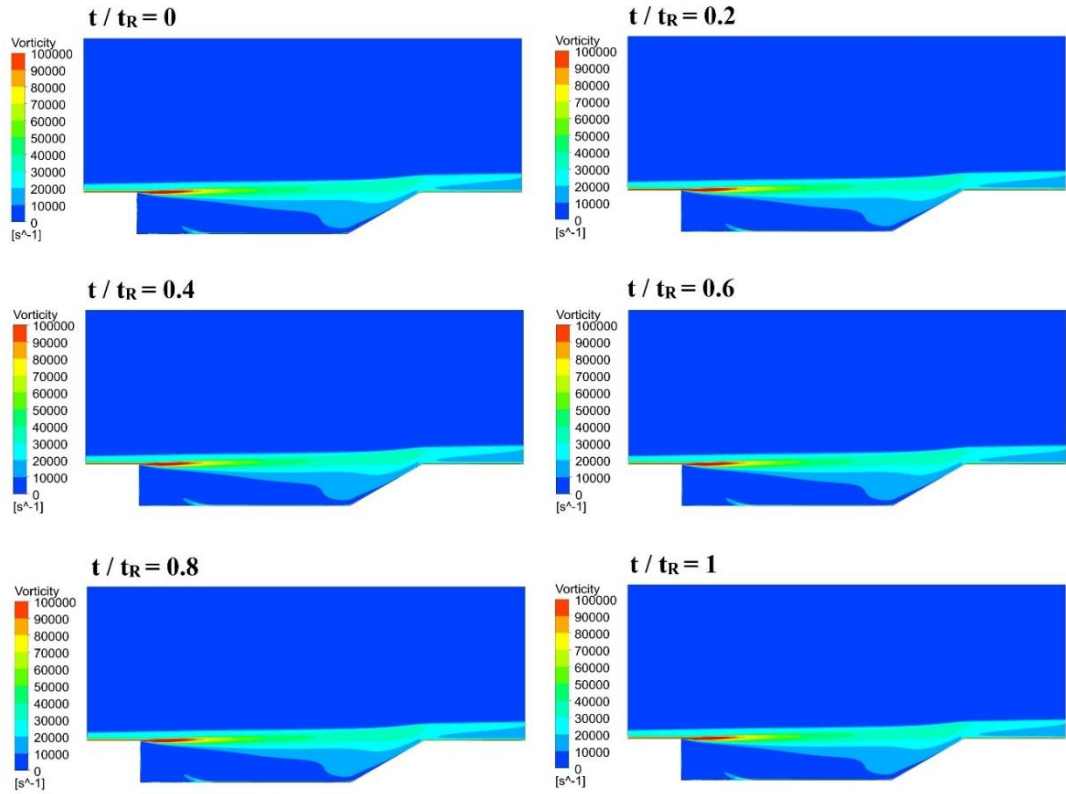
Arka duvara eğim verilen pasif kontrollü simülasyonlarda en iyi sonuçlar TWI-60° simülasyonunda elde edilmiştir. TWI-60° simülasyonundaki akışı incelemek amacıyla bir periyot için basınç dağılımı ve akım çizgileri çizdirilmiş ve Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Kontrolsüz simülasyona ait bir Rossiter periyodu dikkate alınmış ve kontrolsüz simülasyon ile aynı anlardaki durum incelenmiştir. Kontrolsüz simülasyonda 40000 Pa olan üst limit TWI-60° simülasyonunda 23000 Pa olarak belirlenmiş, bu sayede akış alanındaki değişimler daha net bir şekilde gözlenebilmiştir.

Kontrolsüz simülasyonda kavite girişinden, orta noktasından ve çıkışından yukarı doğru ilerleyen yüksek basınç dalgaları gözlenirken TWI-60° simülasyonunda sadece kavite çıkışında basınç yükselmesi görülmektedir. Bu basınç yükselmesi kontrolsüz duruma göre oldukça düşüktür. Akım çizgilerine bakıldığında kontrolsüz simülasyonda bir periyot boyunca kendini tekrar eden ve birbirini besleyen irili ufaklı girdap yapılarının TWI-60° simülasyonunda yerini kaviteyi uzunluk boyunca domine eden büyük bir girdap ve kavite ön ve alt duvarının kesişiminde oluşan küçük bir köşe girdabına bıraktığı görülmektedir. TWI-60° simülasyonundaki basınç dağılımı ve girdap yapıları bir periyodun farklı anlarında kaydedeğer biçimde değişiklik göstermemektedir.

TWI-60° simülasyonu akış alanında bir periyot boyunca değişen vortisite dağılımları Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Şekil 4.10 incelendiğinde kayma tabakasındaki salınımlı davranış sönümlendiği ve kavite çıkışında kayma tabakasında hafif bir kalınlaşma meydana geldiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4. 9 : TWI-60° simülasyonu akış alanında basınç dağılımı ve akım çizgileri



Şekil 4. 10 : TWI-60 simülasyonu akış alanında vortisite dağılımı

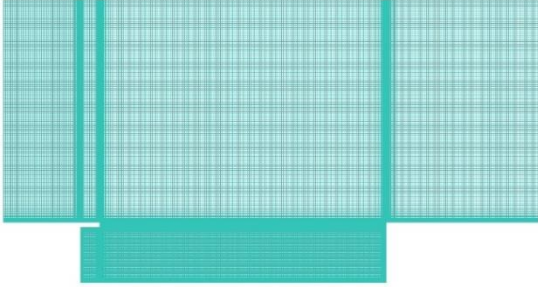
## 4.2 Kavite Girişine Plaka Ekleme Çalışmaları

Akışın girişte yönlendirilmesi için kavite girişine plaka ekleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan plakaların uzunluğu 2 mm'dir. Kavite uzunluğu (L) baz alınarak oluşturulan plaka uzunlukları  $L_{CP} = L/16, L/8, 3L/16, L/4$  şeklinde olup simülasyonlar sırasıyla CP-L/16, CP-L/8, CP-3L/16 ve CP-L/4 şeklinde adlandırılmıştır. Simülasyonlarda kullanılan ağ yapılarına ait özellikler Çizelge 4.2'de verilmiştir. Ağ yapılarının birlikte gösterimi Şekil 4.11'de verilmiştir. Girişe eklenen plaka etrafında ağ yapısı sıkılaştırılmış ve buna örnek olarak CP-L/4 için plaka etrafındaki sıkılaştırılmış ağ yapısı Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Simülasyonlarda zaman adımı olarak  $10^{-6}$  saniye kullanılmıştır.

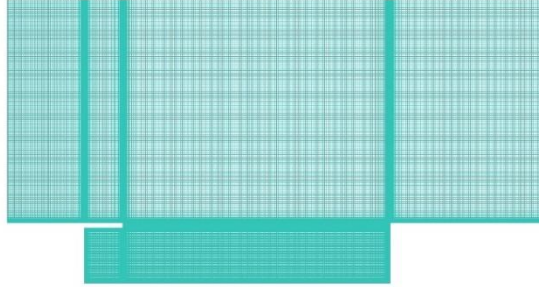
Çizelge 4. 2 : Kavite Girişine Plaka Eklenen Geometrilere Ağ Yapısı Özellikleri

Adlandırma	Plaka Uzunluğu	Eleman Sayısı	İlk Hücre Yüksekliği	Hücre Büyüme Oranı	Boyut Oranı	Eriksson Çarpıklığı	Kalite
Kontrolsüz	-	67,077	$5 \times 10^{-5}$	1.13	16.1	1	1
CP-L/16	L/16	77,183	$5 \times 10^{-5}$	1.13	16.1	1	1
CPL-L/8	L/8	77,563	$5 \times 10^{-5}$	1.13	16.1	1	1
CP-3L/16	3L/16	78,088	$5 \times 10^{-5}$	1.13	16.1	1	1
CP-L/4	L/4	79,183	$5 \times 10^{-5}$	1.13	16.1	1	1

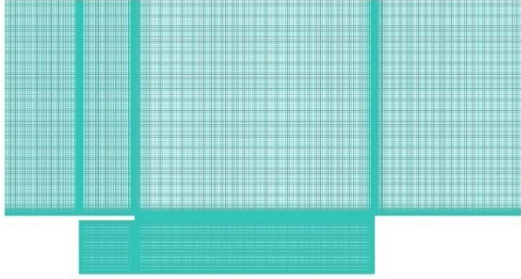
CP-L/16



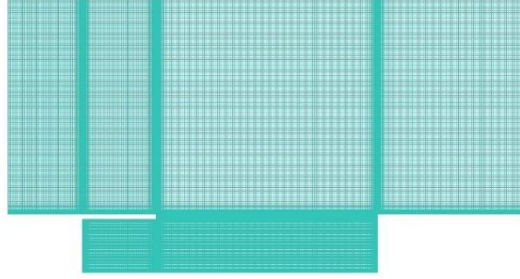
CP-L/8



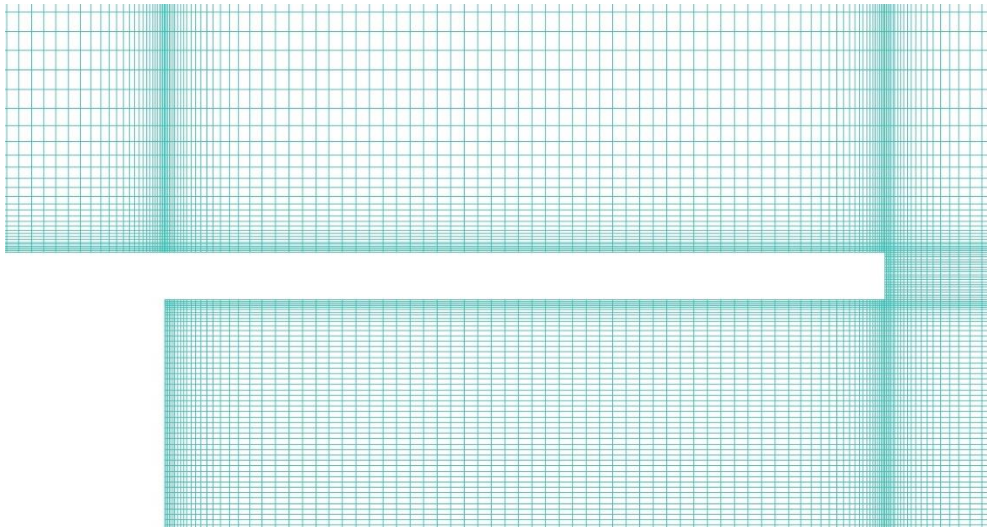
CP-3L/16



CP-L/4

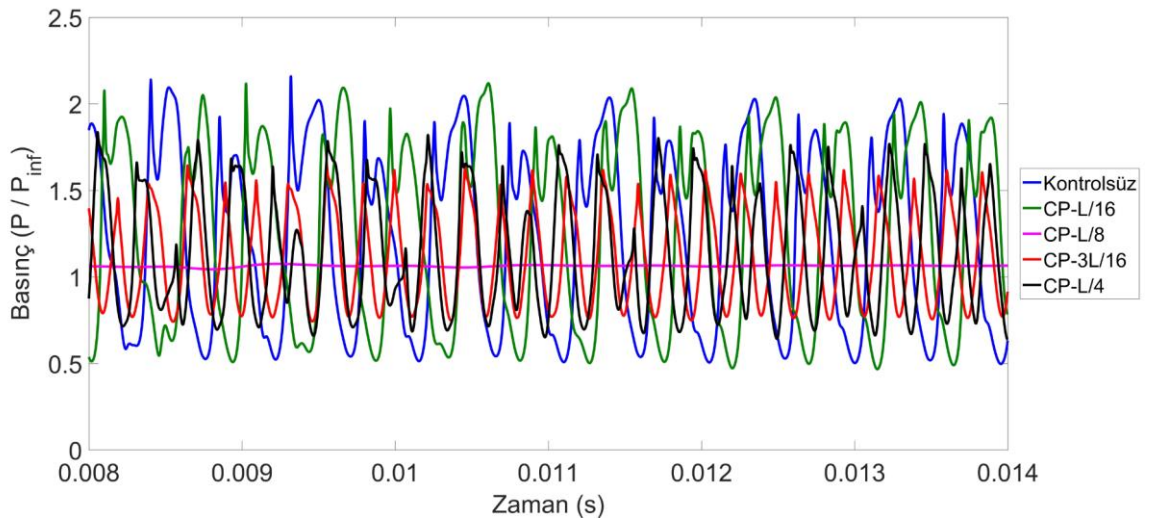


Şekil 4. 11 : Kavite girişine plaka eklenen çalışmalarda ağ yapıları



Şekil 4. 12 : CP-L/4 ağ yapısının plaka etrafındaki yakın görünümü

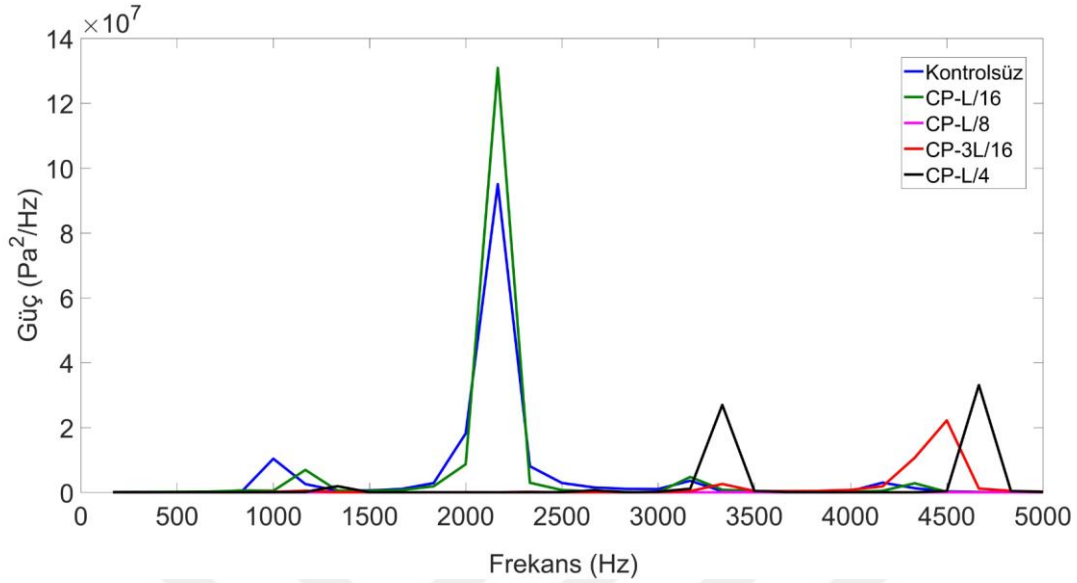
Kavite girişine plaka eklenen kontrollü simülasyonlarda arka duvardaki kritik noktadan alınan basınç verileri Şekil 4.13'te kontrolsüz simülasyon basınç verileri ile kıyaslanmıştır. CP-L/8 dışındaki simülasyonlarda periyodik davranış korunmaktadır. CP-L/16 simülasyonundaki basınç salınımı kontrolsüz simülasyona oldukça benzese de kontrolsüz simülasyondakinden daha yüksek genliklerin elde edildiği anlar göze çarpmaktadır. Periyodik davranışın korunduğu diğer simülasyonlar olan CP-3L/16 ve CP-L/4'te ise kontrolsüz simülasyona kıyasla daha düşük basınç genlikleri elde edilmektedir. CP-L/8'de diğer simülasyonlardan farklı olarak basınç salınımlarının oldukça sönümlendiği gözlenmektedir.



Şekil 4. 13 : CP kritik nokta için basınç-zaman grafiği

Kritik noktadan elde edilen basınç verilerine FFT uygulanarak elde edilen güç spektrumu Şekil 4.14'te verilmiştir. Basınç grafiğinde kontrolsüz simülasyondan yer yer yüksek çıkan basınç genlikleriyle uyumlu olarak CP-L/16 simülasyonunda ikinci modun gücü kontrolsüz simülasyondakine kıyasla yüksektir. CP-L/16 simülasyonundaki ikinci ve üç moda karşılık gelen frekans değerleri kontrolsüz simülasyon frekanslarına oldukça yakın iken ilk mod frekansı kontrolsüz simülasyona az da olsa yüksektir. CP-3L/16 ve CP-L/4 simülasyonlarında ilk mod frekans değerlerinin kontrolsüz simülasyondakine göre arttığı anlaşılmıştır. CP-L/4 simülasyonunda üçüncü ve dördüncü modların güçlerinin diğer modlara göre yüksektir. Salınımların oldukça sönümlendiği CP-L/8 simülasyonunda kontrollü simülasyon ile kıyaslanabilecek güçte modlara rastlanmamakla birlikte ilk iki moda

kaşılık gelen frekans değerleri kontrolsüz durumdaki değerlerin yaklaşık yarısına karşılık gelmektedir.

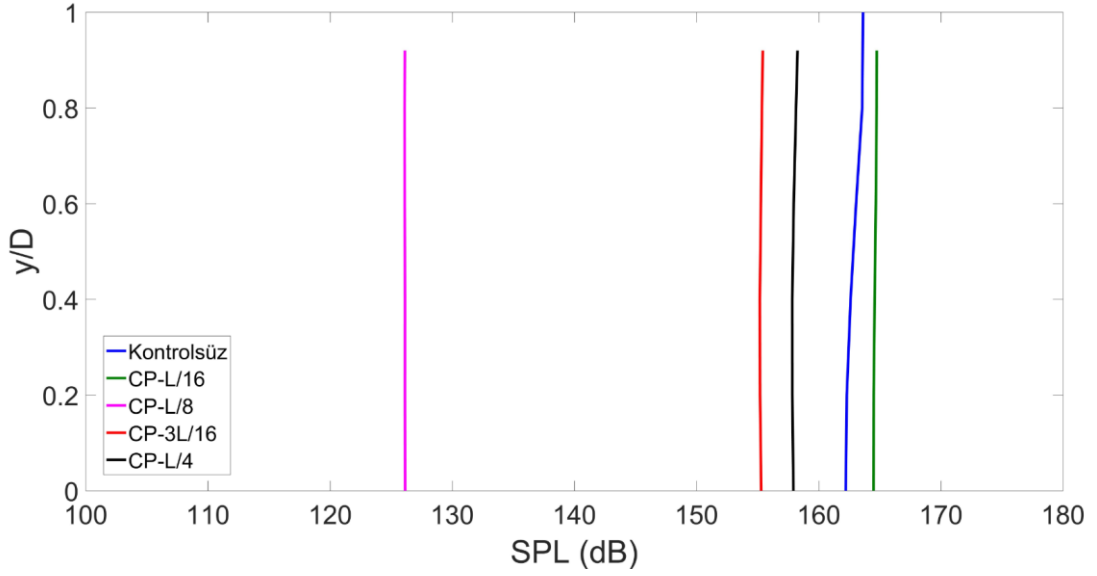


Şekil 4. 14 : CP kritik nokta güç-frekans grafiği

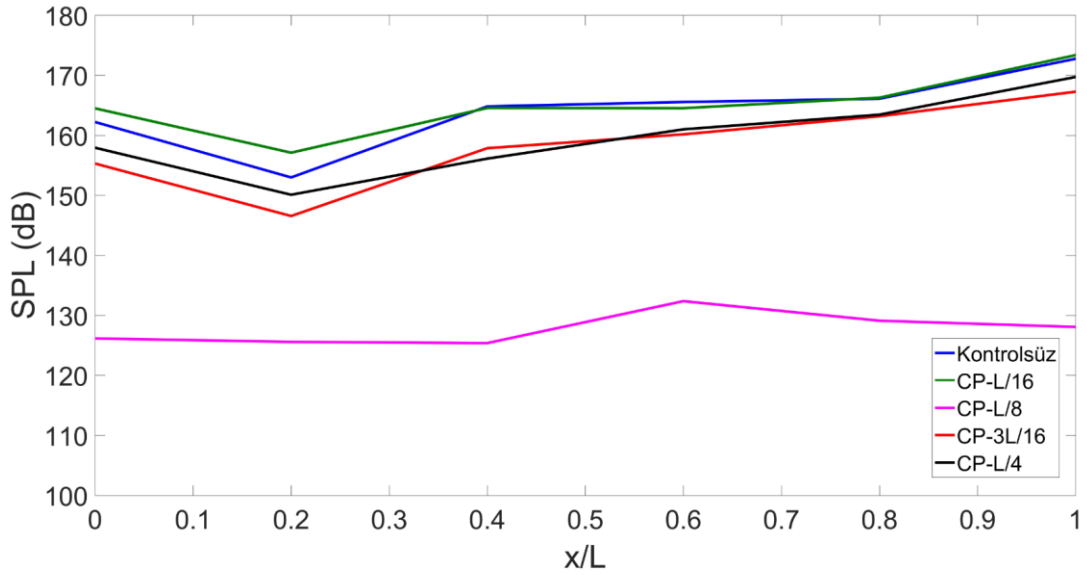
Kavite girişine plaka eklenen simülasyonlar için ön duvar, alt duvar ve arka duvar boyunca gözlemlenen ses basınç seviyeleri Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de sırasıyla çizdirilmiştir.

Şekil 4.15 incelendiğinde ön duvarda en düşük SPL değerlerinin elde edildiği simülasyonun CP-L/8 olduğu anlaşılmaktadır. CP-L/16 simülasyonunda kontrolsüz simülasyondan 1-2 dB daha yüksek ses basınç seviyeleri görülmektedir. CP-3L/16 ve CP-L/4 simülasyonlarında kontrolsüz simülasyona göre 3-5 dB daha düşük değerler elde edilmektedir.

Şekil 4.16'ya bakılarak CP-L/8 dışındaki simülasyonlarda alt duvar boyunca ses basınç seviyesi dağılımlarının kontrolsüz simülasyon ile benzer olduğu anlaşılmaktadır. 30-35 dB düşüşün elde edildiği CP-L/8 simülasyonunun ses basınç seviyesi dağılımı diğer simülasyonlardan farklıdır. CP-L/16 simülasyonunda alt duvarın ön duvara yakın kısımlarında kontrolsüz simülasyondakinden daha yüksek ses basınç seviyeleri elde edilmektedir. CP-3L/16 ve CP-L/4 simülasyonlarında kontrolsüz duruma göre 5-6 dB düşüş gözlenmektedir.

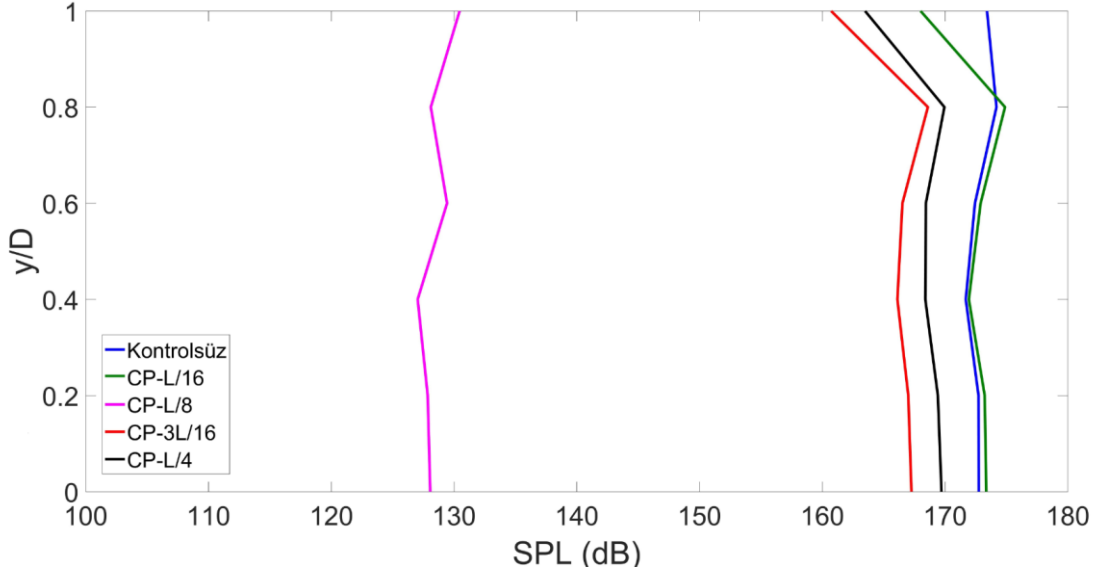


Şekil 4. 15 : CP ön duvar SPL-konum grafiği



Şekil 4. 16 : CP alt duvar SPL-konum grafiği

Şekil 4.17'deki arka duvar ses basınç seviyesi dağılımlarına göre CP-L/8 hariç diğer simülasyonlarda kontrolsüz simülasyonla benzer bir SPL dağılım davranışı gözlenmektedir. CP-L/8 simülasyonda SPL düşüşü 40-45 dB civarındadır. CP-L/16 simülasyonu değerleri kontrolsüz simülasyon değerlerine oldukça yakın olmakla birlikte arka duvarın en üst noktasında kontrolsüz simülasyondan daha düşüktür. CP-3L/16 ve CP-L/4 simülasyonlarında kontrolsüz duruma göre 4-5 dB düşüş gözlenmektedir.

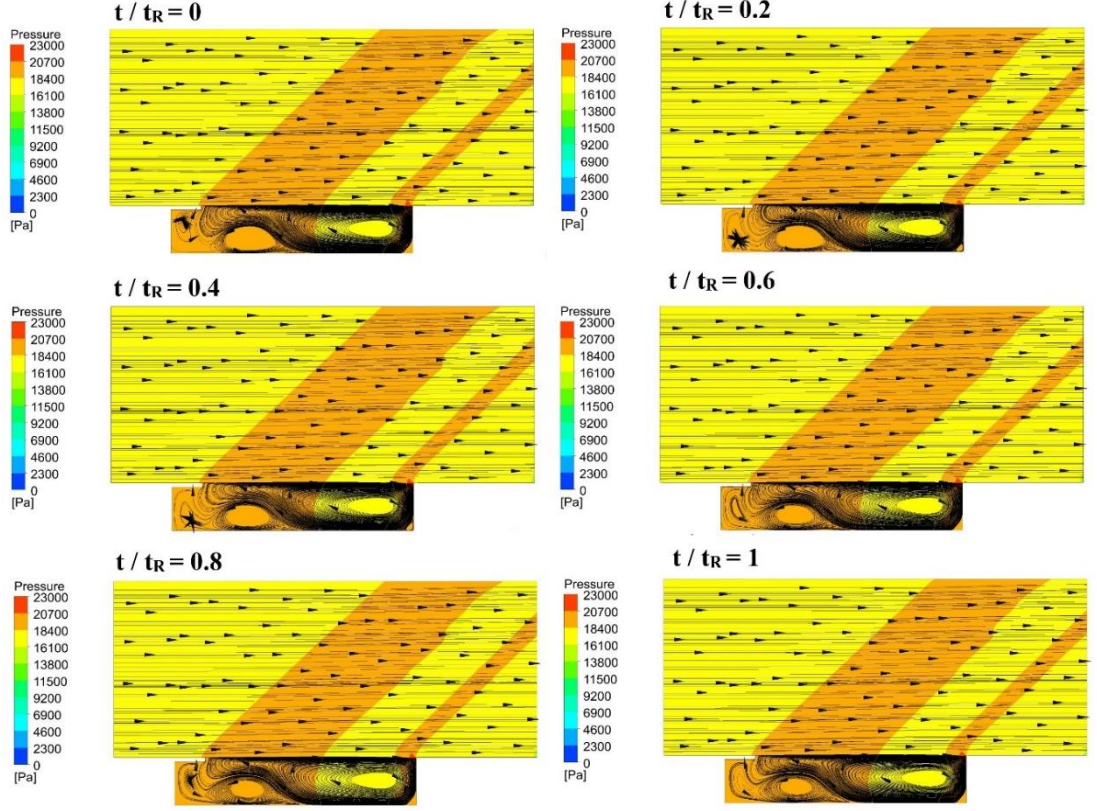


Şekil 4. 17 : CP arka duvar SPL-konum grafiği

Her bir kavite duvarındaki ses basınç seviyeleri değerlendirildiğinde CP-L/8 dışındaki tüm kontrollü simülasyonlarda kontrolsüz simülasyona benzer SPL dağılım davranışları olduğu anlaşılmaktadır. Plaka uzunluğu arttıkça SPL değerlerinin arttığı ve azaldığı simülasyonlar vardır. Bu sebeple girişe eklenen plakanın uzunluğu ile ilgili bir korelasyon belirlenememiştir.

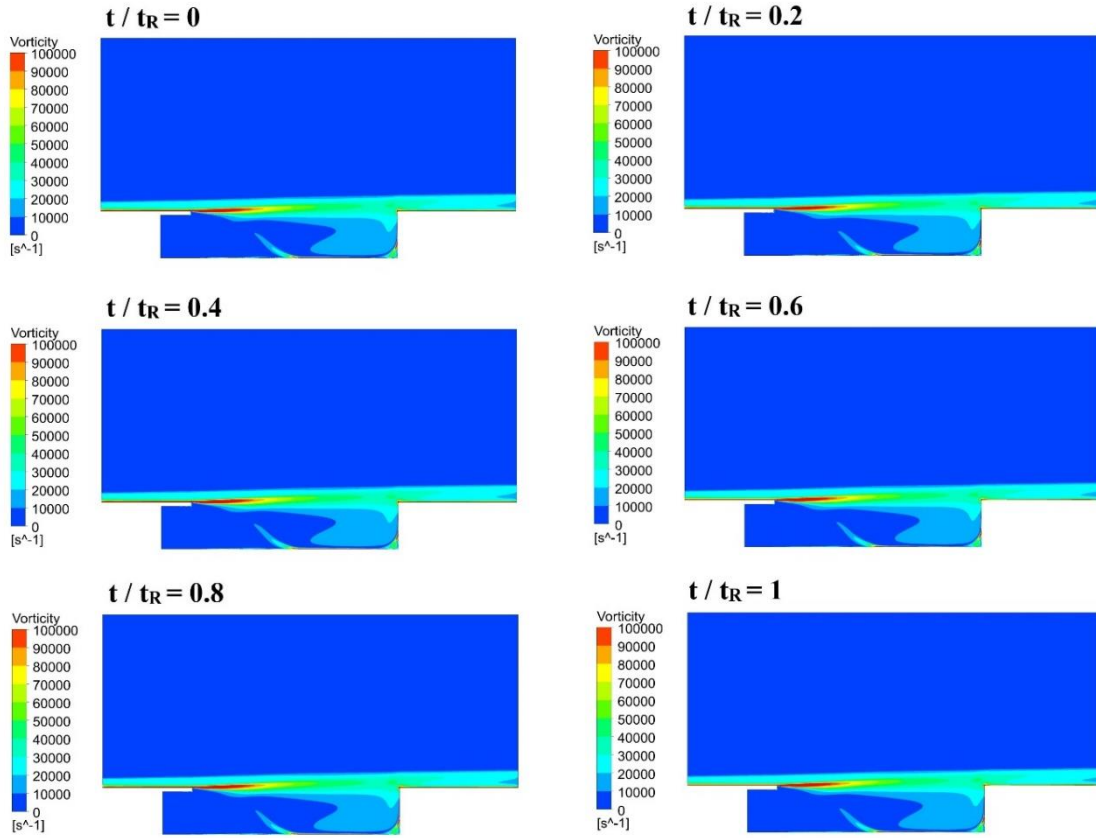
Diğerlerinden oldukça farklı sonuçlara rastlanan ve yüksek basınç düşüşlerinin elde edildiği CP-L/8 simülasyonu kavite girişine plaka eklenen pasif kontrollü simülasyonlar arasındaki en iyi simülasyon olarak seçilmiştir. CP-L/8 simülasyonunda 1 periyot için basınç dağılımı ve akım çizgileri Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Basınç değerleri oldukça düştüğü için üst limit 23000 Pa olarak belirlenerek akış alanındaki değişimler yakalanmaya çalışılmıştır. Akış alanındaki en yüksek basınç değeri kontrolsüz simülasyondaki en yüksek değer yarısı mertebesindeindedir. Kontrolsüz simülasyonda olduğu gibi arka duvarın üst kısmında yüksek basınç değerleri görülmektedir. Ek olarak plakanın bitiminden itibaren yukarı doğru ve akış yönünde gelişmiş yüksek basınçlı geniş bir alana rastlanmaktadır. Akım çizgileri incelendiğinde kavite içinde üç farklı girdap yapısının olduğu görülmektedir. Kavitenin büyük kısmını domine eden en büyük girdabın altında, ön duvara yakın kısımda ikincil bir girdap oluşmaktadır. Bu iki girdaba ek olarak plakanın altında ön duvar çevresinde oluşan daha küçük bir girdap oluşumu da bulunmaktadır. Bu üç girdaplı yapı kavite içine hapsolmuş durumdadır ve periyot boyunca belirgin değişimler gözlemlenmemektedir.





Şekil 4. 18 : CP-L/8 simülasyonu akış alanında basınç dağılımı ve akım çizgileri

CP-L/8 simülasyonunda kayma tabakası değişimi ve girdap yapılarını daha detaylı olarak incelemek adına bir periyot için vortisite dağılımları Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Kayma tabakasında incelleme gözlenirken, kayma tabakasının salınımlı yapısının kaybolduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4. 19 : CP-L/8 simülasyonu akış alanında vortisite dağılımı

### 4.3 Kavite Duvarlarına Engel Ekleme Çalışmaları

Kavite girişine ve duvarlarına engeller konumlandırılıp bu engellerin akış karakteristikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Kullanılan engellerin boyutu “2 mm x 2 mm” şeklindedir. Simülasyon isimleri kullanılan engellere göre verilmiştir ve Çizelge 4.3’te gösterilmiştir.

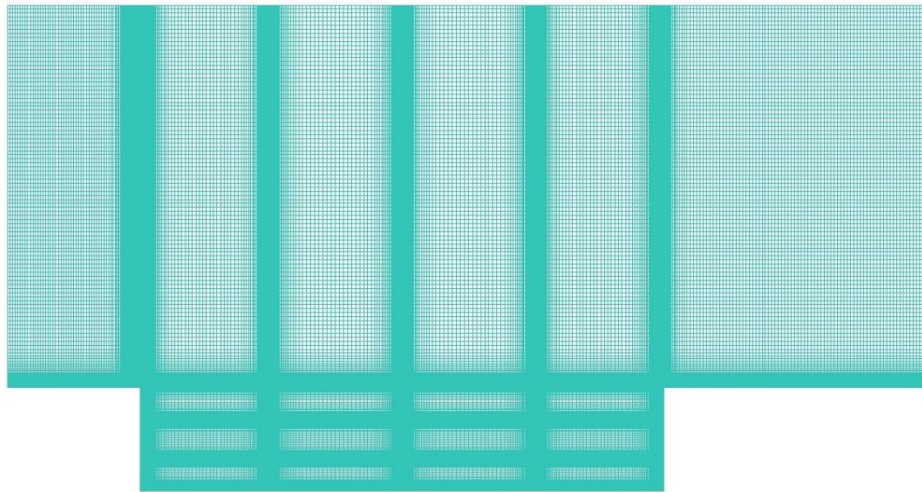
Çizelge 4. 3 : Kavite Duvarlarına Engel Ekleme Simülasyonları

Adlandırma	Kavite Girişi	Ön Duvar	Alt Duvar	Arka Duvar
Kontrolsüz	-	-	-	-
WS-1	1 engel	-	-	-
WS-2	-	2 engel	-	-
WS-3	-	-	-	2 engel
WS-4	-	-	3 engel	-
WS-234	-	2 engel	3 engel	2 engel
WS-1234	1 engel	2 engel	3 engel	2 engel

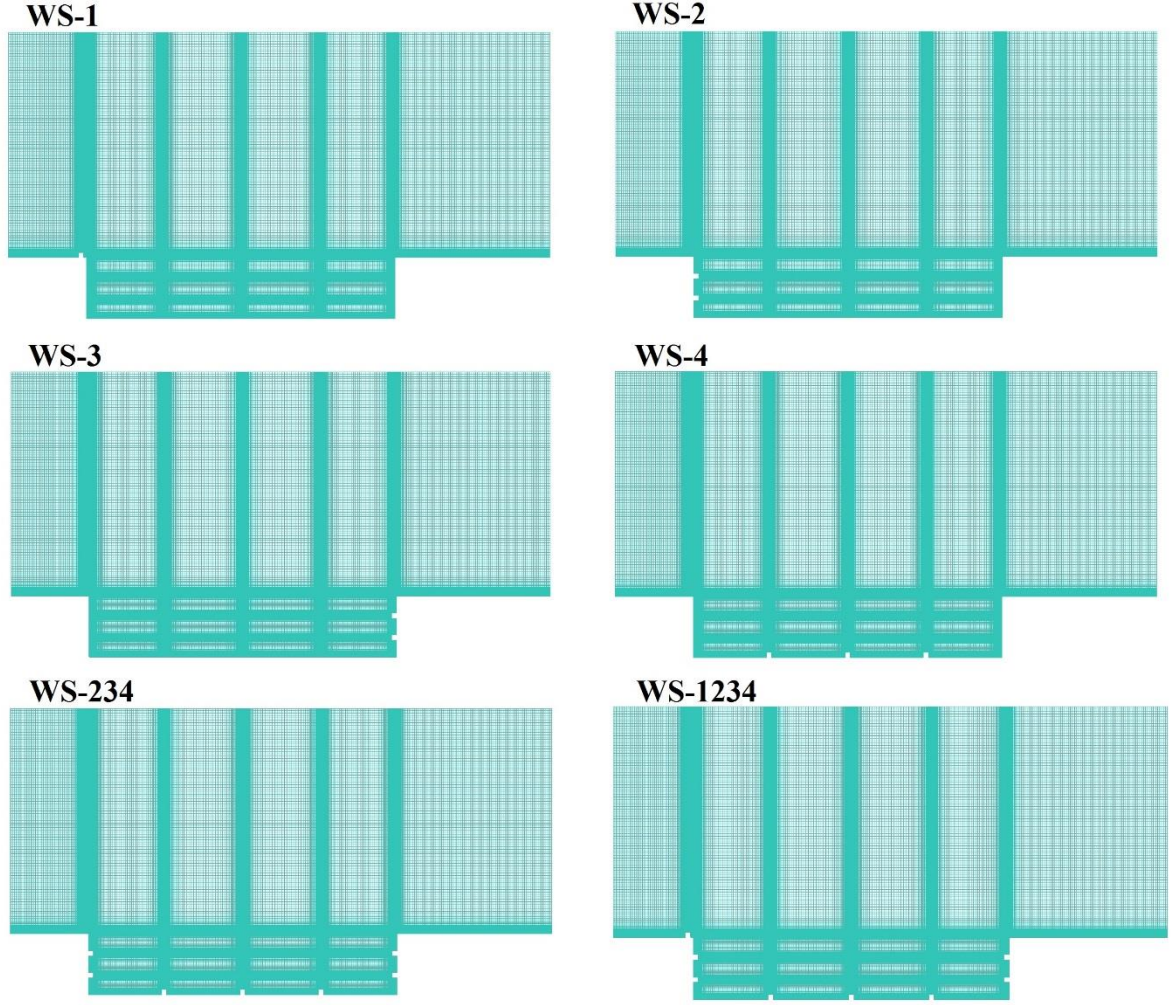
Kavite duvarlarına engel eklenen geometrilerde engellerin etrafında ağ yapısı sıkılaştırılmış ve engellerin her bir yüzeyinde 20 hücre konumlandırılmıştır. Kıyaslamaların doğru bir şekilde yapılabilmesi için kontrolsüz simülasyonun ağ yapısında da düzenleme yapılmış ve delik konumlarına denk gelecek yerlerde ağ yapısı sıkılaştırılmıştır. Kontrolsüz simülasyon ve kontrollü WS simülasyonlarında kullanılan ağ yapısı özellikleri Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Kontrolsüz simülasyonun düzenlenmiş ağ yapısı Şekil 4.20'de, kavite duvarlarına engel eklenmiş geometrilerdeki ağ yapıları Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Ağ yapısındaki sıkılaştırmaya örnek olması için kavite girişindeki engelin etrafındaki ağ yapısının yakın gösterimi Şekil 4.22'de verilmiştir. Simülasyonlarda zaman adımı olarak  $5 \times 10^{-7}$  saniye kullanılmıştır.

Çizelge 4. 4 : Kavite Duvarlarına Engel Eklenen Geometrilerde Ağ Yapısı Özellikleri

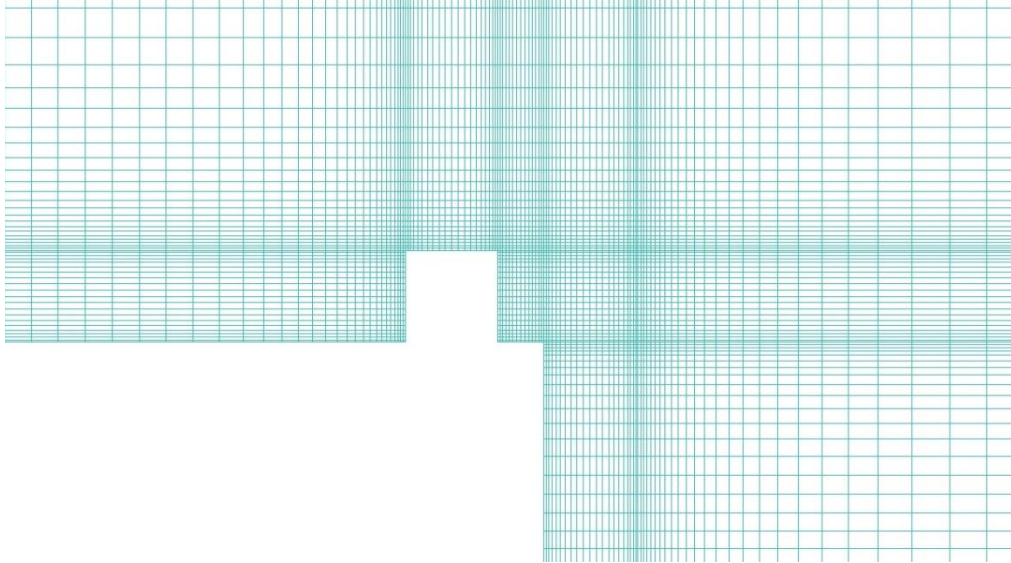
Adlandırma	Eleman Sayısı	İlk Hücre Yüksekliği	Hücre Büyüme Oranı	Boyut Oranı	Eriksson Çarpıklığı	Kalite
Kontrolsüz	127,896	$5 \times 10^{-5}$	1.13	18.8	1	1
WS-1	127,480	$5 \times 10^{-5}$	1.13	18.8	1	1
WS-2	127,060	$5 \times 10^{-5}$	1.13	18.8	1	1
WS-3	127,060	$5 \times 10^{-5}$	1.13	18.8	1	1
WS-4	126,642	$5 \times 10^{-5}$	1.13	18.8	1	1
WS-234	124,970	$5 \times 10^{-5}$	1.13	18.8	1	1
WS-1234	124,552	$5 \times 10^{-5}$	1.13	18.8	1	1



Şekil 4. 20 : WS çalışması için kontrolsüz simülasyon ağ yapısı

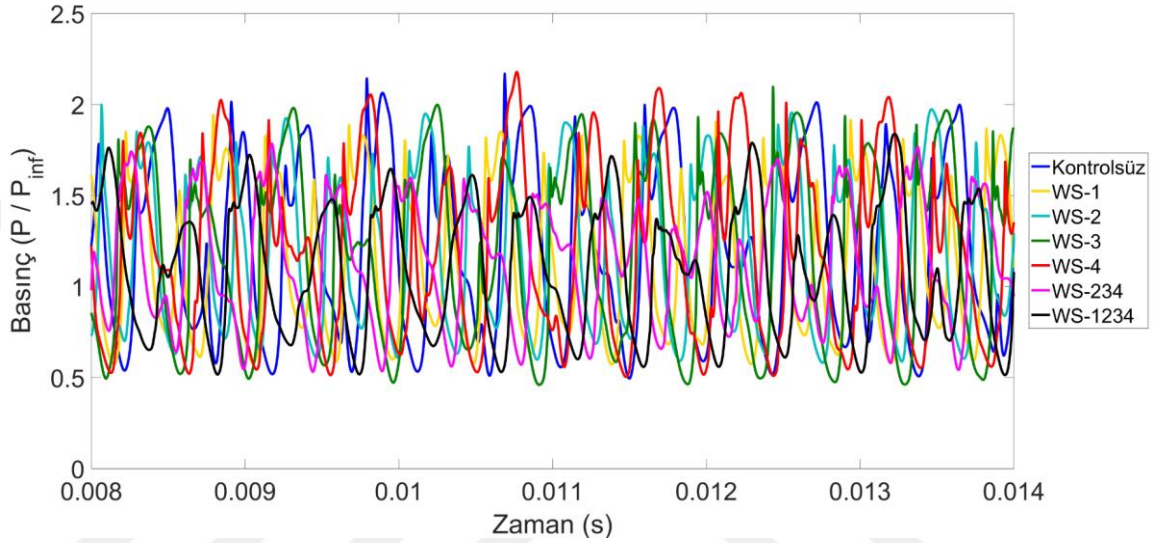


Şekil 4. 21 : Kavite duvarlarına engel eklenmiş geometrilerde ağ yapıları



Şekil 4. 22 : Kavite girişindeki engelin etrafındaki ağ yapısı

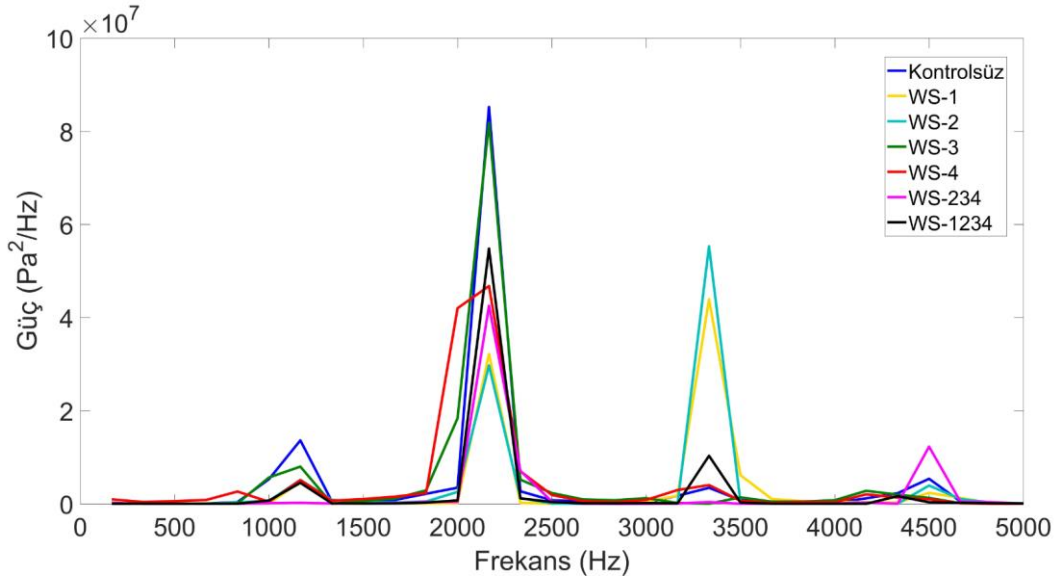
Kavite duvarlarına engel eklenen simülasyonlar için arka duvar üzerindeki kritik noktadan elde edilen zamana bağlı basınç verileri Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Alt duvara konumlandırılmış engellerin bulunduğu WS-4 simülasyonunda kontrolsüz simülasyondakilerden yüksek genliklerin gözleendiği anlar bulunmaktadır. WS-1, WS-2 ve WS-3 simülasyonlarında kontrolsüz simülasyondan daha düşük genliklere rastlansa da en düşük genlikli salınımlar WS-234 ve WS-1234 simülasyonlarında gözlenmektedir.



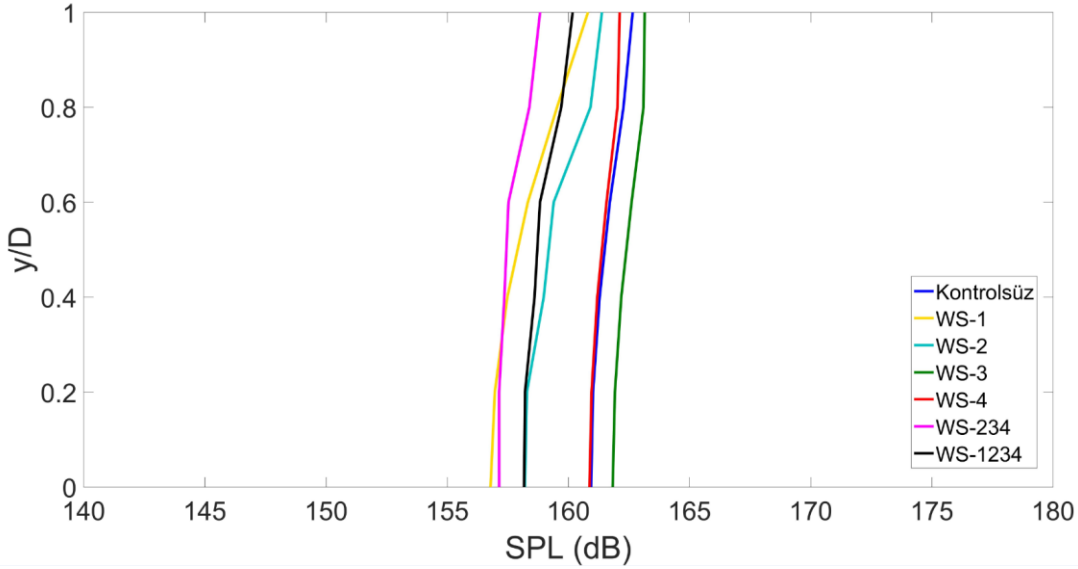
Şekil 4. 23 : WS kritik nokta basınç-zaman grafiği

Kritik nokta basınç verilerine FFT uygulanarak elde edilen güç spektrumu grafiği Şekil 4.24'te verilmiştir. İlk iki moda karşılık gelen frekans değerleri kontrollü ve kontrolsüz simülasyonlar için yakın olmakla birlikte WS-4 simülasyonunda ilk modun frekansında az da olsa düşme göze çarpmaktadır. WS-3 simülasyonda ikinci modun gücü kontrolsüz simülasyona oldukça yakinken diğer kontrollü simülasyonlarda ikinci modun gücünde düşüş gözlenmektedir. WS-1 ve WS-2 simülasyonlarında 3300 Hz civarında güçlü üçüncül mod oluşumları göze çarpmaktadır. WS-234 simülasyonunda dördüncü modun gücü diğer modlara göre yüksektir.

Kavite duvarlarına engel konumlandırılan simülasyonlar için ön, alt ve arka duvarlar boyunca gözlenen ses basınç seviyeleri sırasıyla Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de gösterilmiştir.

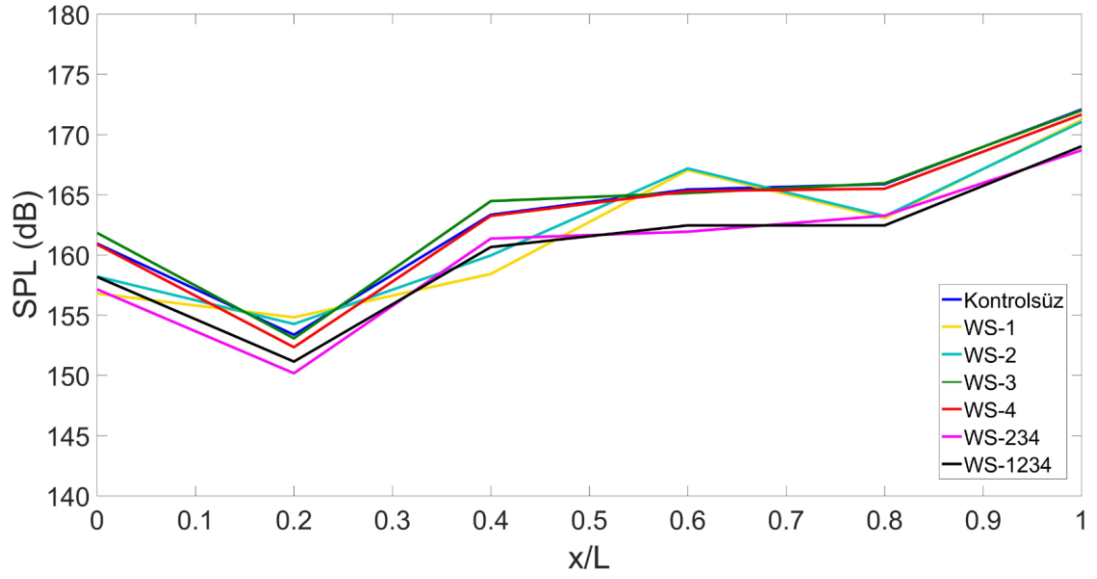


Şekil 4. 24 : WS kritik nokta için güç-frekans grafiği



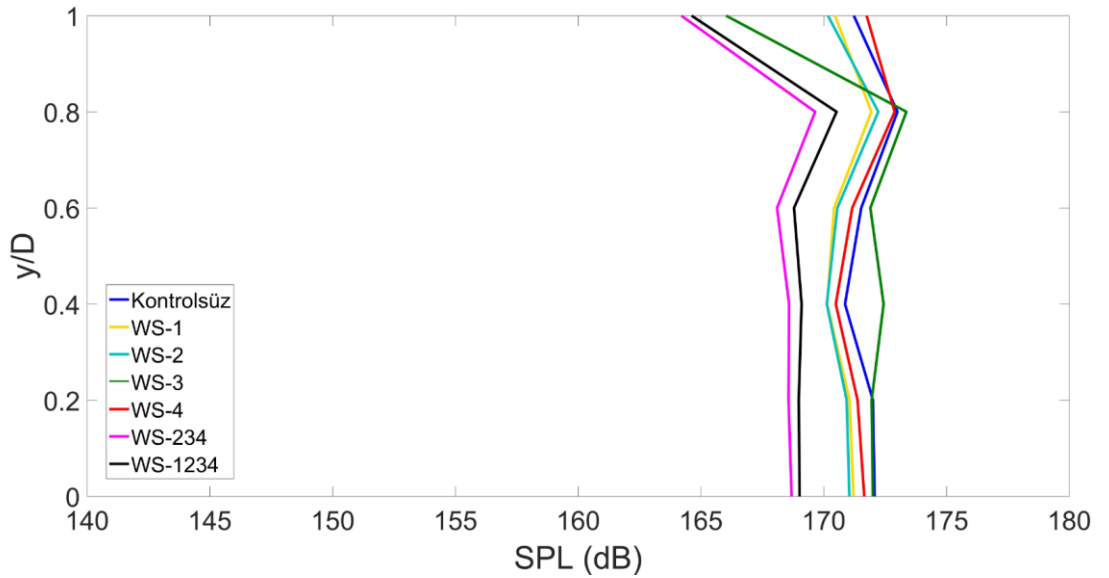
Şekil 4. 25 : WS ön duvar SPL-konum grafiği

Şekil 4.26'daki alt duvar ses basınç dağılımı grafiğine göre WS-1 ve WS-2 dışındaki kontrollü simülasyonlardaki ses basınç seviyesi dağılım davranışı kontrolsüz simülasyona oldukça benzemektedir. WS-234 ve WS-1234 simülasyonlarından elde edilen ses basınç seviyeleri birbirine çok yakın olup, kontrolsüz duruma göre 4-5 dB fark ile en düşük ses basınç seviyeleri bu iki simülasyonda gözlenmektedir. WS-3 ve WS-4 simülasyonlarında kontrolsüz durumdaki oldukça yakın değerler elde edilmektedir.



Şekil 4. 26 : WS alt duvar SPL-konum grafiği

Şekil 4.27'deki arka duvar ses basınç seviyeleri incelendiğinde WS-3 simülasyonundaki dağılımın diğerlerine göre farklı olduğu göze çarpmaktadır. WS-4 simülasyonu sonuçları kontrolsüz duruma oldukça yakındır. WS-1 ve WS-2 simülasyonunda kontrolsüz durumdan yaklaşık 2 dB daha düşük değerler gözlenmektedir. En düşük ses basınç seviyeleri WS-234 ve WS-1234 simülasyonlarından elde edilmektedir. Bu simülasyonlarda kontrolsüz simülasyona göre 4-6 dB ses basınç seviyesi düşümü görülmektedir.



Şekil 4. 27 : WS arka duvar SPL-konum grafiği

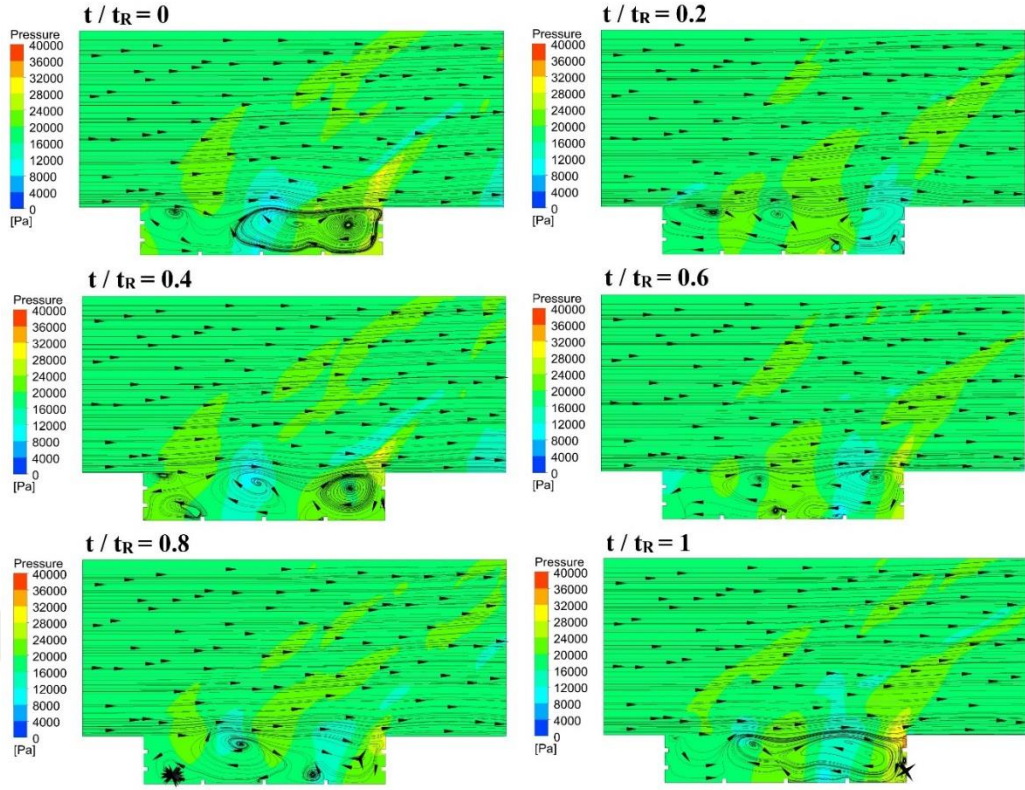
Her bir kavite duvarından elde edilen ses basınç seviyeleri değerlendirildiğinde en yüksek ses basınç seviyesi düşüşleri WS-234 ve WS-1234 simülasyonlarında elde edilmektedir. Bu iki simülasyon için ses basınç seviyesi düşümleri 4-6 dB civarındadır. WS-3 simülasyonunda her bir duvarda kontrolsüz simülasyona göre 1-2 dB artış kaydedilmektedir. Kayma tabakasının arka duvarla etkileşimi sebebiyle bu duvarda konumlandırılan engellerin daha az etkili sonuçlar vermesi anlamlıdır.

En iyi sonuçlar WS-234 ve WS-1234 simülasyonlarından elde edilmiştir. Sonuçlar birbirine çok yakın olsa da WS-234 ses basınç seviyesi düşürümünde daha etkilidir. Ek olarak daha az sayıda engel konumlandırması içerdiği için WS-234'ün en iyi simülasyon seçilmesi uygun bulunmuştur.

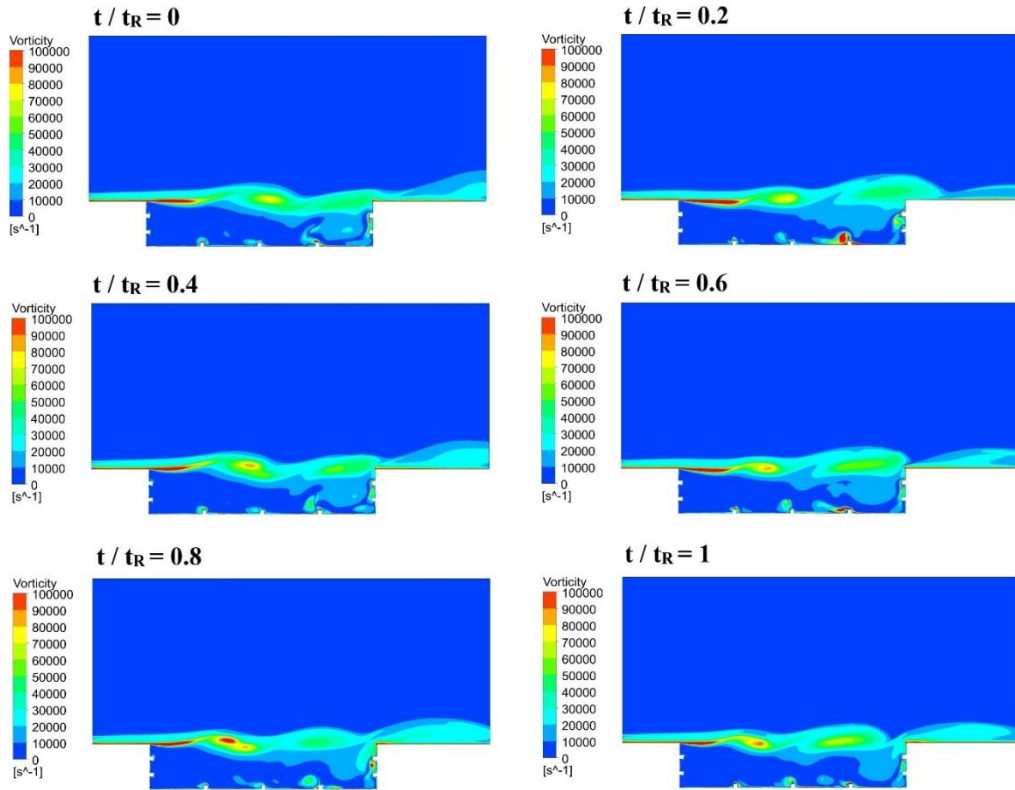
WS-234 simülasyonunun bir periyot için basınç dağılımı ve akım çizgileri Şekil 4.28'de verilmiştir. Kontrolsüz simülasyonda olduğu gibi WS-234 simülasyonunda da yüksek basınç dalgaları ve arka duvar üzerinde yüksek basınç seviyeleri gözlenmektedir. Akım çizgileri incelendiğinde engeller etrafında küçük yapılı girdap oluşumları görülmektedir. Kavite duvarlarına engeller konumlandırılarak kontrolsüz simülasyondaki periyodik girdap yapılarının değiştirilebildiği anlaşılmıştır. Büyük girdap yapıları oluşumuna kontrollü simülasyonda (WS-234) da rastlansa da girdapların biçimlerinde değişiklikler ve küçük girdap sayısında artış meydana gelmiştir.

WS-234 simülasyonu akış alanında bir periyot boyunca değişen vortisite dağılımları Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Kavite duvarlarına engeller eklendiğinde kavite içi girdap yapılarında ve dolayısı ile kayma tabakasının salınım davranışında değişim meydana geldiği anlaşılmıştır. Kavite duvarlarına konumlandırılan engeller etrafında oluşan küçük yapılı girdaplar vortisite dağılımında daha net bir biçimde görülmektedir.





Şekil 4. 28 : WS-234 simülasyonu akış alanında basınç dağılımı ve akım çizgileri



Şekil 4. 29 : WS-234 akış alanında vortisite dağılımı

#### 4.4 Pasif Kontrol Yöntemleri Hakkında Yorumlar

Kavite akışının pasif yöntemlerle kontrolü amacıyla kavite geometrisine kalıcı değişiklikler uygulanıp, bunların akışa etkisi araştırılmıştır. Uygulanan yöntemler kavite arka duvarına eğim verme, kavite girişine plaka ekleme ve kavite duvarlarına engel ekleme çalışmalarıdır.

Kavite arka duvarına eğim verme çalışmasında kavite arka duvarına dokuz farklı eğim açısı verilmiş ve oluşturulan yeni geometrilerde akış simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Kontrolsüz simülasyonlarla kıyaslanan sonuçlarda y-ekseniyle yapılan eğim açısının artmasıyla birlikte basınç salınım genliklerindeki düşüşün arttığı ve baskın mod frekanslarının düştüğü kaydedilmiştir. Kavite duvarlarındaki ses basınç seviyeleri incelendiğinde eğim açısı arttıkça her bir duvarda gözlenen ses basınç seviyelerinin düştüğü anlaşılmıştır. Basınç grafiğinde yüksek eğim açılı simülasyonlar arası kolayca ayırt edilemeyen farklılıklar ses basınç seviyelerini incelendiğinde açıklığa kavuşmuştur. Arka duvar eğim açısının artışında özellikle 20°'den 30°'ye geçişte ve 30°'den 35°'ye geçişte yüksek ses basınç seviyesi düşüşleri göze çarpmıştır. Ses basınç seviyelerinde her bir duvarda en yüksek düşüşlerin elde edildiği TWI-60° simülasyonu arka duvara eğim verilen simülasyonlar arasında en iyi simülasyon olarak seçilmiştir. Bir periyot boyunca basınç dağılımı ve akım çizgilerine bakıldığında, kontrolsüz simülasyonda bir periyot boyunca değişen girdap yapılarının TWI-60° simülasyonunda kaybolduğu ve yerini kaviteyi uzunluk boyunca domine eden büyük bir girdap ve küçük bir köşe girdabına bıraktığı anlaşılmıştır. Bu ikili girdap yapısı ve basınç dağılımı periyot boyunca belirgin değişimler göstermemiştir. Kontrolsüz simülasyonda özellikle arka duvar etrafındaki yüksek basınç değerlerinin oldukça düştüğü kaydedilmiştir. Vortisite dağılımı incelendiğinde kayma tabakasındaki salınımların sönümlendiği anlaşılmıştır.

Kavite girişine plaka eklenen çalışmalarda 2 mm kalınlığındaki dört farklı uzunluğa sahip plakaların akışa etkisi incelenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde plaka uzunluğuna bağlı bir korelasyon geliştirilememiştir. En kısa plaka uzunluğuna sahip CP-L/16 simülasyonunda kontrolsüz durumla oldukça benzer durumlar gözlenmekle birlikte yer yer kontrolsüz simülasyondakini aşan basınç genliği ve ses basınç seviyelerine rastlanmıştır. Plaka uzunluğu kavite uzunluğunun sekizde biri olan CP-

L/8 simülasyonunda basınç genliklerinde yüksek sönümlenme ve ses basınç seviyelerinde yüksek düşüşler elde edilmiştir. CP-L/8 simülasyonunda ilk iki baskın moda ait frekans değerlerinin kontrolsüz simülasyondaki değerlerin yarısına karşılık gelmesi dikkat çekmiştir. Plaka uzunluğunun arttırıldığı CP-3L/16 ve CP-L/3 simülasyonlarında ise basınç genlikleri ve kavite duvarlarındaki ses basınç seviyeleri CP-L/8 simülasyonundaki değerlere göre artsa da kontrolsüz simülasyondaki değerlere göre düşüktür. Diğer simülasyonlardan farklı sonuçların elde edildiği CP-L/8 simülasyonu bu çalışmanın en etkili simülasyonu seçilip bir periyot boyunca basınç dağılımı ve akım çizgileri incelenmiştir. Akım çizgileri incelendiğinde üçlü bir girdap yapısının kavite içine hapsediği ve bir periyot boyunca kaydadeğer değişimlerin gözlenmediği anlaşılmıştır. Kavitenin büyük bir kısmını domine eden en büyük girdabın altında, kavitenin ön kısmına yakın ikincil bir büyük girdap oluşumu göze çarpmaktadır. Bu iki girdaba ek olarak plakanın altında ön duvar çevresinde oluşan daha küçük bir girdap oluşumu da bulunmaktadır. Kontrolsüz simülasyona göre daha düşük basınç değerleri görülse de plakanın bitişinde yüksek basınçların gözlemediği geniş bir alan göze çarpmıştır. Vortisite dağılımı incelendiğinde kayma tabakasındaki salınımların sönümlendiği anlaşılmıştır.

Bir diğer pasif yöntem olarak kavite girişine ve kavite duvarlarına “2 mm x 2 mm” boyutunda engeller konumlandırılarak akış davranışının değişimi araştırılmıştır. Her bir simülasyonda kontrolsüz simülasyon ile yakın baskın mod frekanslarına rastlanmakla birlikte modlara karşılık gelen güç değerlerinde düşüş elde edilebilmiştir. Arka duvara iki engelin konumlandırıldığı WS-3 simülasyonda kontrolsüz durumdan 1-2 dB daha yüksek ses basınç seviyeleri gözlenmiştir. Her bir duvar boyunca en etkili sonuçlar WS-234 ve WS-1234 simülasyonlarından elde edilmiştir. WS-1234 simülasyonundan daha az engel içermesi ve az bir farkla daha düşük ses basınç seviyelerinin elde edilmesi sebebiyle WS-234 en iyi simülasyon olarak seçilmiştir. Her bir kavite duvarında engeller barındıran WS-234 simülasyonunun bir periyot boyunca basınç dağılımı ve akım çizgileri kontrolsüz simülasyona oldukça benzemektedir. Kontrolsüz simülasyondaki gibi WS-234 simülasyonunda da arka duvar etrafında yüksek basınçlı bölgelerin oluşması göze çarpmıştır. WS-234 simülasyonunda kontrolsüz simülasyondan farklı olarak büyük girdap yapıları değişmiştir ve engellerin etrafında küçük yapıli girdaplar oluşmuştur. Vortisite dağılımı incelendiğinde kavite

duvarlarına engeller eklenerek kayma tabakasının yapısının değiştirilebildiği anlaşılmıştır.

Kontrollü simülasyon sonuçları değerlendirildiğinde arka duvara eğim vermenin kavite girişine plaka ekleme ve kavite duvarlarına engel ekleme yöntemlerine kıyasla daha etkin bir yöntem olduğu sonucunda varılmıştır. Kavite girişine plaka eklenen simülasyonlarda plaka uzunluğu ile bağıntılı bir korelasyon elde edilememiştir. Kavite duvarlarına engeller eklendiğinde engellerin etrafında küçük yapılı girdap oluşumları meydana gelmiş ve akış daha karmaşık bir yapıya bürünmüştür. Kavite arka duvarına eğim verilip başka bir istenmeyen etki oluşumu gözlenmeden hem arka duvardaki ses basınç seviyeleri düşürölmüş hem de kavite içindeki karmaşık yapı hafifletilmiştir.

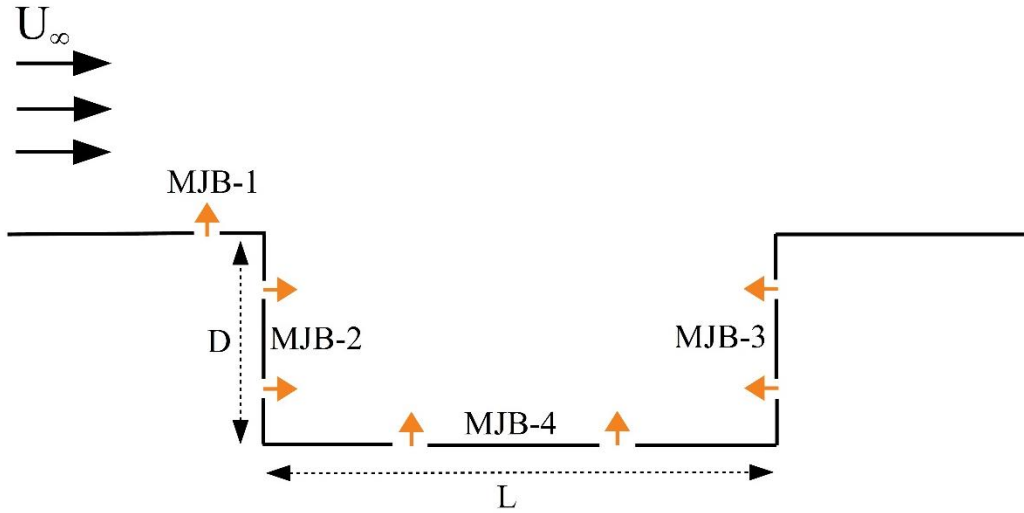


## 5. SÜPERSONİK KAVİTE AKIŞININ AKTİF YÖNTEMLERLE KONTROLÜ

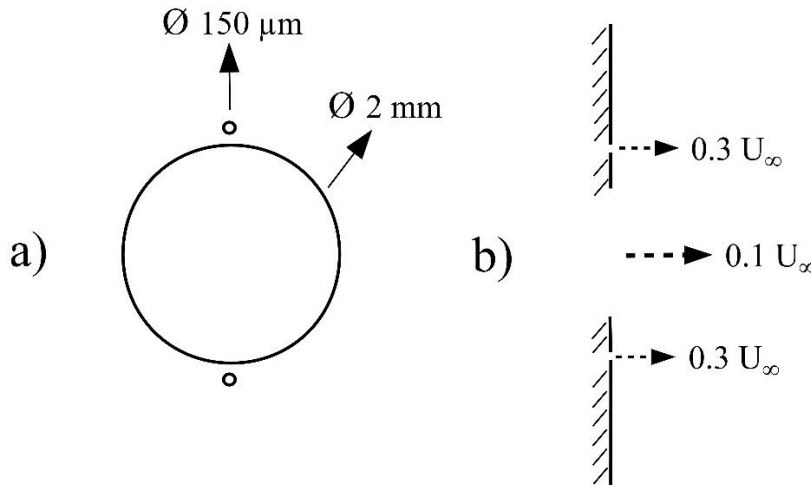
Aktif kontrol yöntemlerinde kontrol için sisteme dışarıdan enerji aktarımı gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada kavite akışının aktif yöntemlerle kontrolü mikrojetler ve jetlerle hava üfleme olarak iki çalışma altında gerçekleştirilmiştir. Mikrojetlerle hava üfleme çalışmaları için “MJB”, jetlerle hava üfleme çalışmaları için “JB” kısaltmaları kullanılmıştır. Her iki yöntemde de kavite girişi ve kavite duvarları üzerinde çeşitli noktalar belirlenmiş ve bu noktalardan hava üfleme gerçekleştirilmiştir. JB çalışması altında kavite duvarlarına konumlandırılmış jet deliklerinden hava vakumlama işlemi de gerçekleştirilmiştir. Aktif kontrollü çalışmalarda iki boyutlu simülasyonlar gerçekleştirilmiş olup zaman adımı olarak  $5 \times 10^{-7}$  saniye kullanılmıştır.

### 5.1 Mikrojetler ile Hava Üfleme Bazlı Akış Kontrolü

Mikrojetlerle hava üfleme bazlı akış kontrolü çalışmalarına öncelikle kavitedeki önemli konumlar belirlenerek başlanmıştır. Delik konumları ve adlandırmalar Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Jet üflenecek delikler 2 mm çapa sahip iken, mikrojet delikleri 150  $\mu\text{m}$  çaplıdır. Jet ve mikrojet deliklerinin iki ve üç boyutlu geometrileri Şekil 5.2’de verilmiştir. Aktif kontrol amacı ile jet deliklerinden serbest akış hızının % 10’u hızda ( $0.1 U_{\infty}$ ) hava üflenirken, mikrojet deliklerinden serbest akış hızının %30’u hızda ( $0.3 U_{\infty}$ ) hava üflenmektedir. Deliklerden dik üfleme yapılmaktadır.

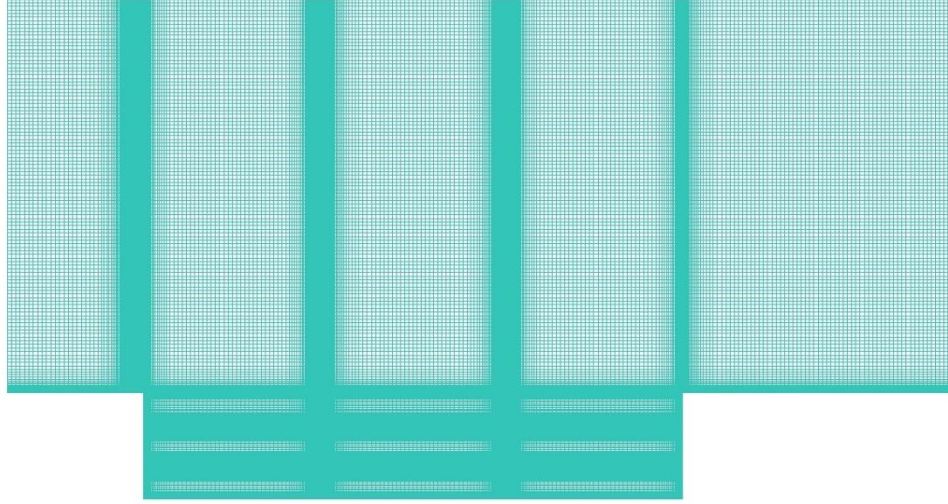


Şekil 5. 1 : MJB delik konumları ve adlandırma

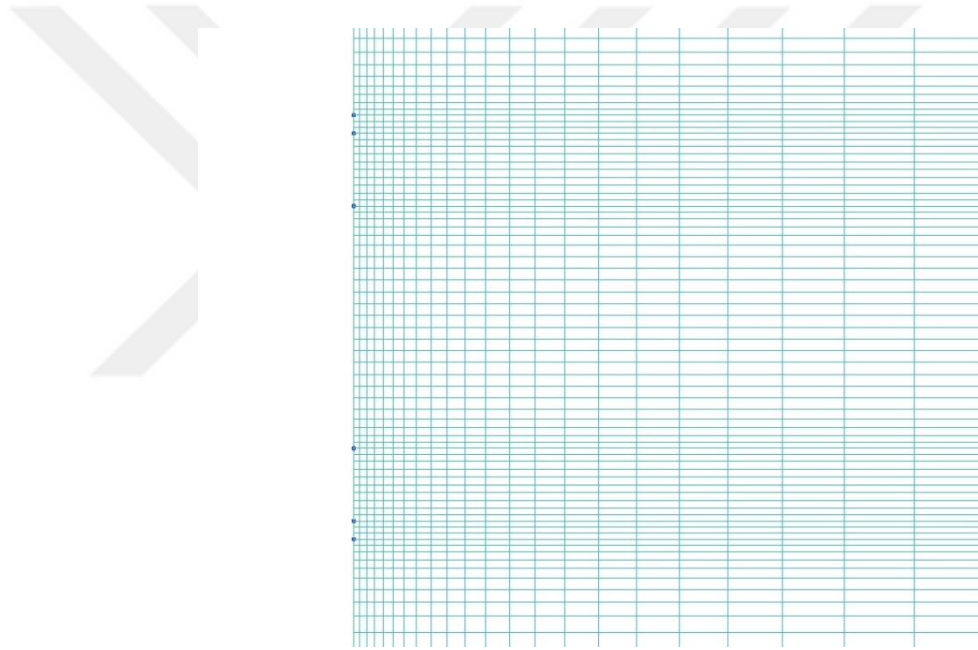


Şekil 5. 2 : Mikrojet ve jet delikleri (a) Üç boyutlu gösterim, (b) İki boyutlu gösterim

Mikrojetlerle hava üfleme bazlı akış kontrolü simülasyonları için hazırlanan ağ yapısı Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Hazırlanan ağ yapısı kontrolsüz simülasyonda olduğu gibi duvar kenarları ve kayma tabakası etrafına ek olarak delik konumlarının etrafında da sıkılaştırılmıştır. Mikrojet ve jet deliklerinin etrafındaki sıkılaştırılmış ağ yapısı Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Şekil 5.4'te görüldüğü üzere hava üfleme etkisinin yakalanabilmesi adına 150 µm çapa sahip bir mikrojet deliğine 3 hücre, 2 mm çapa sahip bir jet deliğine ise 20 hücre konumlandırılmıştır. Ağ yapısında ilk hücre yüksekliği  $5 \times 10^{-5}$  m, hücre büyüme oranı 1.13 ve boyut oranı 19.6'dır. Ağ yapısı toplam 140,205 elemandan oluşmaktadır.



Şekil 5. 3 : MJB ağ yapısı



Şekil 5. 4 : Jet ve mikrojet deliklerinin etrafındaki ağ yapısı

Ağ yapısının sıkılaştırılması ile birlikte zaman adımı küçültülmüş ve  $5 \times 10^{-7}$  saniye olarak belirlenmiştir. Simülasyon sekiz periyot ilerletilip akış periyodikleştirildikten sonra bu ana ait simülasyon dosyaları kaydedilmiştir. Bu andan itibaren mikrojet ve jet deliklerinden hava üflenmeye başlanmıştır. Kıyaslarda kullanılmak için sıkılaştırılmış yeni ağ yapısında hava üfleme yapılmayan kontrolsüz bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Ardından Çizelge 5.1’de belirtilen mikrojetlerle hava üfleme bazlı akış kontrolü simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.1’de gösterilen kontrollü simülasyonlarda 8. ve 14. periyotlar arasında açık olduğu belirtilen jet ve mikrojet

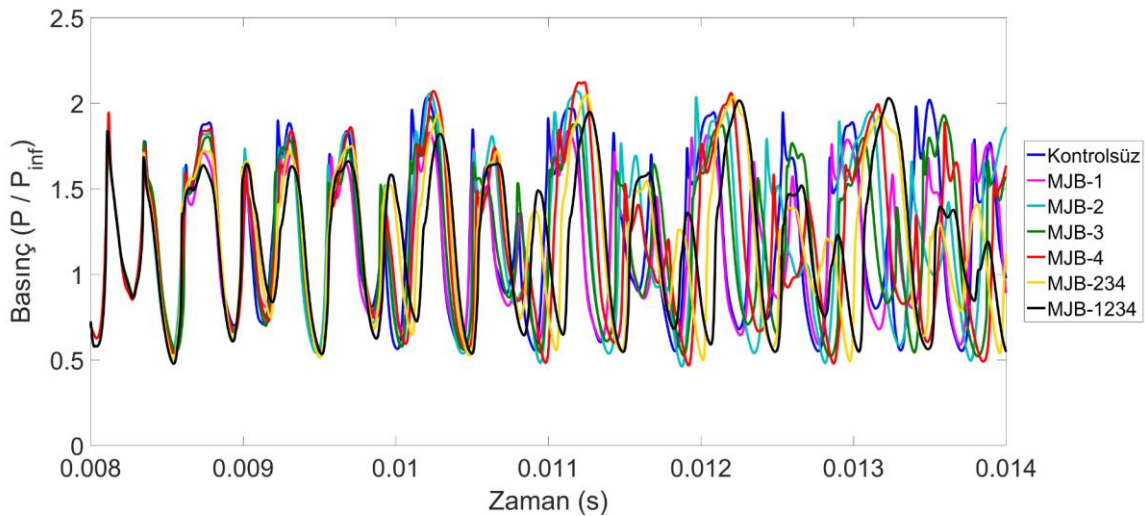
deliklerinden sırasıyla  $0.1 U_{\infty}$  ve  $0.3 U_{\infty}$  hızlarında sürekli hava üfleme yapılmıştır. Simülasyonlarda serbest akış hızı ( $U_{\infty}$ ) 444 m/s'dir.

Çizelge 5. 1: Mikrojetler ile Hava Üfleme Simülasyonları

	Giriş	Ön duvar	Arka duvar	Alt duvar
MJB-1	açık	-	-	-
MJB-2	-	açık	-	-
MJB-3	-	-	açık	-
MJB-4	-	-	-	açık
MJB-234	-	açık	açık	açık
MJB-1234	açık	açık	açık	açık

Kontrollü simülasyonların kontrolsüz simülasyon ile kıyasları 8. periyot ile 14. periyot arasındaki altı periyotluk sürede yapılmıştır.

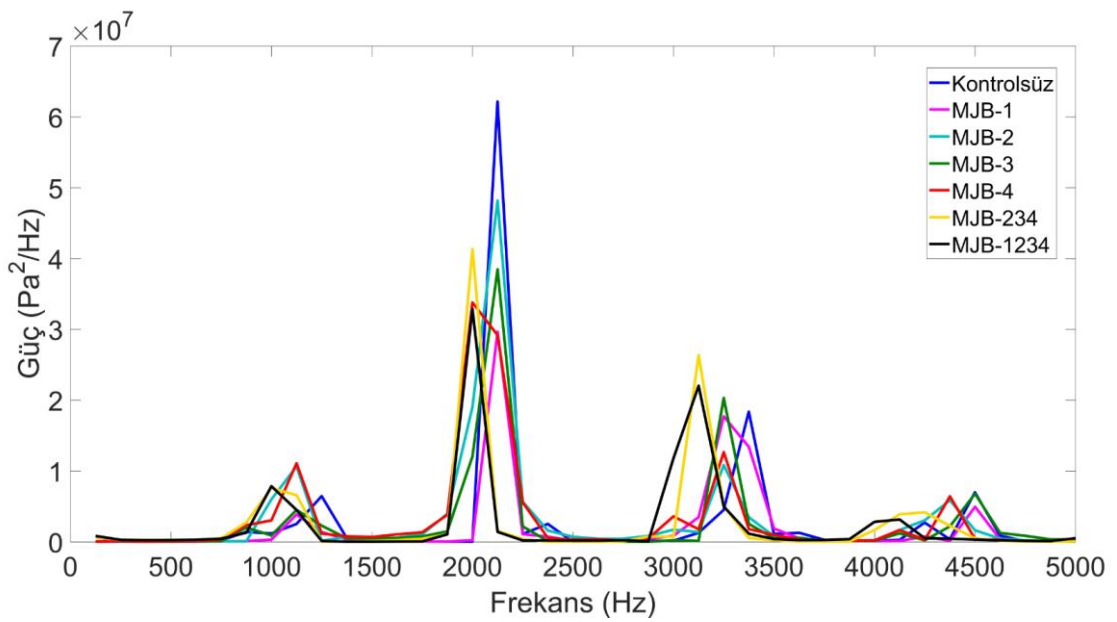
Arka duvardaki kritik noktadan elde edilen zamana bağlı basınç verileri Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Mikrojetlerle hava üflenen simülasyonların salınım davranışları kontrolsüz simülasyon salınım davranışına benzemektedir. Bazı simülasyonlarda zaman ilerledikçe faz farkı ortaya çıkmaktadır. MJB-2, MJB-4, MJB-234 ve MJB-1234 simülasyonlarında belirli anlarda kontrolsüz simülasyondakini aşan genliklere rastlanırken, MJB-1 ve MJB-3 simülasyonlarında kontrolsüz simülasyona göre düşük salınım genlikleri elde edilmektedir. Mikrojetler ile hava üflenerek basınç genliklerinde düşüş yakalanabildiği, salınımlı yapının korunduğu ve salınımların kontrolsüz simülasyona göre karmaşıklaştığı anlaşılmaktadır. Basınç genliklerinde en fazla düşüşün yakalandığı simülasyon kavite girişinden mikrojetler ile hava üflemenin yapıldığı MJB-1 simülasyonudur.



Şekil 5. 5 : MJB kritik nokta için basınç-zaman grafiği



Kritik noktadan elde edilen basınç verilerine FFT uygulanarak oluşturulan güç-frekans grafiği Şekil 5.6'da verilmiştir. Kontrollü MJB simülasyonlarında modlara karşılık gelen frekans değerleri ile kontrolsüz simülasyon frekansları arasında az da olsa fark olduğu anlaşılmıştır. MJB-1, MJB-2 ve MJB-3 simülasyonlarında ikinci modun frekansı kontrollü simülasyon ile aynıdır. Kontrollü simülasyonlarda ikinci modun gücü düşürülürken, ilk mod ve ikinci modda kontrolsüz simülasyondakinden yüksek güç değerleri elde edilmektedir. FFT sonuçları değerlendirildiğinde mikrojetler ile hava üfleme sonucunda sistem karakteristiği olan frekans değerlerinde belirgin değişimler olmadan güç değerlerinde bir miktar düşüş elde edilebildiği anlaşılmıştır.

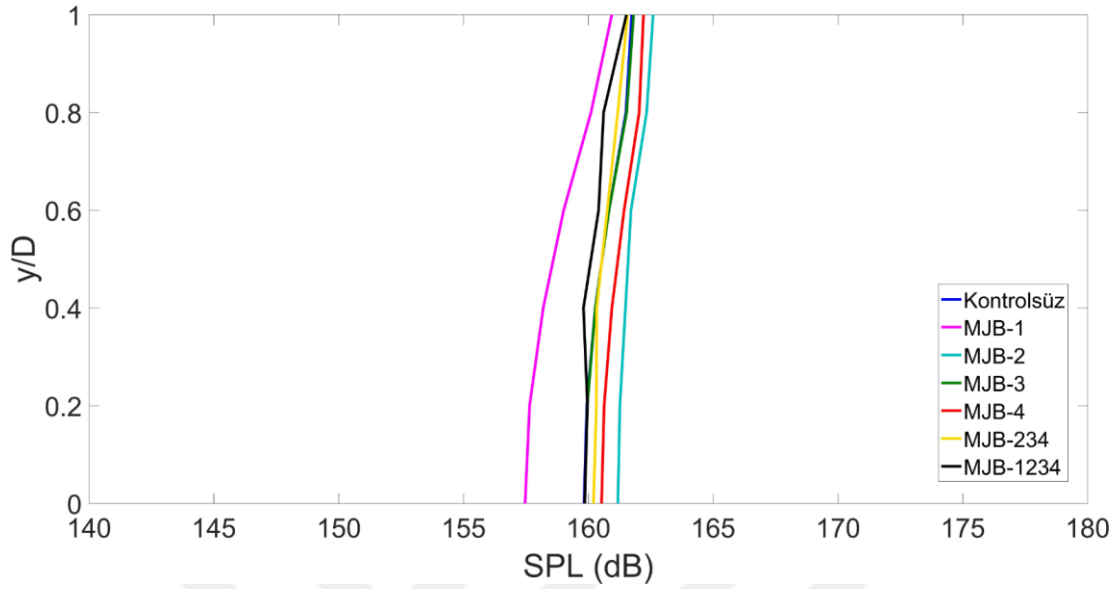


Şekil 5. 6 : MJB kritik nokta için güç-frekans grafiği

Mikrojetler ile hava üfleme bazlı akış kontrolü simülasyonlarının kontrolsüz simülasyon ile ses basınç seviyesi cinsinden kıyası ön duvar, alt duvar ve arka duvar için sırasıyla Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da yapılmıştır.

Şekil 5.7'deki ön duvar ses basınç seviyeleri kıyasında kontrolsüz duruma göre en düşük ses basınç seviyelerinin kontrolsüz simülasyondan 2-3 dB fark ile MJB-1 simülasyonunda elde edildiği görülmektedir. Arka duvardaki mikrojet deliklerinden üfleme yapılan MJB-3 simülasyonunda kontrolsüz simülasyon ile aynı değerlerde ve aynı davranışta sonuçlar elde edilmektedir. MJB-234 ve MJB-1234 simülasyonlarında kontrolsüz simülasyondakilere oldukça yakın ses basınç seviyeleri görülmektedir. Ön duvardan üfleme yapılan MJB-2 ve alt duvardan üfleme yapılan MJB-4

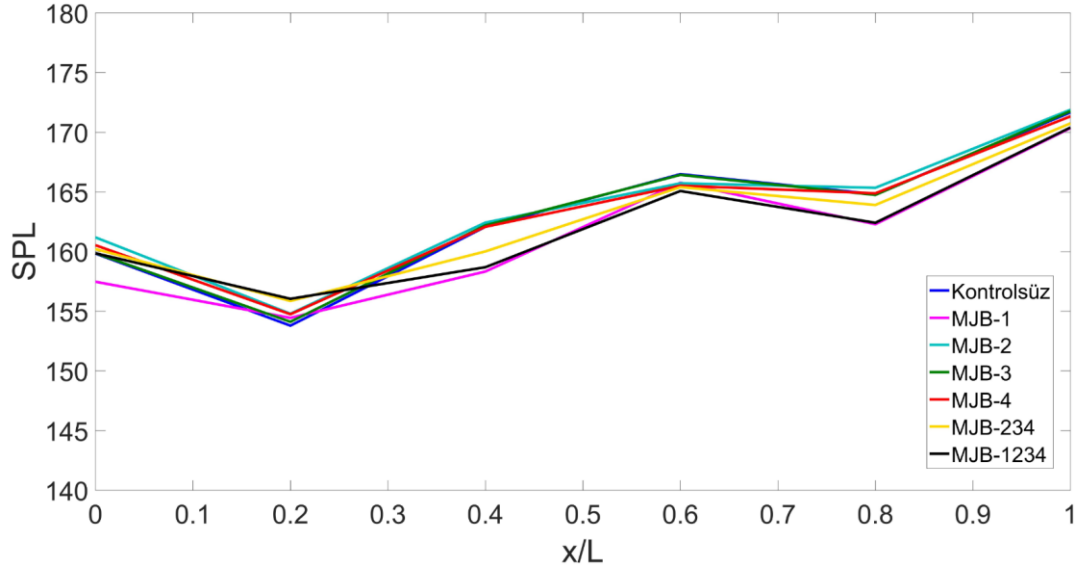
simülasyonlarında ön duvarda kontrolsüz simülasyona göre 1-2 dB daha yüksek ses basınç seviyelerine rastlanmaktadır.



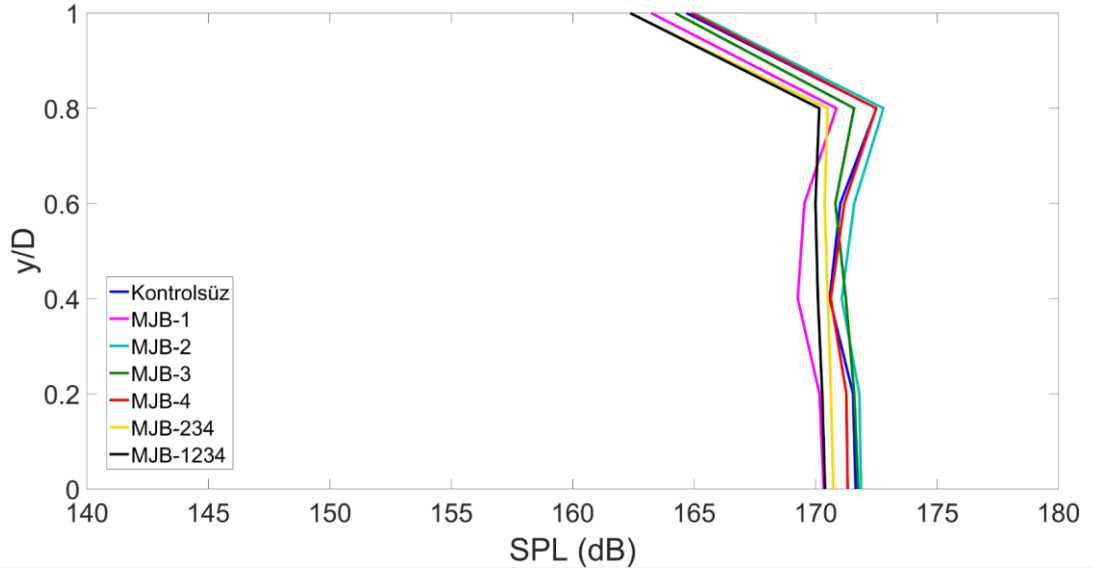
Şekil 5. 7 : MJB ön duvar SPL-konum grafiği

Şekil 5.8'deki alt duvar ses basınç seviyeleri incelendiğinde MJB simülasyonları ile kontrolsüz simülasyon arasındaki en yüksek ses basınç seviyesi farklarının 3-4 dB civarında olduğu anlaşılmaktadır. Alt duvar boyunca en yüksek ses basınç seviyesi düşürümleri MJB-1 ve MJB-1234 simülasyonlarında gözlenmektedir. Bu iki simülasyonun davranışı ön duvarda farklı iken arka duvara doğru ilerledikçe birbirine benzemektedir. Her bir kavite duvarından ayrı ayrı üfleminin yapıldığı MJB-2, MJB-3 ve MJB-4 simülasyonlarında kontrolsüz simülasyona çok benzer sonuçlar elde edilmektedir.

Arka duvardaki ses basınç seviyeleri Şekil 5.9'a bakılarak incelendiğinde kontrolsüz duruma göre en büyük düşüşün elde edildiği simülasyonların MJB-1, MJB-234 ve MJB-1234 simülasyonları olduğu görülmektedir. Elde edilen en yüksek düşüş diğer duvarlarda olduğu gibi 3-4 dB civarındadır. MJB-2, MJB-3 ve MJB-4 simülasyonlarında çeşitli konumlarda kontrolsüz durumdan yüksek ses basınç seviyelerine rastlansa da aradaki fark 1 dB'i aşmamaktadır.



Şekil 5. 8 : MJB alt duvar SPL-konum grafiği

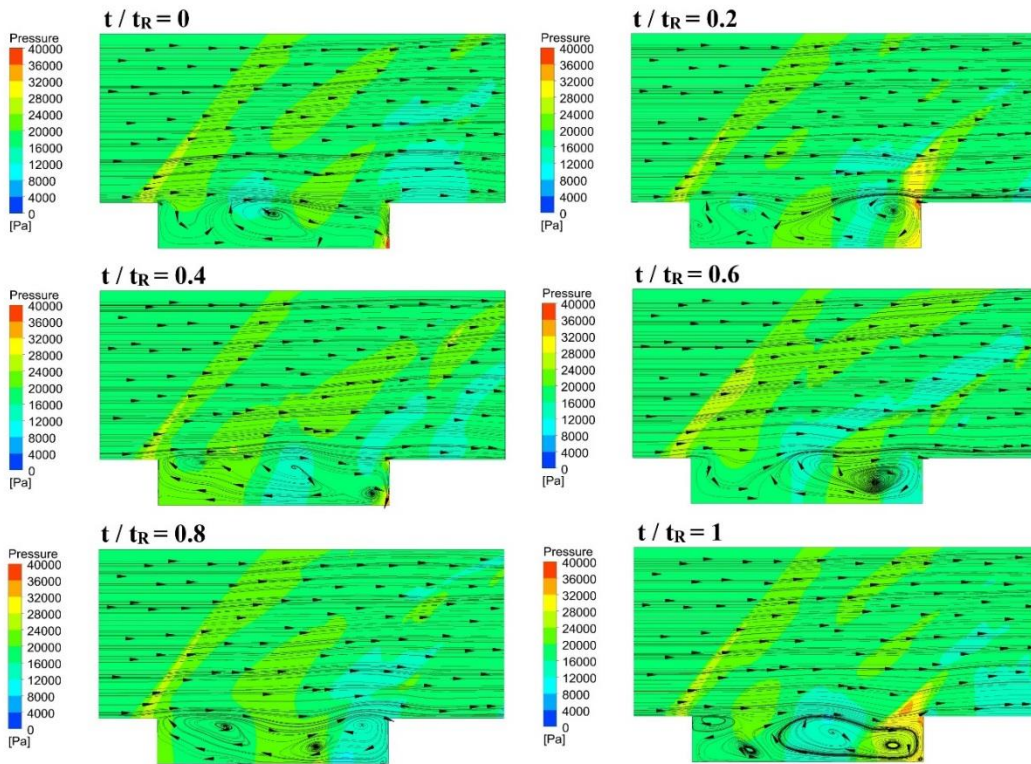


Şekil 5. 9 : MJB arka duvar SPL-konum grafiği

Mikrojetle hava üfleme yapılarak ile kontrolsüz simülasyondaki ses basınç seviyelerini düşürmenin ya da yükseltmenin mümkün olduğu görülmüştür. Elde edilen en yüksek ses basınç seviyesi farkları her bir duvar için 3-4 dB civarındadır.

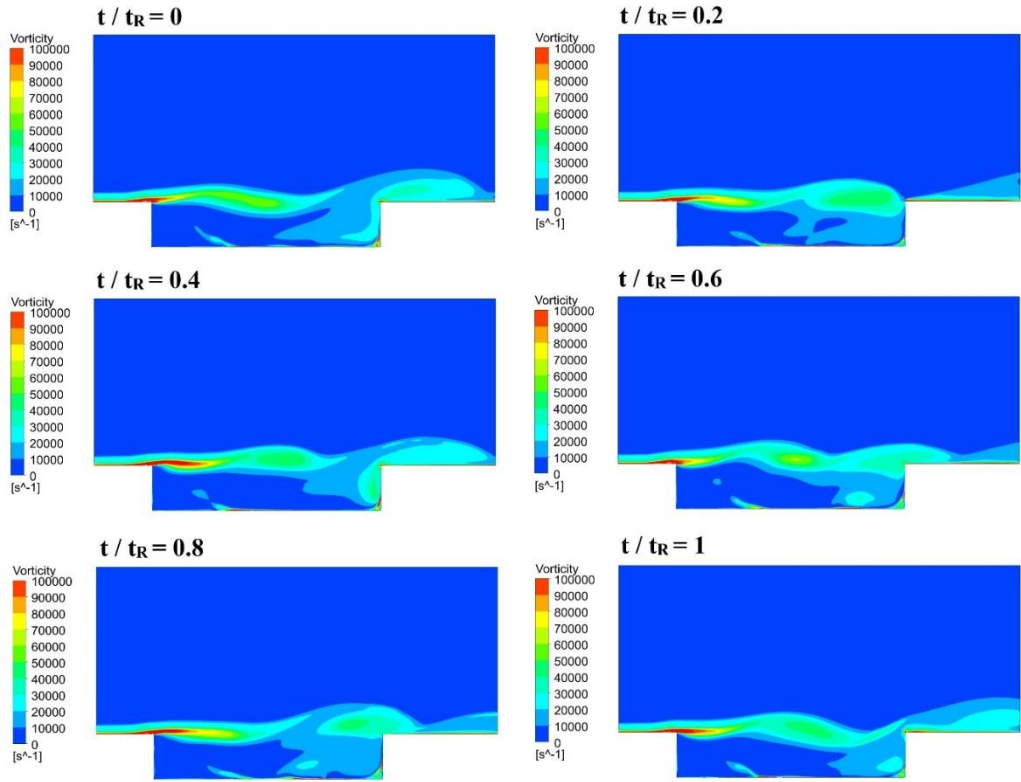
Kontrolsüz simülasyonla kontrollü simülasyonların arasındaki fark yorumlanırken, incelenmekte olan simülasyonun mikrojet üfleme deliklerinin konumu da dikkate alınmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde en az noktadan üfleme yapılarak en iyi sonuca ulaşabilen simülasyon MJB-1 seçilmiştir. MJB-1 simülasyonu akış alanında basınç dağılımı ve akım çizgileri bir periyot için Şekil 5.10'da gösterilmiştir. MJB-1

simülasyonunda kontrolsüz simülasyon ile benzer alanlarda yüksek basınç dalgaları görülse de bu dalgalara karşılık gelen basınç değerleri kontrolsüz simülasyona kıyasla düşüktür. Kavite içinde de kontrolsüz duruma göre daha düşük basınç değerleri elde edilmektedir. Mikrojetlerle üfleminin yapıldığı bölgeden yukarı doğru ötelenen yüksek basınçlı bir bölge dikkat çekmektedir. Akım çizgileri incelendiğinde MJB-1 simülasyonu ile kontrolsüz simülasyonda oldukça benzer girdap yapılarının oluştuğu görülmekle birlikte MJB-1 simülasyonunda küçük girdap sayısının arttığı farkedilmektedir. Kontrolsüz simülasyona göre MJB-1 simülasyonundaki oluşumlar daha gevşek yapılıdır.



Şekil 5. 10 : MJB-1 simülasyonu akış alanında basınç dağılımı ve akım çizgileri

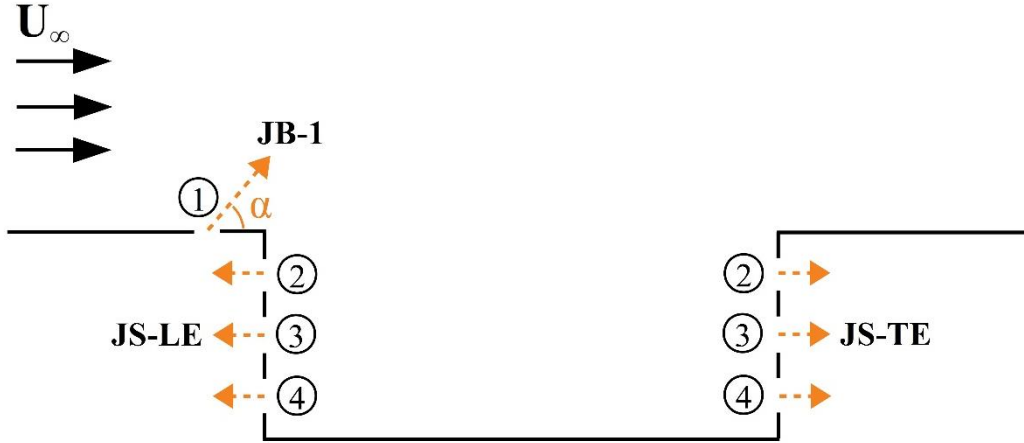
MJB-1 simülasyonu akış alanında bir periyot boyunca farklı anlarda gözlenen vortisite dağılımı Şekil 5.11’de gösterilmiştir. Şekil 5.11’e göre kavite girişinden mikrojetlerle hava üfleminin etkisiyle kontrolsüz simülasyona kıyasla kayma tabakasındaki salınımın daha düzenli bir hale geldiği ve kavite içindeki vortisite değerlerinin az da olsa düştüğü anlaşılmaktadır.



Şekil 5. 11 : MJB-1 simülasyonu akış alanında vortisite dağılımı

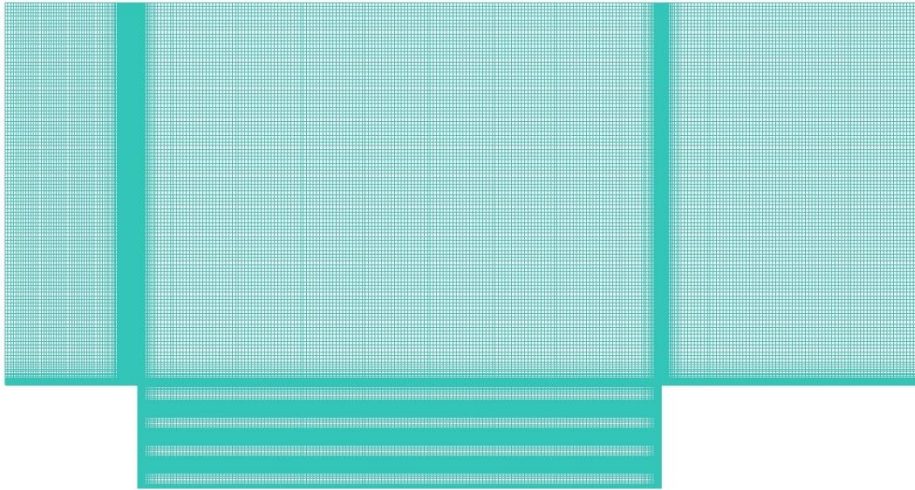
## 5.2 Jetler ile Hava Üfleme Bazlı Akış Kontrolü

Jetlerle hava üfleme bazlı akış kontrolü çalışmaları üç başlık altında tamamlanmıştır. Bunlardan ilki kavite girişinden farklı açılarla jet üfleme yapılmasıdır ve çalışma JB-1 olarak adlandırılmıştır. İkinci ve üçüncü çalışmalarda kavitenin ön ve arka duvarlarına eşit aralıklı üçer delik açılmış ve bu deliklerden çeşitli kombinasyonlarda hava vakumlama gerçekleştirilmiştir. Ön duvardan hava vakumlama yapılan çalışma JS-LE, arka duvardan hava vakumlama yapılan çalışma JS-TE şeklinde adlandırılmıştır. Yapılan çalışmalar Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Her bir çalışmada oluşturulan jet delikleri 2 mm çaplıdır. Jetlerden üflenene ve vakumlanan havanın hızı serbest akış hızınının % 10’una ( $0.1 U_{\infty}$ ) eşittir. Daha yüksek hızların uçuş koşullarını olumsuz etkileyeceği düşünüldüğünden hızı arttırma çalışması yapılmamıştır. JB başlığı altındaki her çalışmada akışın periyodikleşmesi beklenip 8. ile 14. periyotlar arasında sürekli üfleme ya da vakumlama gerçekleştirilmiştir. Uygulama yapılan altı periyot boyunca elde edilen sonuçlar yine aynı sürede kontrolsüz simülasyondan elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır.

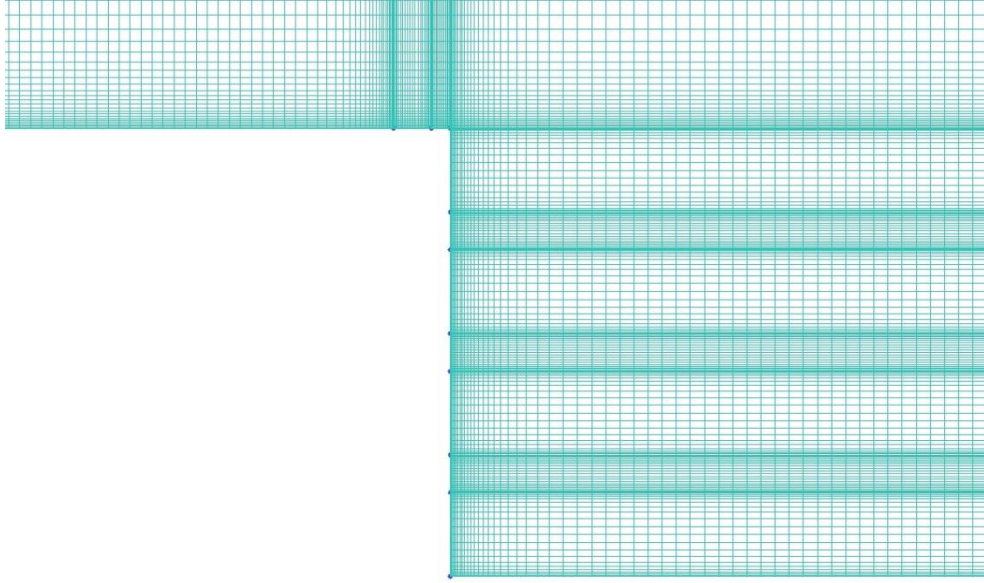


Şekil 5. 12 :Jetlerle hava üfleme ve vakumlama bazlı akış kontrolü çalışmaları

Jet üfleme ve vakumlama çalışmaları için hazırlanan ağ yapısı Şekil 5.13'te gösterilmiştir. Ağ yapısı delik konumları etrafında sıklaştırılmış ve her bir jet deliğinde 20 hücre konumlandırılmıştır. Delikler etrafındaki sıkı yapı Şekil 5.14'te gösterilmiştir. Hazırlanan ağ yapısı kullanılarak önce kontrolsüz bir simülasyon gerçekleştirilmiş, sonrasında ilgili delik konumlarından hava üfleme ve vakumlama gerçekleştirilerek kontrollü simülasyonlar tamamlanmıştır.



Şekil 5. 13 : JB simülasyonlarında kullanılan ağ yapısı

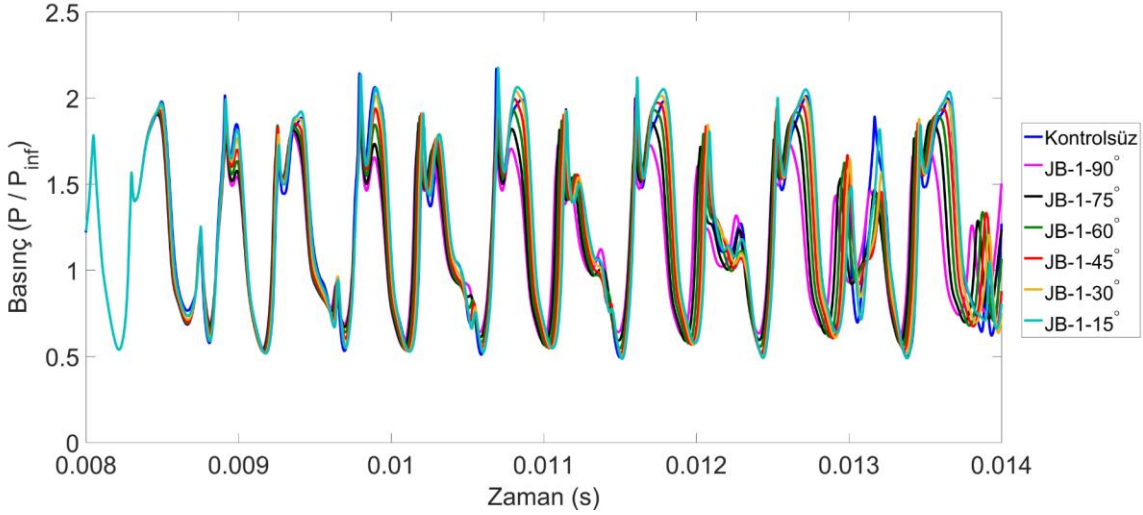


Şekil 5. 14 : JB simülasyonlarında delik konumlarının etrafındaki ağ yapısı

### 5.2.1 Kavite girişindeki jet deliğinden farklı açılarda hava üfleme simülasyonları

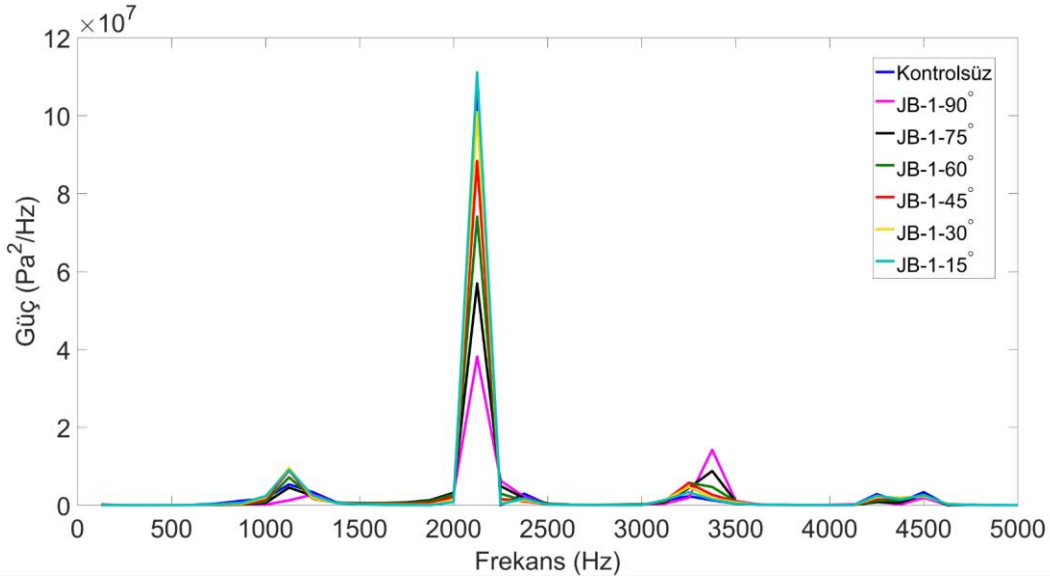
JB-1 olarak adlandırılan çalışmada kavite girişindeki bir jet deliğinden farklı açılarda hava üfleminin akışa etkisi incelenmiştir. Akış periyodikleştikten sonra girişteki jet deliği açılıp x-ekseniyle  $90^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $15^\circ$  olmak üzere altı farklı açıda altı periyot boyunca sürekli üfleme gerçekleştirilmiştir. Simülasyon isimleri üfleme açısı ile uyumlu olacak biçimde JB-1- $90^\circ$ , JB-1- $75^\circ$ , JB-1- $60^\circ$ , JB-1- $45^\circ$ , JB-1- $30^\circ$  ve JB-1- $15^\circ$  şeklinde belirlenmiştir.

Arka duvardaki kritik noktadan elde edilen zamana bağlı basınç verileri Şekil 5.15'te gösterilmiştir. Üfleme açısı arttıkça basınç salınımlarının daha fazla sönümlenmektedir. Girişten  $15^\circ$  açıyla üfleme yapılan JB-1- $15^\circ$  simülasyonunda zaman zaman kontrolsüz simülasyondakini aşan genlikler görülmektedir. Bu durum üfleme yapılan havanın kayma tabakasını değiştirmekten ziyade beslediği şeklinde yorumlanmıştır. Basınç genliğinde en fazla düşüş girişten dik üfleme yapılan JB-1- $90^\circ$  simülasyonunda görülmektedir. Kontrollü simülasyonlardaki salınımlar kontrolsüz simülasyon salınımına oldukça benzemektedir ve belirgin ötelenmeler gözlenmemektedir.



Şekil 5. 15 : JB-1 kritik nokta basınç-zaman grafiği

Kritik nokta basınç verilerine ait güç-frekans grafiği Şekil 16'da verilmiştir. Kontrollü simülasyonlarda ilk iki moda karşılık gelen frekanslar kontrolsüz simülasyon ile uyumludur. JB-1-90° ve JB-1-75° simülasyonlarında kontrolsüz simülasyona göre ilk modun gücü düşerken, diğer simülasyonlarda ilk moda karşılık gelen güç değerleri kontrolsüz simülasyona göre yüksektir. İkinci moda ise JB-1-15° dışındaki bütün kontrollü simülasyonlarda kontrolsüz simülasyona göre daha düşük güç değerleri elde edilmektedir. Üfleme açısı arttıkça ikinci modun gücü düşmektedir. Kavite girişinden farklı açılarla üfleme yapıldığında mod frekansları değişmeden güç değerlerinin değiştirilebileceği anlaşılmıştır.

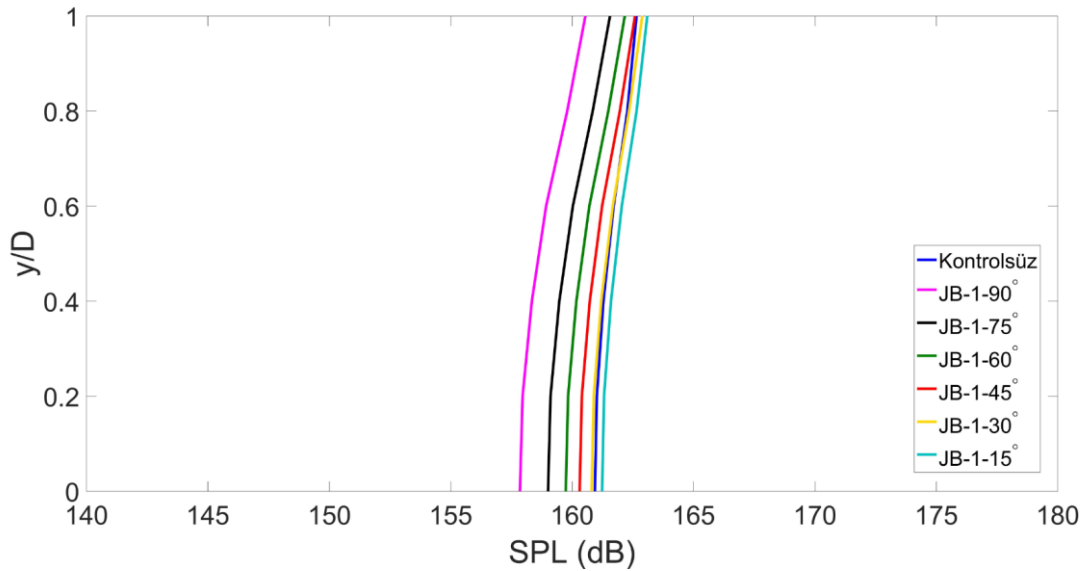


Şekil 5. 16 : JB-1 kritik nokta güç-frekans grafiği



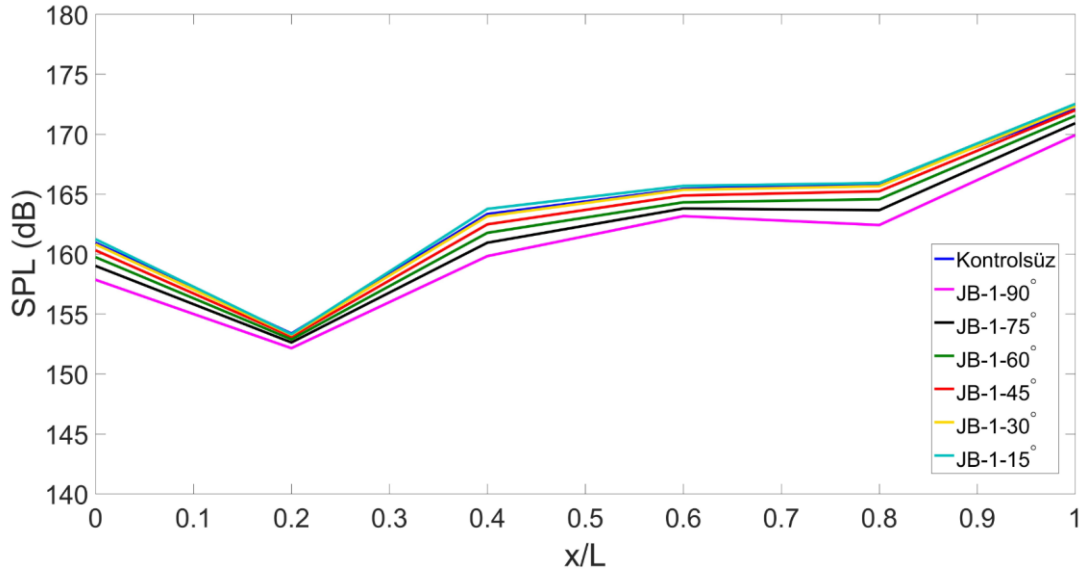
Kavite girişinden farklı açılarla üfleme yapılan simülasyonların kontrolsüz simülasyon ile ses basınç seviyesi cinsinden kıyası ön duvar, alt duvar ve arka duvar için sırasıyla Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’da yapılmıştır.

Şekil 5.17’deki ön duvar ses basınç seviyeleri incelendiğinde üfleme açısı arttıkça ses basınç seviyelerinin düştüğü anlaşılmaktadır. En yüksek ses basınç seviyelerinin gözlemlendiği JB-1-15° simülasyonu ile kontrolsüz simülasyon değerleri arasındaki fark 1 dB civarını aşmamaktadır. 30° üfleme açısına sahip JB-1-30° simülasyonundaki sonuçlar kontrolsüz simülasyon ile neredeyse aynıdır. En düşük ses basınç seviyelerinin elde edildiği JB-1-90° simülasyonu ile kontrolsüz simülasyon arasındaki fark 4 dB civarındadır.



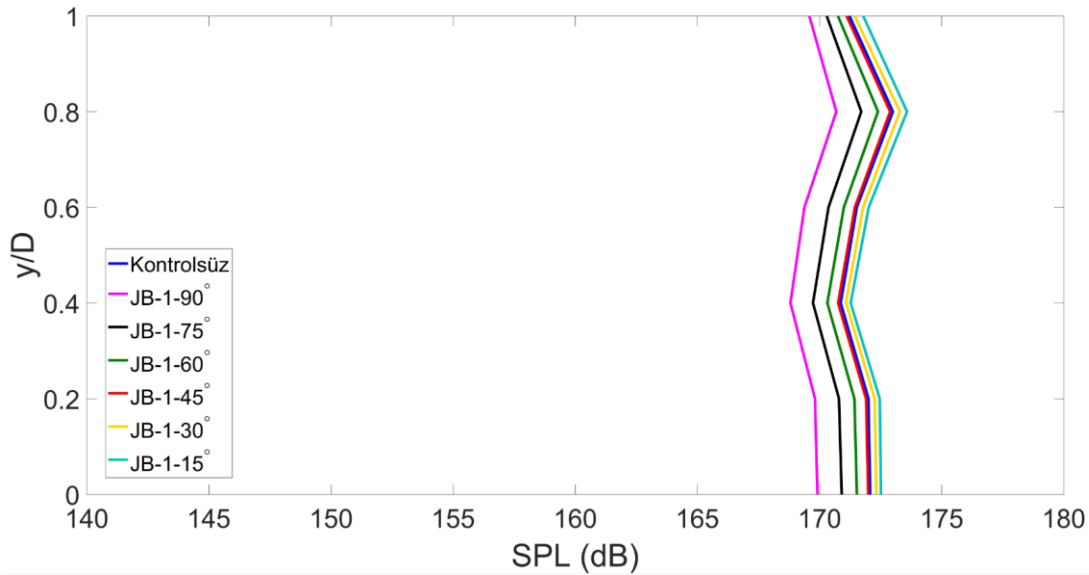
Şekil 5. 17 : JB-1 ön duvar SPL-konum grafiği

Şekil 5.18’deki alt duvar ses basınç seviyelerine bakıldığında her bir kontrollü simülasyonda kontrolsüz simülasyon ile benzer ses basınç seviyesi dağılımı davranışının görüldüğü ve üfleme açısı arttıkça ses basınç seviyelerinin düştüğü anlaşılmaktadır. JB-1-15° ve JB-1-30° simülasyonlarındaki değerler kontrolsüz simülasyon değerlerine oldukça yakındır. Kontrolsüz simülasyon ile 3-4 dB farkın yakalandığı JB-1-90° simülasyonunda en düşük ses basınç seviyeleri gözlenmektedir.



Şekil 5. 18 : JB-1 alt duvar SPL-konum grafiği

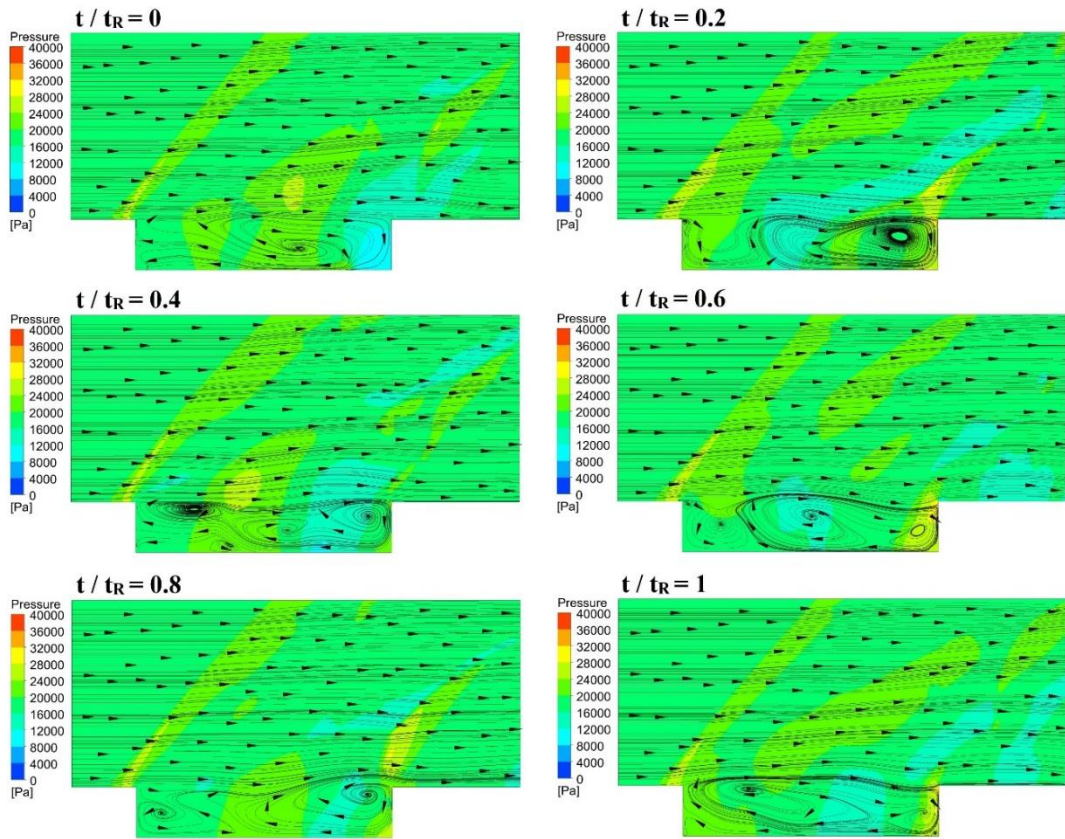
Şekil 5.19'daki alt duvar ses basınç seviyesi-konum grafiğine göre JB-1-15° ve JB-1-30° simülasyonlarında kontrolsüz simülasyonu 1 dB civarında aşan değerler elde edilirken, JB-1-45° simülasyonu sonuçları kontrolsüz simülasyon ile nedeys e aynıdır. Her bir simülasyonda duvar boyunca gözlenen ses basınç seviyesi dağılım davranışı kontrolsüz simülasyondaki gibidir ve hava üfleme açısı arttıkça ses basınç seviyeleri düşmektedir. JB-1-90° simülasyonu ile kontrolsüz simülasyon arasındaki fark 3-4 dB civarındadır.



Şekil 5. 19 : JB-1 arka duvar SPL-konum grafiği

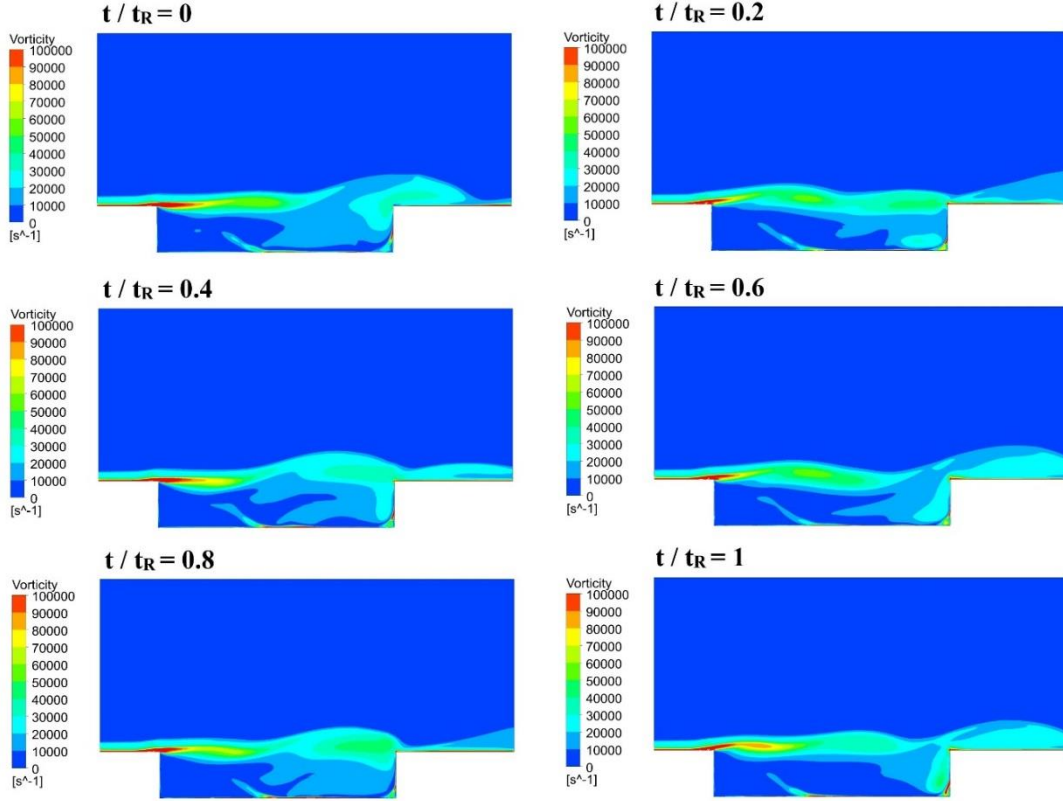
Kavite girişindeki jet deliğinden farklı açılarda hava üfleminin yapıldığı simülasyonlarda kontrolsüz simülasyonun salınım davranışı, duvarlar boyunca ses basınç seviyesi dağılımı gibi temel özellikler belirgin olarak değişmemiştir. Bütün kavite duvarlarında üfleme açısı arttıkça ses basınç seviyeleri düşmüştür. En etkin sonuçlar kontrolsüz simülasyonla 3-4 dB farkın yakalanabildiği JB-1-90° simülasyonunda elde edilmiştir.

MJB-1 simülasyonundaki mikrojet deliklerinin çıkarıldığı durum olan JB-1-90° simülasyonu akış alanındaki basınç dağılımı ve akım çizgileri 1 periyot için Şekil 5.20'de gösterilmiştir. MJB-1 simülasyonunda olduğu gibi JB-1-90° simülasyonunda da kontrolsüz simülasyon ile benzer bölgelerde yüksek basınç dalgaları gözlenmiştir. Kontrolsüz simülasyonda arka duvar etrafında görülen yüksek basınç değerleri JB-1-90° simülasyonunda düşmektedir. Akım çizgilerine bakıldığında kavite içindeki girdapların kontrolsüz durumdan daha gevşek yapıda olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5. 20 : JB-1-90° simülasyonu akış alanında basınç dağılımı ve akım çizgileri

JB-1-90° simülasyonu akış alanında bir periyot boyunca gözlenen vortisite dağılımları Şekil 5.21’de gösterilmiştir. JB-1-90° simülasyonu vortisite dağılımı beklendiği üzere MJB-1 simülasyonu vortisite dağılımına oldukça benzemektedir.



Şekil 5. 21 : JB-1-90° simülasyonu akış alanında vortisite dağılımı

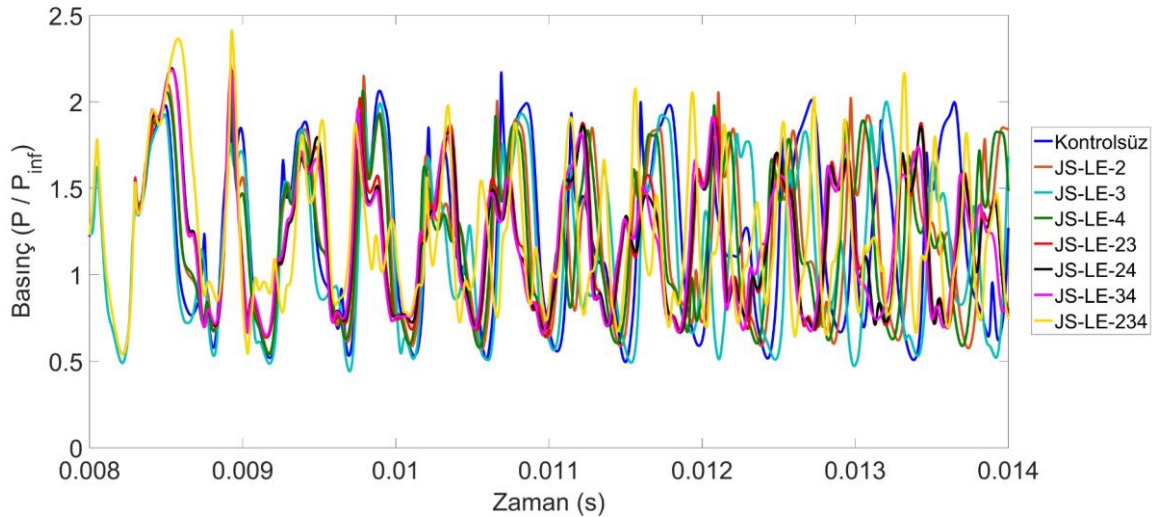
### 5.2.2 Kavite ön duvarındaki jet deliklerinden hava vakumlama simülasyonları

JS-LE olarak adlandırılan çalışmada akış periyodikleştikten sonra altı periyot boyunca kavite ön duvarında konumlandırılmış eşit aralıklı jet deliklerinden farklı kombinasyonlarda sürekli hava vakumlama gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kavite içinde arka duvardan ön duvara doğru ilerleyen dalgaların vakumlanması ile kavite içinde gözlenen yüksek basınç değerlerini düşürmek amaçlanmıştır. Vakum yapılan delikler ve buna karşılık gelen simülasyon adlandırmaları Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5. 2 : JS-LE Simülasyonları

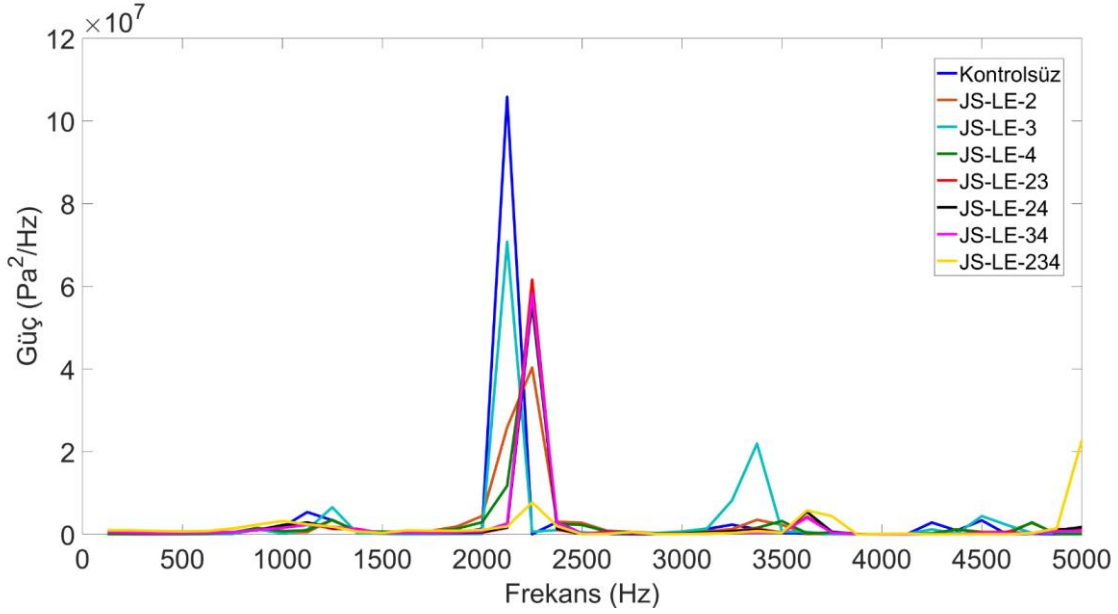
	Delik 2	Delik 3	Delik 4
JS-LE-2	açık	-	-
JS-LE-3	-	açık	-
JS-LE-4	-	-	açık
JS-LE-23	açık	açık	-
JS-LE-24	açık	-	açık
JS-LE-34	-	açık	açık
JS-LE-234	açık	açık	açık

JS-LE çalışmasındaki simülasyonlarda arka duvardaki kritik noktadan elde edilen zamana bağlı basınç verileri Şekil 5.22’de kontrolsüz simülasyon verileriyle kıyaslanmıştır. Ön duvardaki tüm deliklerden hava vakumlama yapılan JS-LE-234 simülasyonunda vakumlama işlemi başladığında kontrolsüz simülasyondan daha yüksek genlikler elde edilse de vakumlama devam ettikçe bu durum değişmektedir. Her bir delikten ayrı ayrı vakumlamaların gerçekleştirildiği JS-LE-2, JS-LE-3 ve JS-LE-4 simülasyonlarının basınç salınımları birbirine benzemektedir. Benzer şekilde iki delikten vakumlamaların yapıldığı JS-LE-23, JS-LE-24 ve JS-LE-34 simülasyonlarının salınımları birbirine çok benzemekte olup kontrolsüz simülasyon salınımlarından farklı yapıdadır.



Şekil 5. 22 : JS-LE kritik nokta basınç-zaman grafiği

JS-LE simülasyonlarında kritik noktadan elde edilen güç frekans grafiği Şekil 5. 23'te gösterilmiştir. Kontrollü simülasyonlarda ilk iki moda ait frekans değerleri kontrolsüz simülasyon frekanslarından az da olsa da farklıdır. Üçüncü modda ise kontrollü ve kontrolsüz simülasyonlar arasındaki frekans farkı artmaktadır. Kontrollü JS-LE simülasyonları ile ilk modun gücünün çok fazla değişmediği fakat ikinci modun gücünün düşürüldüğü anlaşılmaktadır. Orta delikten vakumlama yapılan JS-LE-3 simülasyonunda üçüncü modun gücü kontrolsüz simülasyona göre oldukça yüksektir.



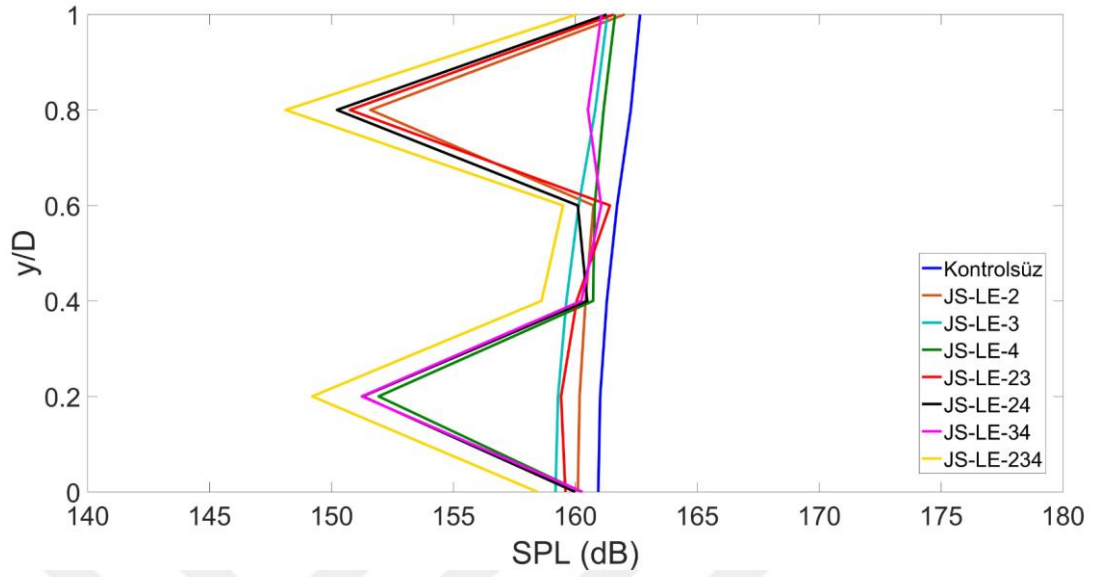
Şekil 5. 23 : JS-LE kritik nokta güç-frekans grafiği

Kavite ön duvarından hava vakumlama yapılan simülasyonların kontrolsüz simülasyon ile ses basınç seviyesi cinsinden kıyası ön duvar, alt duvar ve arka duvar için sırasıyla Şekil 5.24, Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da yapılmıştır.

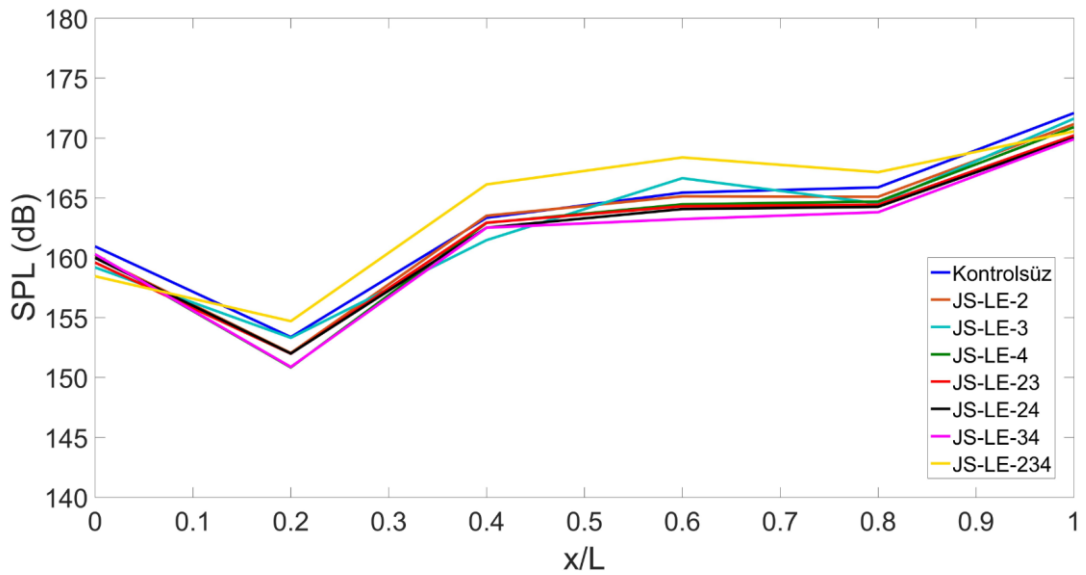
Şekil 5.24'teki ön duvar ses basınç seviyesi grafiğinde hava vakumlamanın gerçekleştirildiği jet deliklerinin etrafında ani ses basınç seviyesi düşürümleri göze çarpmaktadır. Vakumlamalar ön duvardan gerçekleştiği için ön duvar ses basınç seviyeleri ile sonuç yorumlamak sağlıklı olmasa da en düşük ses basınç seviyelerinin JS-LE-234 simülasyonunda gözlemlendiği anlaşılmaktadır.

Şekil 5.25'e göre alt duvar boyunca JS-LE-234 simülasyonu dışındaki bütün kontrollü simülasyonlarda kontrolsüz simülasyona göre ses basınç seviyesi düşürümleri elde edilmektedir. Alt duvarın ilk ve son noktası dışında JS-LE-234 simülasyonunda kontrolsüz simülasyondan 4-5 dB daha yüksek değerler gözlenmektedir. En düşük ses

basınç seviyelerine kontrolsüz simülasyon ile 2-3 dB fark ile JS-LE-34 simülasyonunda rastlanmaktadır.



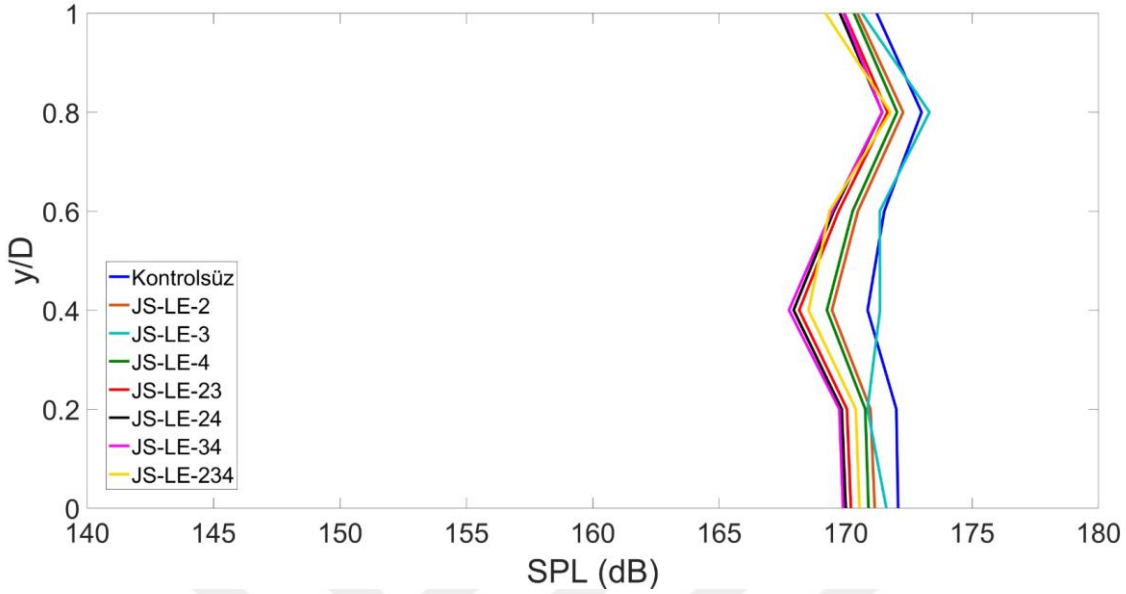
Şekil 5. 24 : JS-LE ön duvar SPL-konum grafiği



Şekil 5. 25 : JS-LE alt duvar SPL-konum grafiği

Şekil 5. 26'daki arka duvar ses basınç seviyeleri incelendiğinde JS-LE-3 dışındaki bütün simülasyonlarda ses basınç seviyesi dağılımının kontrolsüz simülasyon ile benzer olduğu anlaşılmaktadır. Bütün kontrollü simülasyonlarda ses basınç seviyesi düşürümü elde edilebilmektedir. Sadece kavite ön duvarının ortasından vakumlamanın gerçekleştirildiği JS-LE-3 simülasyonunda bazı konumlarda kontrolsüz durumu aşan

değerin görüldüğü farkedilmektedir. En düşük ses basınç seviyeleri 3 dB civarında bir düşürümle JS-LE-34 simülasyonunda görülmektedir.

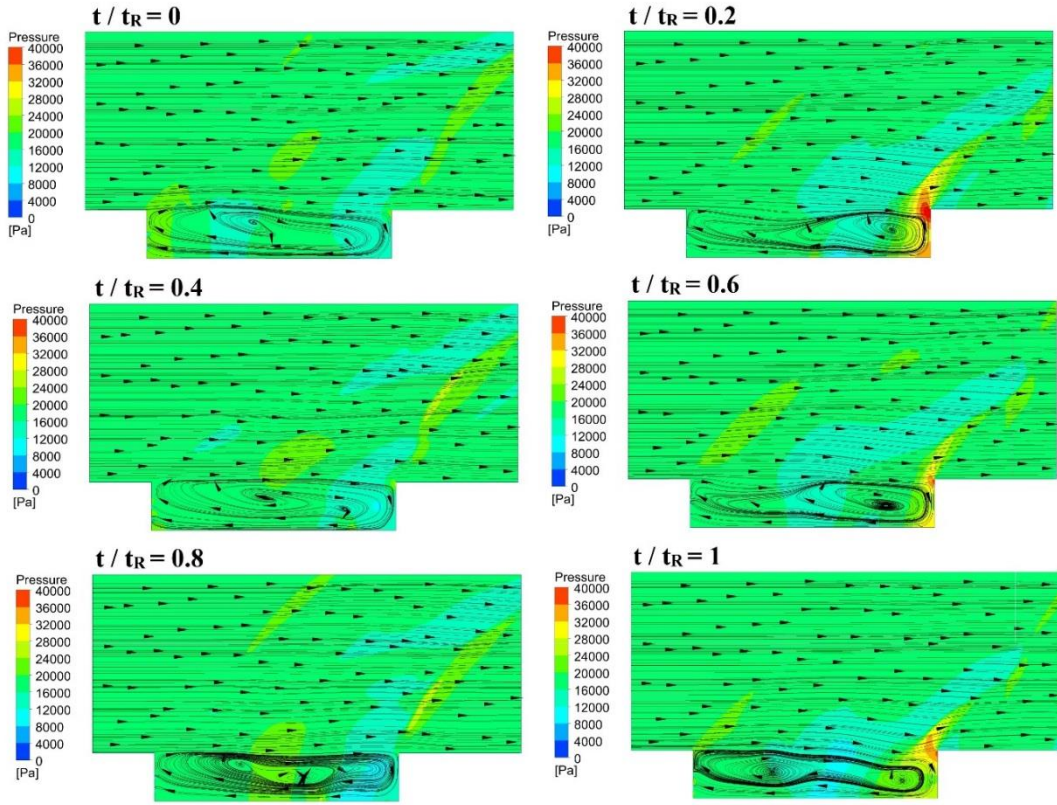


Şekil 5. 26 : JS-LE arka duvar SPL-konum grafiği

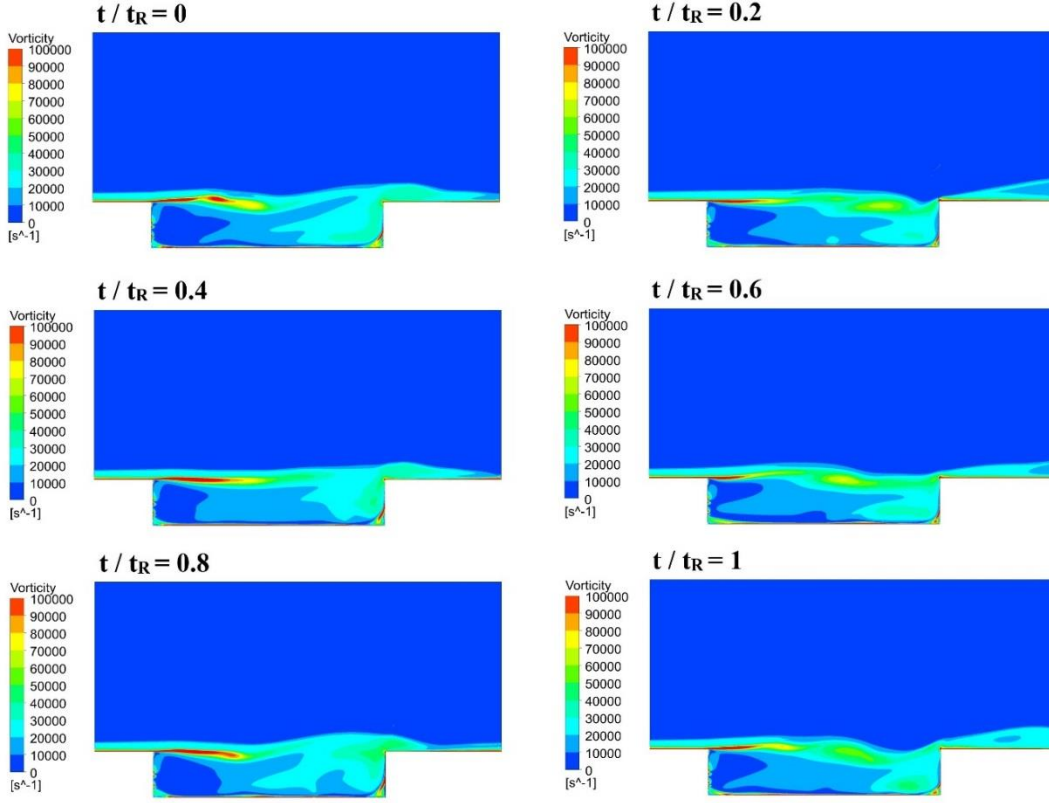
Kavite ön duvarından hava vakumlanın yapıldığı simülasyonlarda her bir kavite duvarında ses basınç seviyesi düşürümleri elde edilmiştir. Vakumlamanın ön duvardan yapıldığı göz önünde tutulup alt ve arka duvarlardaki durum incelendiğinde en etkin sonuçların JS-LE-34 simülasyonunda gözlemlendiği anlaşılmıştır.

JS-LE-34 simülasyonu için bir periyot boyunca değişen basınç dağılımı ve akım çizgileri Şekil 5.27'de gösterilmiştir. Kontrolsüz simülasyona göre yüksek basınç dalgaları azaltılsa da kavite arka duvarında oldukça yüksek basınç değerleri gözlenmektedir. Arka duvar etrafındaki yüksek basınçlı bölgenin alanı kontrolsüz simülasyona kıyasla daha büyüktür. JS-LE çalışmasında kavite ön duvarından vakumlama yapılarak arka duvardan ön duvara ilerleyen dalgaları etkilemek amaçlanmaktadır. JS-LE-34 simülasyonunda akım çizgileri incelendiğinde bu durumun gerçekleştiği görülmektedir. Girdap yapıları ön duvardaki vakum etkisiyle değişmiş ve bütün kavite boyunca dolanan büyük bir girdap yapısını meydana getirmiştir. Bu yapının içinde bir periyodun farklı anlarında daha küçük girdaplar oluşsa da büyük tek girdap yapısı periyot boyunca korunmaktadır.





Şekil 5. 27 : JS-LE-34 simülasyonu akış alanında basınç dağılımı ve akım çizgileri JS-LE-34 simülasyonunda kayma tabakası ve girdap yapılarındaki değişimi anlamak amacıyla bir periyot için vortisite dağılımları Şekil 5.28’de verilmiştir. JS-LE-34 simülasyonunda kontrolsüz simülasyona kıyasla kayma tabakasının salınımlı yapısında hafif bir sönümlenme elde edildiği görülmektedir. Bütün kavite uzunluğu boyunca dolanan büyük girdap yapısının etkisi ile kavite içindeki vortisite değerlerinde artış gözlenmektedir. Ek olarak hava vakumlamanın gerçekleştirildiği deliklerin etrafında yüksek vortisite değerleri oluşmaktadır.



Şekil 5. 28 : JS-LE-34 simülasyonu akış alanında vortisite dağılımı

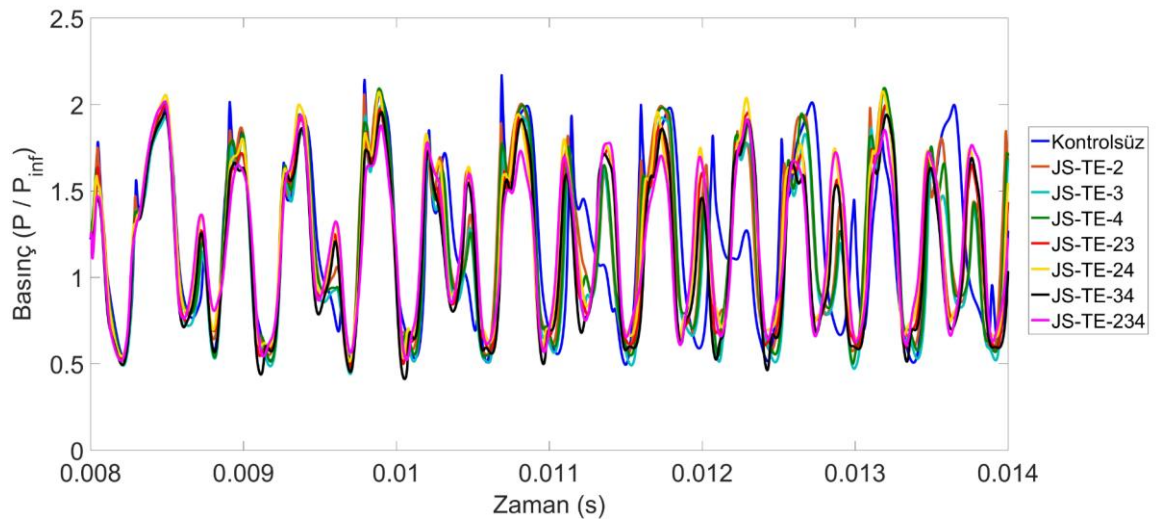
### 5.2.3 Kavite arka duvarındaki jet deliklerinden hava vakumlama simülasyonları

Kayma tabakası ile arka duvarın etkileşimi ile kavite arka duvarında oldukça yüksek basınç değerleri gözlenmektedir. JS-TE olarak isimlendirilen çalışmada kavite arka duvarında gözlenen yüksek basınç değerlerini düşürmek amacıyla arka duvarda konumlandırılmış eşit aralıklı jet deliklerinden farklı kombinasyonlarda sürekli hava vakumlama yapılmıştır. Hava vakumlama işlemine akış periyodikleştikten sonra başlanmış olup altı periyot boyunca sürekli vakumlama gerçekleştirilmiştir. Vakum yapılan delikler ve buna karşılık gelen simülasyon adlandırmaları Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5. 3 : JS-TE Simülasyonları

	Delik 2	Delik 3	Delik 4
JS-TE-2	açık	-	-
JS-TE-3	-	açık	-
JS-TE-4	-	-	açık
JS-TE-23	açık	açık	-
JS-TE-24	açık	-	açık
JS-TE-34	-	açık	açık
JS-TE-234	açık	açık	açık

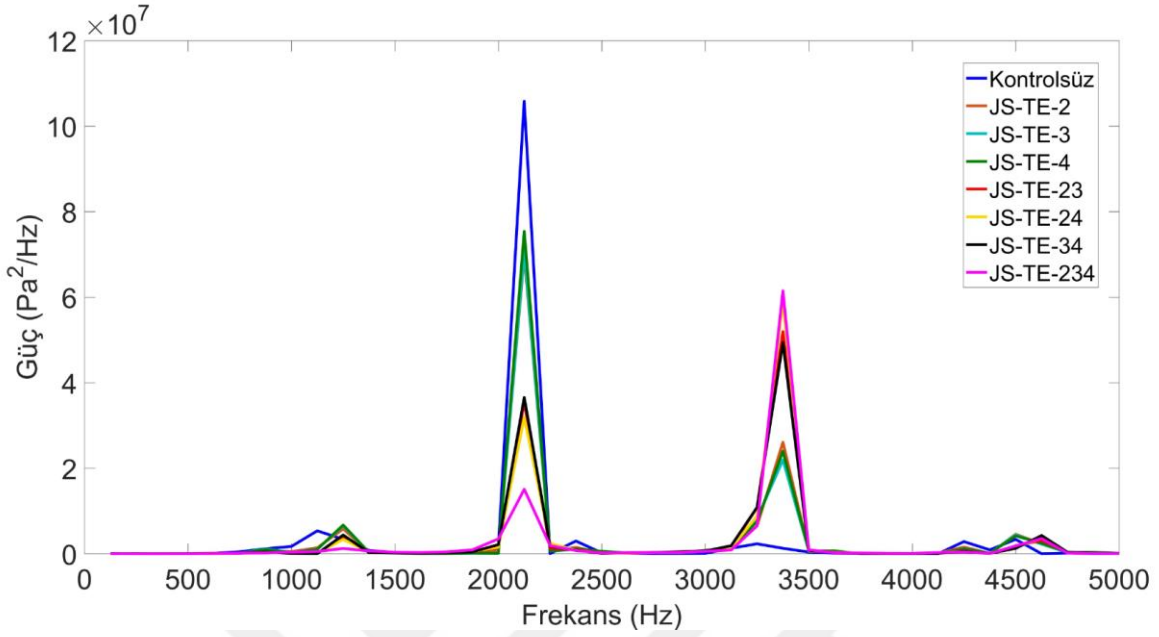
JS-TE simülasyonları için arka duvardaki kritik noktadan elde edilen basınç-zaman grafiği Şekil 5.29'da verilmiştir. Vakumlama süresi uzadıkça kontrollü simülasyonların basınç salınımları kontrolsüz simülasyon salınımindan farklılaşmaya başlamaktadır. Basınç genliklerindeki en fazla düşürüm JS-TE-234 simülasyonunda elde edilmiştir.



Şekil 5. 29 : JS-TE kritik nokta basınç-zaman grafiği

JS-TE simülasyonlarında kritik noktadan elde edilen basınç verilerine FFT uygulanarak oluşturulan güç frekans grafiği Şekil 5. 30'da gösterilmiştir. İlk üç mod frekansı bütün kontrollü simülasyonlarda aynı iken modlara karşılık gelen güç değerleri değişiklik göstermektedir. Kontrollü simülasyonlarda ikinci mod frekansı kontrolsüz simülasyon frekansına eşittir. Birinci ve üçüncü modlarda ise kontrolsüz simülasyon frekansına oldukça yakın değerler elde edilmektedir. Kontrollü simülasyonlarda ikinci modun gücü düşürülürken, üçüncü modun gücünde artış gözlenmektedir. İlk iki modda en düşük güç değerlerinin görüldüğü JS-TE-234

simülasyonunda üçüncü modun gücünün diğer simülasyonlardan daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir.

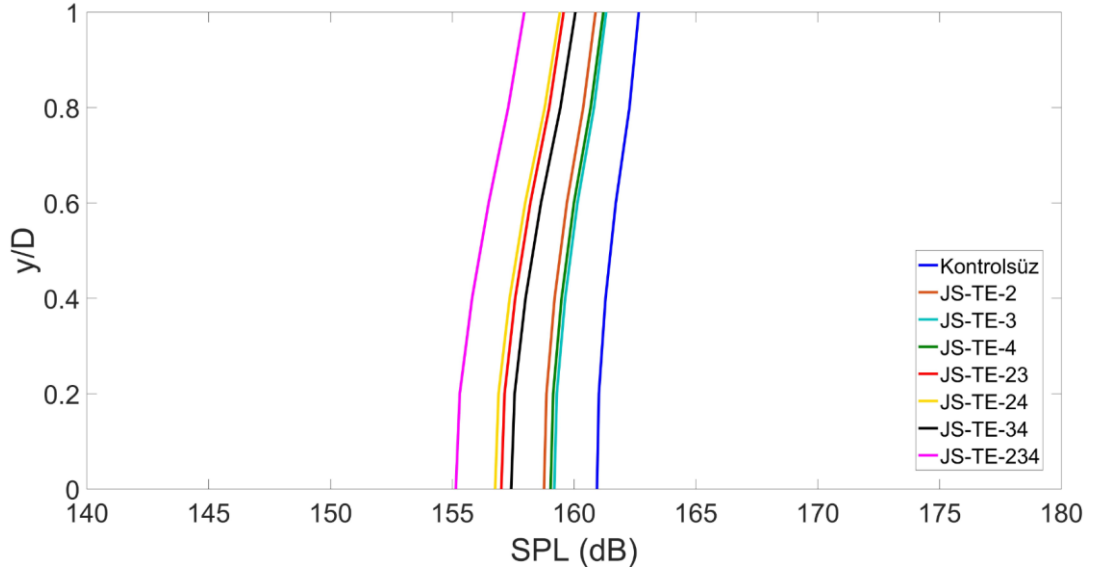


Şekil 5. 30 : JS-TE kritik nokta güç-frekans grafiği

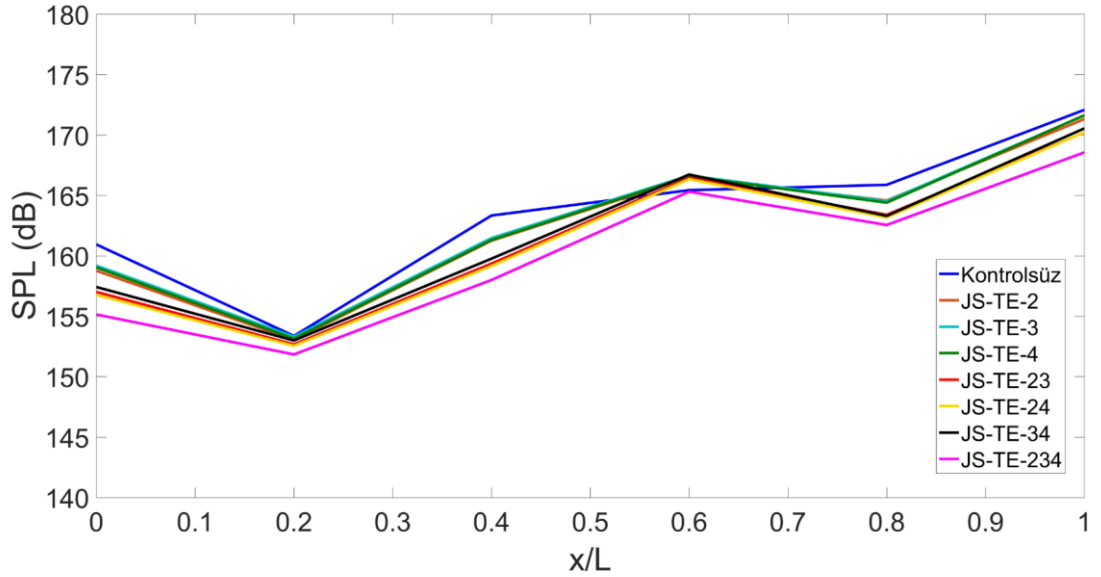
Kavite arka duvarından hava vakumlama gerçekleştirilen simülasyonlarda ön duvar, alt duvar ve arka duvar üzerinde gözlenen ses basınç seviyeleri sırasıyla Şekil 5.31, Şekil 5.32 ve Şekil 5.33'te gösterilmektedir.

Şekil 5.31'deki ön duvar ses basınç seviyeleri incelendiğinde kavite arka duvarından hava vakumlama yapılarak ön duvar ses basınç seviyelerinin düşürülebildiği anlaşılmaktadır. Tek delikten vakumlamaların yapıldığı JS-TE-2, JS-TE-3 ve JS-TE-4 simülasyonlarında 2-3 dB ses basınç seviyesi düşümü elde edilmekte iken iki delikten vakumlamaların gerçekleştirildiği JS-TE-23, JS-TE-24 ve JS-TE-34 simülasyonlarında 4 dB'ye yakın düşüşler gözlenmektedir. En düşük ses basınç seviyelerinin elde edildiği ve üç delikten de hava vakumlanın gerçekleştirildiği JS-TE-234 simülasyonu ile kontrolsüz simülasyon arasındaki fark 5-6 dB civarındadır.

Şekil 5. 32'deki alt duvar ses basınç seviyesi grafiğine göre kontrollü simülasyonlarda  $x/L=0.6$  noktası dışındaki bütün noktalarda kontrolsüz simülasyondan düşük ses basınç seviyeleri elde edilmektedir. Tek delikten ve iki delikten vakumlamaların yapıldığı simülasyonların sonuçları kendi aralarında birbirlerine oldukça yakındır. JS-TE-234 simülasyonunda en düşük ses basınç seviyeleri elde edilirken kontrolsüz simülasyon değerleriyle fark 4-5 dB civarındadır.

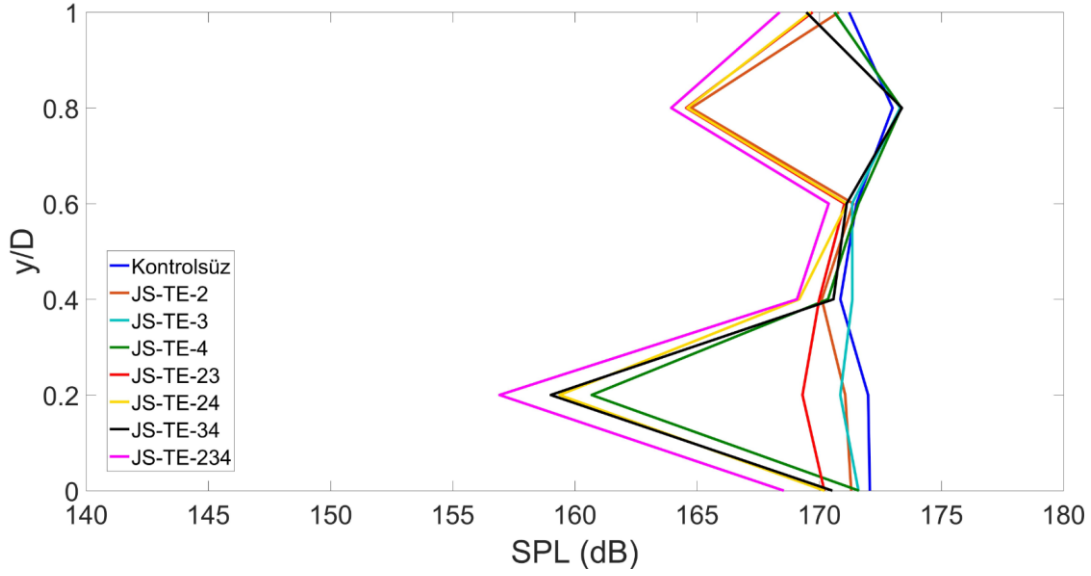


Şekil 5. 31 : JS-TE ön duvar SPL-konum grafiği



Şekil 5. 32 : JS-TE alt duvar SPL-konum grafiği

Şekil 5.33'teki arka duvar ses basınç grafiğinde vakumlama işlemlerinin gerçekleştirildiği delik konumlarına yakın olan noktalarda ani ses basınç seviyesi düşümleri gözlenmektedir. Bu bölgelerdeki değerler göz önünde tutularak doğru yorumlamanın yapılması mümkün değildir. Diğer duvarlarda olduğu gibi arka duvarda da en düşük ses basınç seviyeleri JS-TE-234 simülasyonunda elde edilmektedir.

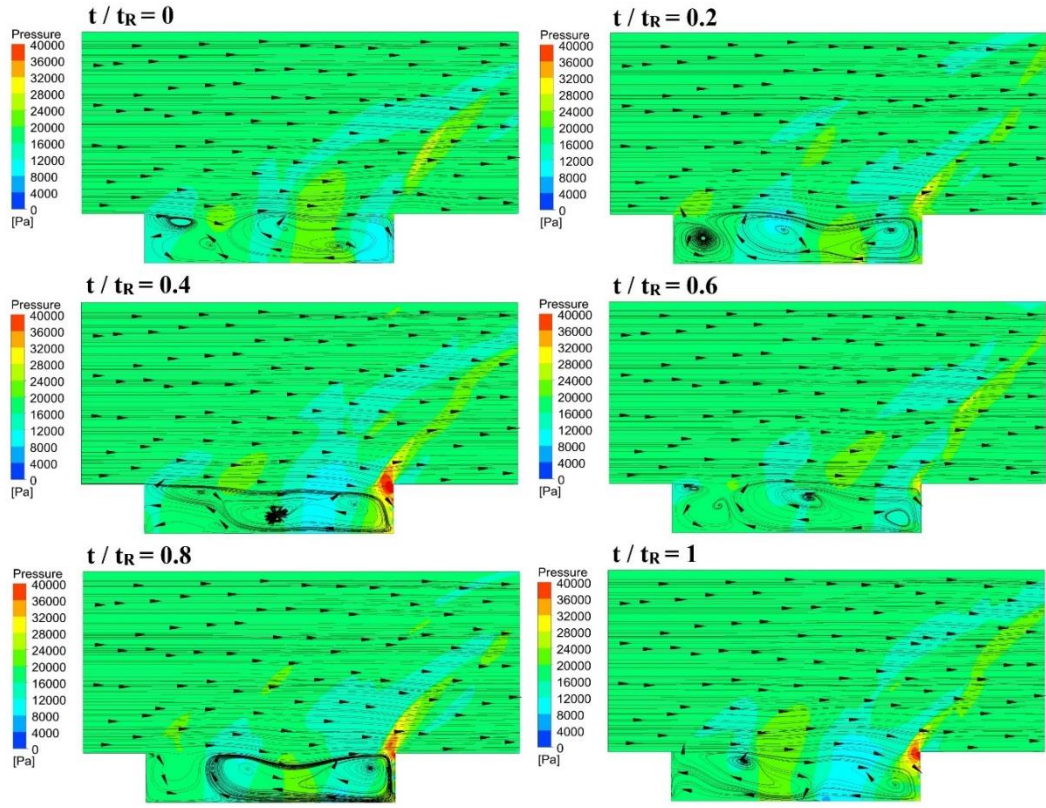


Şekil 5. 33 : JS-TE arka duvar SPL-konum grafiği

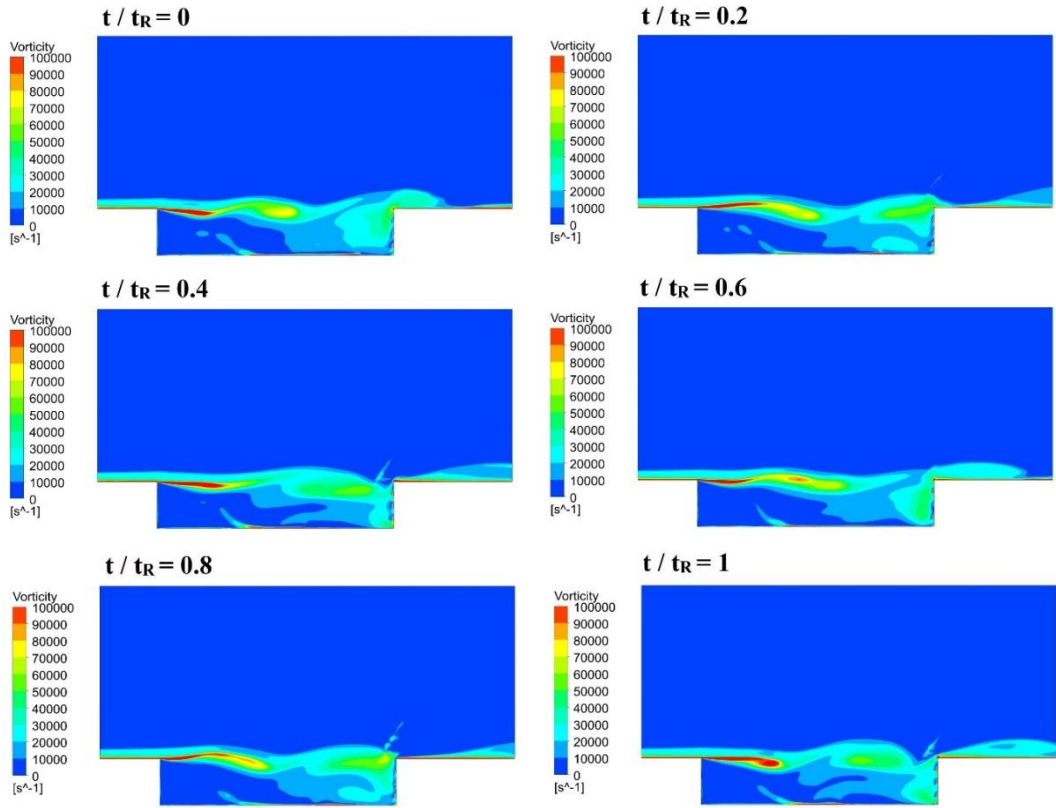
Kavite arka duvarında sürekli hava vakumlamanın gerçekleştirildiği simülasyonlarda bütün kavite duvarlarında ses basınç seviyesi düşürümleri elde edilmiştir. Tek delikten ve iki delikten vakumlamaların yapıldığı simülasyonlar kendi aralarında benzer sonuçlar vermiştir. Bütün kavite duvarlarında en düşük ses basınç seviyeleri JS-TE-234 simülasyonunda gözlenmiştir.

Kavite duvarlarında en yüksek ses basınç seviyesi düşürümlerinin elde edildiği JS-TE-234 simülasyonu JS-TE çalışmasında en etkin simülasyon olarak seçilmiştir. JS-TE-234 simülasyonunda bir periyot boyunca akış alanındaki basınç dağılımı ve akım çizgileri Şekil 5. 34'te gösterilmiştir. Şekil 5.34'e göre vakumlama işleminin etkisiyle akış alanındaki yüksek basınç dalgaları hafifletilse de arka duvar üzerinde gözlenen basınç değerlerinde artış gözlenmektedir. Ek olarak kavite çıkışından ilerleyen yüksek basınçlı dalganın güçlenmesi dikkat çekmektedir. Kontrolsüz simülasyona göre girdap yapılarında değişme gerçekleşmektedir. Ek olarak girdap oluşumlarının çok gevşek ve çok yoğun yapıda olduğu anlara rastlanmaktadır.

JS-TE-234 simülasyonu için akış alanında bir periyot boyunca farklı anlarda gözlenen vortisite dağılımları Şekil 5.35'te verilmiştir. Kontrolsüz simülasyondaki kayma tabakasının JS-LE-234 simülasyonunda değiştiği ve vortisite değerlerinin arttığı gözlenmektedir. Arka duvar üzerindeki deliklerden yapılan vakumlamanın etkisiyle arka duvar etrafında vortisite değerlerinin arttığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5. 34 : JS-TE-234 simülasyonu akış alanında basınç dağılımı ve akım çizgileri



Şekil 5. 35 : JS-TE-234 simülasyonu akış alanında vortisite dağılımı

### 5.3 Aktif Kontrol Yöntemleri Hakkında Yorumlar

Kavite akışının aktif yöntemlerle kontrolü için kavite girişinde ve kavite duvarlarında belirlenmiş çeşitli konumlardan mikrojetler ve jetlerle hava üfleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Mikrojetlerle hava üfleme çalışmalarında kavite girişinde bir, kavite ön ve arka duvarlarında ikişer olmak üzere toplamda 7 konumdan dik üfleme gerçekleştirilmiştir. Mikrojetlerle üfleme yapılarak basınç genliklerinde artış ve azalış yakalanabildiği anlaşılmıştır. Mikrojetler ile hava üfleme gerçekleştirilerek kontrolsüz simülasyonda kavite duvarlarında gözlenen ses basınç seviyelerini düşürmenin ya da yükseltmenin mümkün olduğu anlaşılmıştır. Bütün kavite duvarlarında en yüksek ses basınç seviyesi düşürümü 3-4 dB civarındadır. En az noktadan üfleme yapılarak en etkin sonuçlara ulaşılan simülasyon kavite girişinden mikrojetlerle hava üflemenin yapıldığı MJB-1 simülasyonu olmuştur. MJB-1 simülasyonunda akış alanındaki basınç dağılımı genel olarak kontrolsüz simülasyona benzese de yüksek basınçlı dalgaların hafiflediği ve kavite arka duvarının etrafındaki basınç değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. Ek olarak girişte üfleme yapılan konumun üzerinde basınç değerleri artmıştır. Akım çizgileri incelendiğinde kontrolsüz durumdakinden daha gevşek yapılı girdapların oluştuğu ve küçük yapılı girdapların sayısında artış olduğu anlaşılmıştır. Vortisite dağılımı incelendiğinde girişten üfleme yapılarak kayma tabakası salınımları daha periyodik hale getirildiği görülmüştür.

Mikrojetlerle hava üfleme işleminde mikrojet deliklerinin mikrometre boyunda olması sebebiyle gerçek zamanlı akış kontrolünde sıkıntılar oluşabileceği düşünülmüş ve çalışmanın geri kalanında jetlerle üfleme gerçekleştirilmenin etkisi araştırılmıştır.

Jetlerle akış kontrolü çalışmalarında öncelikle mikrojetlerle üfleme yapılan MJB çalışmasında en etkin sonuçların elde edildiği giriş konumunda yoğunlaşmıştır. Girişteki jet deliğinden farklı açılarda hava üfleme gerçekleştirilerek üfleme açısının akışa etkisi incelenmiştir. 6 farklı üfleme açısının denendiği çalışmada üfleme açısı düşürüldükçe akış kontrolünün etkinliği yitirilmiştir. En iyi sonuçlara dik üflemenin gerçekleştirildiği JB-1-90° simülasyonunda ulaşılmış ve kavite duvarlarında kontrolsüz simülasyona göre 3-4 dB ses basınç seviyesi düşürümü kaydedilmiştir. MJB-1 simülasyonundaki mikrojet deliklerinin olmadığı jet üfleme simülasyonu olan



JB-1-90° simülasyonu akış alanında basınç dağılımı ve akım çizgileri MJB-1 simülasyonuna oldukça benzemektedir. Dolayısıyla mikrojet deliklerine gerek olmadan jetlerle hava üflemenin akış kontrolü için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Jetlerle akış kontrolü çalışmasının devamında kavite ön ve arka duvarlarına eşit aralıklı üçer jet deliği konumlandırılmış ve bu deliklerden farklı kombinasyonlarda hava vakumlama gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar değerlendirilirken vakumlamanın yapılmadığı duvarlardaki ses basınç seviyeleri üzerine yoğunlaşmıştır.

Kavite ön duvarından vakumlama yapılan JS-LE simülasyonlarında arka duvardan ön duvara doğru ilerleyen dalgaların vakumlanarak kavite içindeki akışta istenmeyen özelliklerin hafifletilmesi amaçlanmıştır. İki delikten ve üç delikten vakumlamaların gerçekleştirildiği simülasyonlarda kontrolsüz simülasyon salınımindan oldukça farklı yapıda salınımlara rastlanmıştır. Tüm deliklerden vakumlama yapılan JS-LE-234 simülasyonunda alt duvarda ses basınç seviyesi artışı olduğu dikkat çekmiştir. Alt ve arka duvarlarda 2-3 dB ses basınç seviyesi düşürümünün elde edildiği JS-LE-34 simülasyonu JS-LE çalışması için en etkin durum seçilmiştir. JS-LE-34 simülasyonunda kavite üzerindeki yüksek basınçlı dalgalar hafiflese de kavite arka duvarı etrafındaki yüksek basınçlı bölge genişlemiş ve kontrolsüz simülasyondan daha yüksek değerler gözlenmiştir. Girdap yapıları ön duvardaki vakumun etkisiyle değişmiş ve bütün kavite boyunca dolanan büyük bir girdap yapısı oluşmuştur. Büyük girdabın içinde periyodun farklı anlarında daha küçük girdap oluşumları gözlene de büyük girdap yapısı periyot boyunca korunmuştur. Vakumlama yapılan deliklerin etrafında yüksek vortisite değerleri gözlenirken kavite içinde de vortisite değerlerinde artış gerçekleşmiştir.

Kayma tabakası ve arka duvarın etkileşimi ile oluşan yüksek basınçlı bölgelerin hafifletilmesi adına arka duvara konumlandırılmış jet deliklerinden vakumlamaların gerçekleştirildiği simülasyonlar JS-TE çalışması olarak adlandırılmıştır. Kontrollü simülasyonlarda arka duvardaki kritik noktada üçüncü modun gücünde kontrolsüz simülasyona göre oldukça yüksek değerler elde edilmiştir. Tek delikten vakumlamaların yapıldığı simülasyonlar kendi aralarında, iki delikten birlikte vakumlamaların gerçekleştirildiği simülasyonlar kendi aralarında tutarlı sonuçlar vermiştir. En etkin sonuçlar tüm deliklerden birlikte vakumlamanın gerçekleştirildiği JS-TE-234 simülasyonundan elde edilmiştir. JS-TE-234 simülasyonunda kontrolsüz

simülasyona göre ön duvarda 5-6 dB civarında düşüşler yakalanırken, bu durum alt duvarda 4-5 dB civarındadır. JS-TE-234 simülasyonunda akış alanının genelinde yüksek basınçlı dalgaların hafifletildiği anlaşılrsa da kavite arka duvarın etrafında kontrolsüz simülasyondan daha geniş bir alanda yüksek basınç değerleri gözlenmiştir. Bu bölgenin devamında kavite çıkışından ilerleyen yüksek basınçlı dalgalar güçlenmiştir. JS-TE-234 simülasyonu ile kontrolsüz simülasyondaki girdap yapılarının değiştirilebildiği anlaşılmış, girdap yapılarının çok yoğun ve çok gevşek olduğu anların olduğu kaydedilmiştir. Delik konumları ve kavite arka duvarı etrafındaki vortisite değerlerinde artış gözlenmiştir.

Kavite duvarlarındaki jet deliklerinden hava vakumlamaların gerçekleştirildiği simülasyonlarda kavite içindeki girdap yapıları oldukça değiştirilmiş ve kavite üzerindeki yüksek basınçlı değerler hafifletilmiştir. Fakat, arka duvar etrafındaki yüksek basınçlı bölgenin alanı kontrolsüz simülasyona göre artmış ve bunun devamında kavite çıkışındaki yüksek basınçlı dalga güçlenmiştir. Girişten hava üflemenin yapıldığı simülasyonlarda kavite üzerindeki yüksek basınçlı bölgede vakumlamanın gerçekleştirildiği simülasyonlardaki kadar etkin bir hafifleme elde edilemese de arka duvar etrafındaki yüksek basınçlı değerler düşürülmüştür. Bu sebeple kavite girişinden hava üflemenin kavite duvarlarından vakumlama yapmaya kıyasla daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır. Jetlerle ve mikrojetlerle üflemenin arasında belirgin farklar olmadığı için jetlerle üflemenin akış kontrolü için yeterli olduğu anlaşılmıştır. Dolayısıyla kavite akışının aktif yöntemlerle kontrolü için en etkin simülasyon JB-1-90° olarak belirlenmiştir.

## 6. DİKGEN AYRIŞTIRMA YÖNTEMİ UYGULAMALARI

Süpersonik kavite akışının kontrolsüz ve kontrollü HAD simülasyonları gerçekleştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Akış dinamiklerinin daha detaylı araştırılması ve akış karakteristiklerinin daha iyi anlaşılması adına iki boyutlu kontrolsüz akışa ve en iyi sonuç veren aktif ve pasif kontrollü akışlara Dikgen Ayırıştırma Yöntemi (DAY) uygulanmıştır. DAY yardımı ile incelenen akışta zamana ve mekana bağlı kipler birbirinden ayrılarak akış dinamikleri daha ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında Yılmaz'ın [81] Matlab [79] programı ile uyumlu olarak hazırladığı DAY kodu düzenlenerek kullanılmıştır. Kullanılan DAY kodu EK 1'de verilmiştir.

İki boyutlu kontrolsüz kavite akışı, arka duvar eğim açısı  $60^\circ$  olan TWI- $60^\circ$  simülasyonundaki akış ve JB-1- $90^\circ$  simülasyonundaki akışa DAY uygulanmıştır. Bu amaçla kavite içindeki akış periyodik hale geldikten sonra bir dizi anlık görüntü için incelemeler yapılmıştır. Her bir zaman adımında kavite içindeki eşit aralıklı noktalardan x-yönündeki hız verisi alınıp, bu hız verilerine DAY uygulanmıştır. DAY uygulama teorisinin detayları Bölüm 2'de verilmiştir.

İki boyutlu kavite akışı düzene oturduktan sonra, 8. ile 14. Rossiter periyoduna denk gelen aralık incelenmek için seçilmiştir. Altı periyoda denk gelen bu aralıkta 6000 anlık görüntü kullanılmıştır. Boyutları 0.12065 m x 0.02381 m olan kavite içindeki akış alanı eşit aralıklı parçalara bölünmüştür. 255x51 'lik bir matris oluşturulmuş ve oluşturulan 13,005 noktadaki x-yönü hız bileşenine DAY uygulanmıştır.

### 6.1 Kontrolsüz Simülasyon DAY Sonuçları

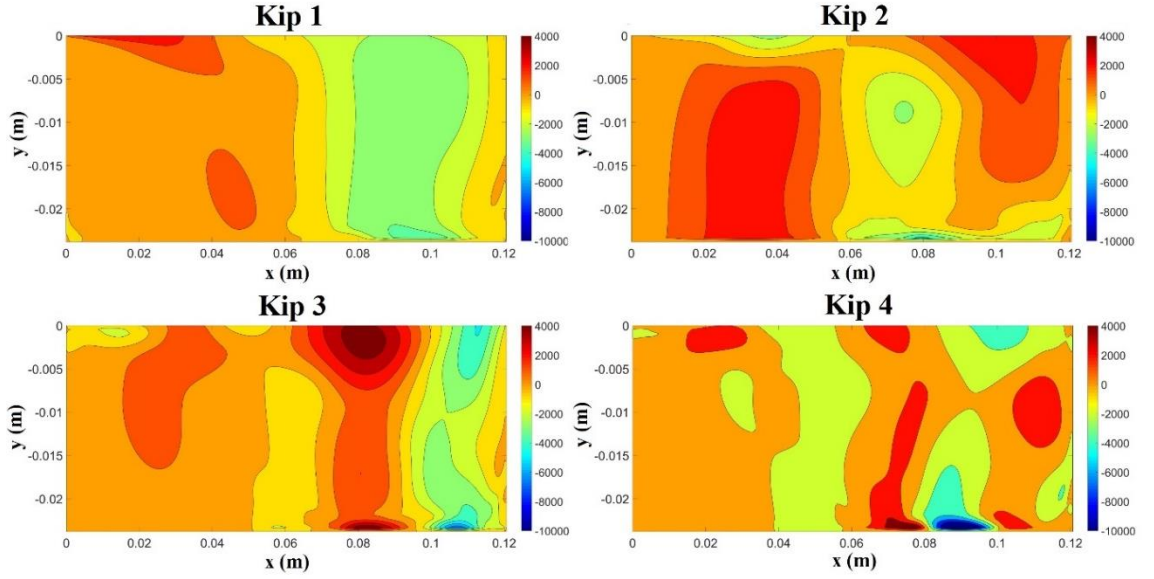
Kontrolsüz simülasyona dikgen ayırıştırma yöntemi uygulanıp akıştaki kipler ortaya çıkarılmıştır. Sistemi yeterli şekilde temsil edebilecek kip sayısını belirlemek için kiplerin barındırdığı enerji içerikleri incelenmiştir. Kontrolsüz simülasyondan elde edilen ilk on iki kipin enerji içerikleri yüzde (%) cinsinden Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Dört kip ile sistemin toplam enerjisinin % 96'lık bir kısmı yansıtılabilirken, on iki kip ile sistemin % 99'u temsil edilebilmektedir. Enerjini büyük bir kısmı ilk iki kip tarafından taşınırken, dördüncü kipten sonra kiplerin enerji içeriği % 1'in altına düşmektedir. İncelen akışın türbülanslı olduğu göz önünde bulundurulduğunda, düşük enerjili kiplerin aslında büyük enerjili girdapların dağılması sonucu oluşan küçük ölçekli yapıları temsil ettiği bilinmektedir. Büyük ölçekli yapılar çeşitli kontrol yöntemleri ile baskılanabilirse küçük ölçekli yapılar hiç oluşmayacaktır. Bu sebeple daha yüksek enerjili kipler üzerine yoğunlaşarak sistemi temsil etmek için ilk dört kipin yeterli olduğu kararlaştırılmıştır.

Çizelge 6. 1: Kontrolsüz Simülasyon DAY Kiplerinin Enerji İçeriği

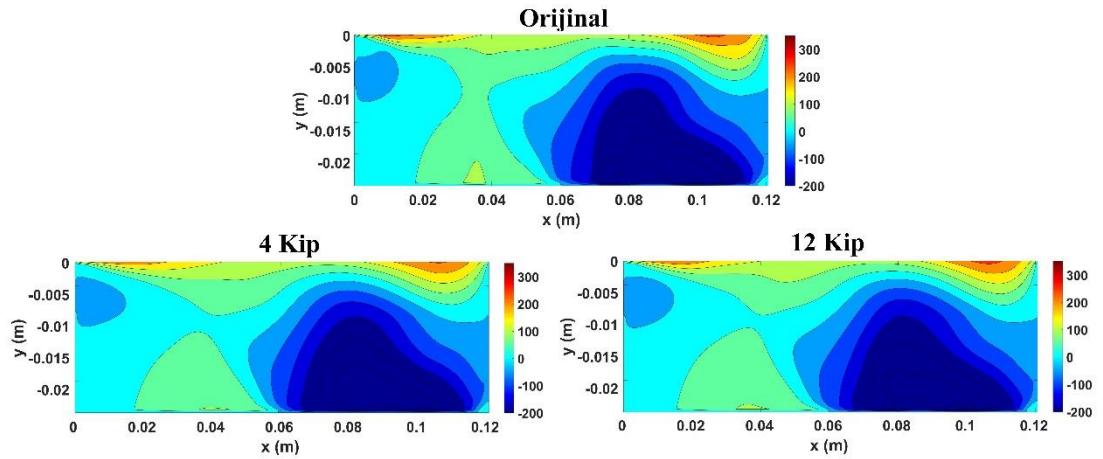
Kip	Enerji İçeriği (%)
1	69.54
2	21.32
3	2.66
4	1.63
5	0.97
6	0.68
7	0.60
8	0.34
9	0.25
10	0.21
11	0.18
12	0.17

Dikgen ayrıştırma sonucu elde edilen en yüksek enerjili ilk dört kip akış içindeki baskın yapıları temsil etmektedir. Baskın yapıların incelenmesi adına ilk dört kipin kavite içinde dağılımları Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Şekil 6.1 incelendiğinde kiplerin karmaşık yapısı göze çarpmaktadır. İlk kipte diğer kiplere göre daha büyük yapılar rastlanırken, dördüncü kipte oluşumlar oldukça küçülmüştür. Enerjinin büyük kısmını taşıyan ilk iki kipte kavitenin ön ve arka duvarlarına yakın büyük girdap yapılarını temsil eden oluşumlar görülmektedir. Kavite tabanının sınırlayıcı etkisi üçüncü ve dördüncü kiplerdeki oluşumlarda açıkça görülmüştür. Kayma tabakasının kavite arka duvara çarpmasının etkisi ikinci kipte diğer kiplere göre daha belirgindir.



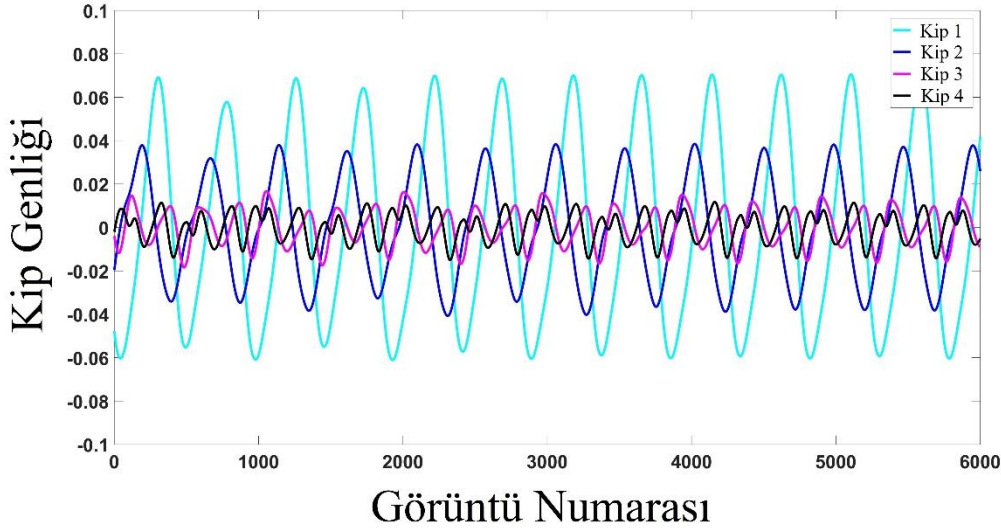
Şekil 6. 1 : Kontrolsüz simülasyon için ilk 4 DAY kipi

Simülasyonun son anı için ilk dört kip ve ilk on iki kip ile sistem yeniden oluşturulmuştur. Oluşturulan yeni sistemlerin HAD analizi sonucu elde edilen orjinal sistem ile x-yönündeki hız dağılımı cinsinden kıyası Şekil 6.2’de verilmiştir. Şekil 6.2’den anlaşıldığı üzere dört kip ile oluşturulan sistem ve on iki kip ile oluşturulan sistem arasında büyük farklar bulunmamaktadır. Dört kip ile ve on iki kip ile yeniden oluşturulan sistemlerin ana sistem ile aralarında belirgin bir fark görünmemektedir. Buradan yola çıkılarak dört kip ile sistemin baskın özelliklerinin yeterli şekilde yansıtılabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 6. 2 : Kontrolsüz simülasyon için akışın son anında x-yönündeki hız dağılımları  
Zaman katsayısı olarak da bilinen kip genlikleri akış içindeki oluşumların zamana bağlı değişim karakteristiklerini içermektedir. Şekil 6.3’te en yüksek enerjili ilk dört

kiye ait kip genlikleri bir arada gösterilmiştir. Kip 1 ve kip 2 yaklaşık eşit periyoda sahip sinüsoidal salınımlar taşırken, kip 3'te ve kip 4'te daha az düzgün salınımlar gözlenmektedir. Enerji içeriğindeki azalma ile paralel bir şekilde kip 1'den kip 4'e doğru gidildikçe salınım genliği düşmektedir. Daha az düzgün salınımına sahip üçüncü ve dördüncü kiplerin enerji içeriği diğer iki kipe göre oldukça düşüktür. Düşük enerjili bu iki kip akıştaki türbülanslı küçük yapıları temsil etmektedir, salınımlarındaki düzensizliğin bu sebeple oluştuğu düşünülmektedir.



Şekil 6. 3 : Kontrolsüz simülasyon kip genlikleri

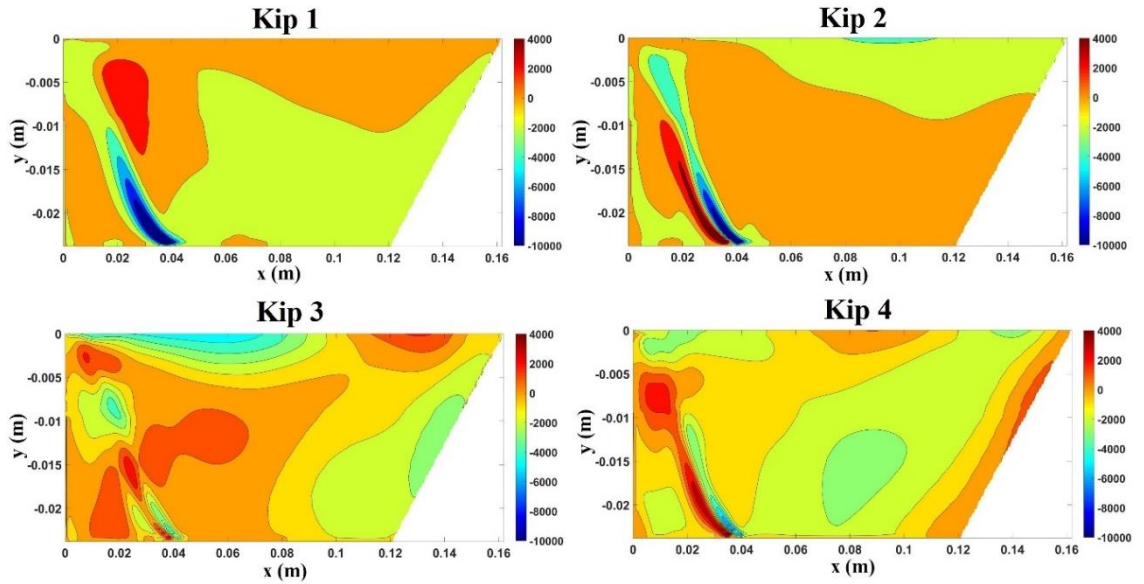
## 6.2 TWI-60° Simülasyonu DAY Sonuçları

Pasif kontrol çalışmalarında en etkin sonuçlar arka duvar eğim açısı 60° olan TWI-60° simülasyonunda elde edilmiştir. TWI-60° simülasyonunda altı periyot boyunca kavite içinden elde edilen x-yönündeki hız bileşenlerine dikgen ayrıştırma uygulanmıştır. Elde edilen kiplere karşılık gelen enerji içerikleri Çizelge 6.2'de gösterilmiştir. TWI-60° simülasyonunda altıncı kipten sonra kip enerjileri oldukça küçülmektedir. Kontrolsüz simülasyonda ilk dört kip ile toplam enerjinin % 95'i taşınabilirken, TWI-60° simülasyonunda sadece ilk kipi enerjisi toplam enerjinin % 95'ine denk gelmektedir. Kontrolsüz simülasyonda dört kip ile sistem karakteristikleri yeterli oranda yansıtılabilirken, pasif kontrollü TWI-60° simülasyonunda tek kip sistem karakteristiklerinin önemli bir kısmını taşımaktadır.

Çizelge 6. 2 : TWI-60 Simülasyonu DAY Kiplerinin Enerji İçeriği

Kip	Enerji İçeriği (%)
1	94.93
2	3.86
3	0.67
4	0.46
5	0.07
6	0.01
7	<0.01
8	<0.01
9	<0.01
10	<0.01
11	<0.01
12	<0.01

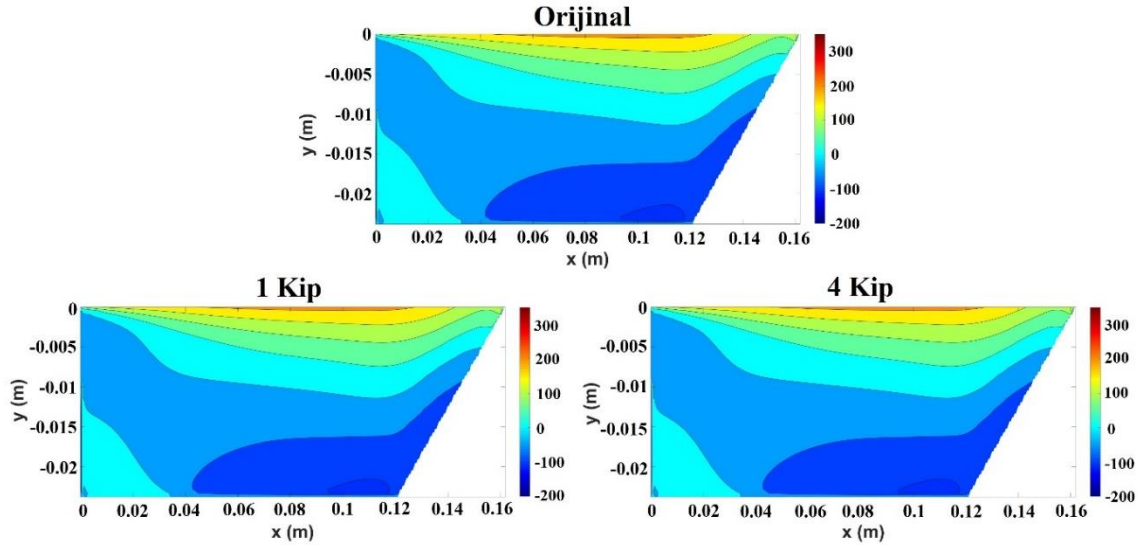
TWI-60° simülasyonundaki en yüksek enerjili ilk dört kipin kavite içindeki dağılımı Şekil 6.5'te verilmiştir. İlk iki kipte kaviteyi domine eden büyük girdap yapısı ile ön duvar ile arka duvarın kesişim bölgesinde oluşan küçük köşe girdabının etkileşim bölgeleri belirgindir. Üçüncü kipte ise kayma tabasının etkileri katmanlı bir yapı ile göze çarpmaktadır. Enerji içerikleri % 1'in altında olan üçüncü ve dördüncü kip dağılımlarında yapıların küçülüp katmanlılaşarak karmaşıklaştığı görülmektedir.



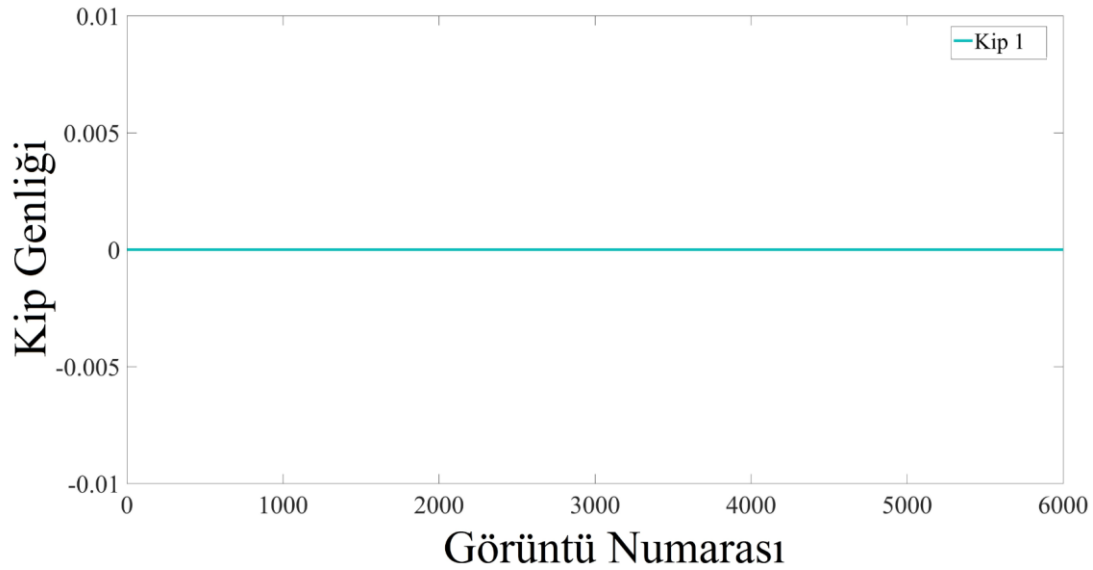
Şekil 6. 4 : TWI-60° simülasyonu için ilk 4 DAY kipi

TWI-60° için simülasyonun son anındaki hız dağılımı en yüksek enerjili ilk kiple ve ilk dört kiple yeniden oluşturulmuş ve orijinal durum ile Şekil 6.6'da bir arada gösterilmiştir. Her iki durumda da orijinal duruma göre belirgin farklar elde

edilmemiştir. Dolayısıyla en yüksek enerjili ilk kip ile sistemin yeterli şekilde temsil edilebildiği sonucuna varılmıştır. HAD simülasyonları sonucunda salınım genliklerinin sönümlendiği anlaşılmıştır. Bu durumla paralel olarak Şekil 6.6'da ilk kipe ait genlik değeri ya da salınım gözlenmemektedir.



Şekil 6. 5 :TWI-60° simülasyonu için akışın son anında x-yönündeki hız dağılımları



Şekil 6. 6 : TWI-60° simülasyonu için ilk kipi genliği

### 6.3 JB-1-90° Simülasyonu DAY Sonuçları

Mikrojetler ve jetler ile aktif kontrolün uygulandığı çalışmalar arasından en etkin çalışma olarak kavite girişinden dik olarak jet üfleme yapılan JB-1-90° simülasyonu

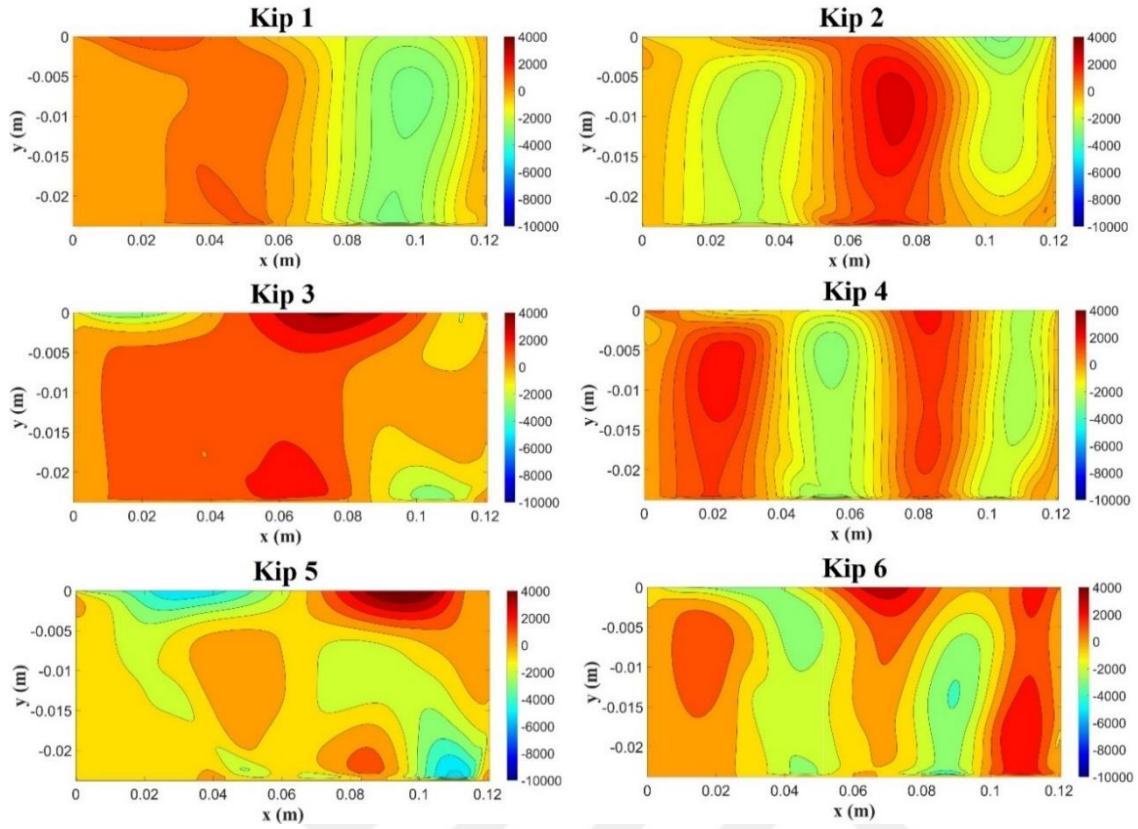


seçilmiştir. JB-1-90° simülasyonunda kavite içinden altı periyot boyunca elde edilmiş x-yönündeki hız verilerine DAY uygulanmıştır. Dikgen ayrıştırma sonucu elde edilen kiplerin enerji içeriği Çizelge 6.3'te verilmiştir. Kontrolsüz simülasyonda toplam enerjinin % 95'i ilk dört kip içinde taşınırken, JB-1-90° simülasyonunda ilk dört kip toplam enerjinin % 90'ını taşımaktadır. JB-1-90° simülasyonunda enerjinin % 95'i ancak ilk altı kip ile taşınabilmektedir. İlk on iki kip içinde ise toplam enerjinin %98'i barındırılmaktadır. JB-1-90° simülasyonunda kontrolsüz simülasyona göre ilk iki kiplerin enerjisi azalmaktadır. Bu azalışla birlikte enerjinin diğer kiplere dağıldığı anlaşılmakta ve diğer kiplerde kontrolsüz simülasyona göre daha yüksek enerji içerikleri görülmektedir.

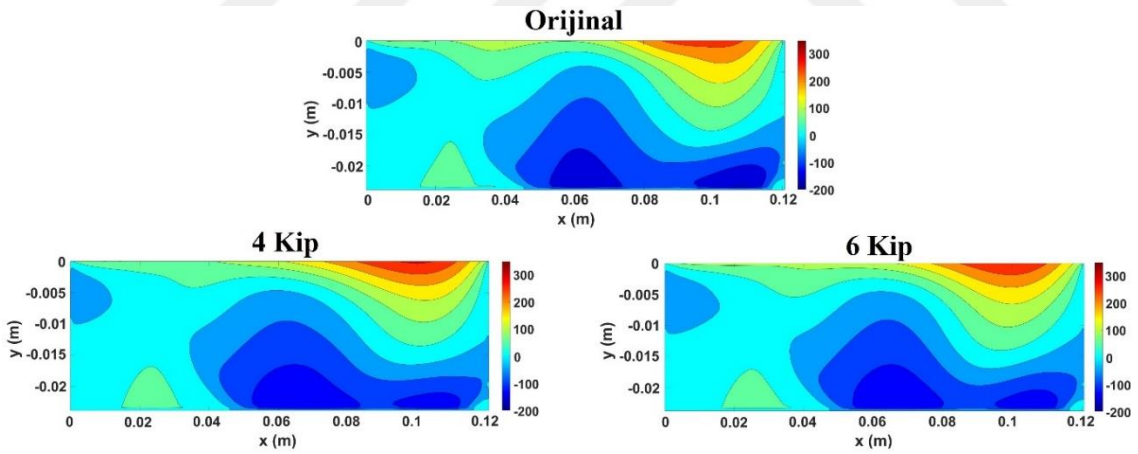
Çizelge 6. 3 : JB-1-90° Simülasyonu DAY Kiplerinin Enerji İçeriği

Kip	Enerji İçeriği (%)
1	59.43
2	16.92
3	8.40
4	5.55
5	2.37
6	1.81
7	1.32
8	1.01
9	0.49
10	0.37
11	0.32
12	0.23

Şekil 6.7'de ilk altı kiplerin kavite içindeki dağılımları gösterilmiştir. İlk üç kiplerin dağılımı kontrolsüz simülasyon kiplerine oldukça benzemektedir. Ancak, kontrolsüz simülasyondaki yoğun ve güçlü yapıların JB-1-90° simülasyonunda yerini katmanlı bir şekilde hafifleyen yapılara bıraktığı görülmektedir. JB-1-90° simülasyonunda kiplerdeki katmanlı yapı kaydeder biçimde artmıştır. İlk dört kip ve ilk altı kip kullanılarak sistem yeniden yapılandırılmış ve simülasyonun son anındaki akış alanı orijinal durum ile Şekil 6.8'de kıyaslanmıştır. Şekil 6.8'e bakıldığında ilk dört kip ve ilk altı kip kullanılarak oluşturulan sistemler birbirine oldukça benzemektedir. Her iki durumda da orijinal durum ile çok belirgin farklar elde edilmemektedir. Toplam enerjinin %95'inin taşındığı ilk altı kiplerin sistemi yeterli şekilde ifade edebileceği sonucuna varılmıştır.

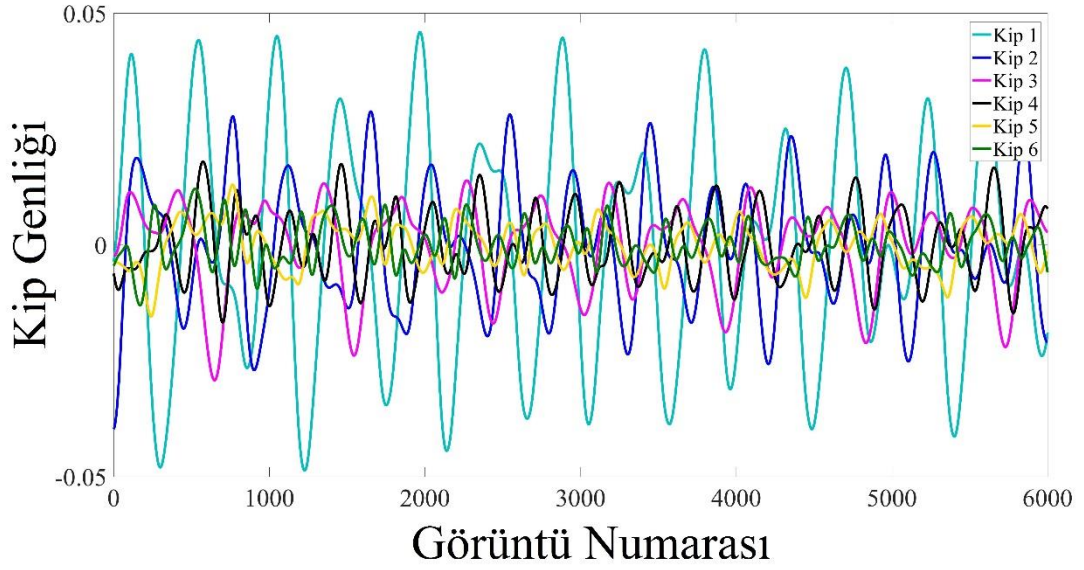


Şekil 6. 7 : JB-1-90° simülasyonu için ilk 6 DAY kipi



Şekil 6. 8 : JB-1-90° simülasyonu için akışın son anında x-yönündeki hız dağılımları

İlk altı kipe ait kip genlikleri Şekil 6.9’da gösterilmiştir. Kip numarası artıp kipi taşıdığı enerji miktarı düştükçe kip genliği de düşmektedir. Kiplerin enerji miktarı düştükçe salınımlar karmaşıklaşmaktadır. İlk iki kip dışındaki kiplerde kontrolsüz simülasyona göre artan kip genlikleri görülmektedir.



Şekil 6. 9 : JB-1-90 simülasyonu kip genlikleri

#### 6.4 DAY Sonuçları Üzerine Yorumlar

1.5 Mach serbest akış hızına sahip ve L/D değeri 5.07 olan kontrolsüz süpersonik kavite akışının, en etkin sonuçları veren pasif ve aktif kontrol durumlarındaki akışların Dikgen Ayırıştırma Yöntemi (DAY) ile düşük mertebeli yeniden modellemeleri yapılmıştır. Düşük mertebeli modellerin oluşturulabilmesi için akış yatışkın rejime ulaşip periyodikleştikten sonraki altı Rossiter periyoduna ait 6000 anlık görüntü kullanılmıştır. 6000 anlık görüntüden kavite içindeki x- yönündeki hız bileşenleri çekilmiş ve bu verilere DAY uygulanmıştır.

Düşük mertebeli sistem modellemesi yapma amacıyla öncelikle kiplerin enerji içerikleri incelenmiş ve sistemi yeniden oluşturmak için kullanılması gerekli kip sayısı belirlenmiştir. En yüksek enerjili kiplerin kavite içindeki dağılımları incelenip akışın barındırdığı önemli oluşumlar ve bu oluşumlara karşılık gelen enerji miktarları incelenmiştir. Ardından yüksek enerjili kipler ile akışın düşük mertebeli yapılandırılmaları gerçekleştirilip orijinal durum ile kıyaslanmış ve her bir durum için akışı yeterli oranda temsil edebilecek en az kip sayısı belirlenmiştir. Son olarak belirlenen kiplere ait kip genlikleri incelenmiştir.

Kontrolsüz simülasyonda en yüksek enerjili ilk dört kip sistemin toplam enerji içeriğinin % 96'sını taşırken, ilk on iki kip ile sistemin toplam enerjisinin % 99'u

temsil edilebilmektedir. İlk dört kipin kavite içindeki dağılımı incelendiğinde kip enerjisi azalıp kip numarası büyüdüğünde oluşumların yapılarının küçüldüğü ve kavitenin çeşitli bölgelerine dağılarak düzensizleştiği görülmüştür. Gözlenen küçük ve düzensiz yapıların türbülanslı akışta büyük girdapların dağılması ile oluşan daha küçük girdapları temsil ettiği düşünülmektedir. En yüksek enerjili ilk dört kip ve ilk on iki kip ile akış yeniden modellenip ve son ana ait hız dağılımları orijinal durumla kıyaslandığında modellerin orijinal durumla oldukça benzer sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. İlk dört kip ile kontrolsüz kavite akışının yeterli oranda temsil edilebildiği sonucuna varılmıştır. İlk dört kipin genlikleri incelendiğinde kip genliklerinin kipin barındırdığı enerji ile doğru orantılı olduğu görülmüştür. Kip numarası artıp kip enerjisi düştükçe kip genlikleri düşmüş, salınımlar düzensizleşmiştir. Bu durum türbülanslı küçük girdapların düzensiz hareketleri ile uyumlu bulunmuştur.

En etkin pasif kontrol simülasyonu seçilen TWI-60° simülasyonunda en yüksek enerjili ilk kip toplam sistem enerjisinin yaklaşık %95'ini taşıdığı için sistemin tek kip ile yeterli oranda modellenebileceği sonucuna varılmıştır. Üçüncü kipten itibaren kip enerjileri toplam enerjinin % 1'inin altına düşmüştür. HAD sonuçlarına göre kaviteyi domine eden büyük bir girdaba ek olarak kavitenin ön köşesinde daha küçük yapı bir girdap oluşumu bulunmaktadır. DAY kiplerinin dağılımı incelendiğinde bu iki girdabın etkileşim bölgesindeki oluşumlar dikkat çekmiştir. Kip enerjileri düştükçe küçük yapı oluşumların ve katmanlı yapının arttığı görülmüştür. En yüksek enerjili kip ile sistem yeniden modellenip simülasyonun son anındaki hız dağılımı çizildiğinde orijinal durum ile neredeyse aynı dağılım elde edilmiştir. HAD simülasyonlarından elde edilen sonuçlarda basınç salınımlarının sönümlenmesi ile uyumlu olarak kip genliklerinde salınım gözlenmemiştir.

En etkin sonuçlar veren aktif kontrol simülasyonu JB-1-90° simülasyonunda ilk dört kipte toplam enerjinin %90'ı, ilk altı kipte ise toplam enerjinin %95'i barındırılmaktadır. İlk iki kipe karşılık gelen enerji değerleri kontrolsüz simülasyona göre düşük iken diğer kiplerde kontrolsüz simülasyona kıyasla daha yüksek enerji değerlerine rastlanmıştır. Kavite girişinden jet üflemenin yapıldığı simülasyonda kontrolsüz simülasyonda ilk iki kipte barındırılan yüksek enerjinin diğer kiplere aktarıldığı anlaşılmıştır. JB-1-90° simülasyonunda ilk üç kipin kavite içindeki

dağılımları kontrolsüz simülasyona oldukça benzemekle birlikte katmanlı yapıda artış dikkat çekmiştir. Kontrolsüz simülasyondaki güçlü yapılar JB-1-90° simülasyonunda katmanlı bir şekilde hafiflemiştir. İlk dört ve ilk altı modla kavitenin yeniden modellenmesi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar birbirine oldukça yakın bulunmuştur. İki durumda da kontrolsüz simülasyona oldukça yakın sonuçlar elde edilse de toplam enerjinin % 95'i ilk altı kip ile taşındığı için sistemi modellemek için en yüksek enerjili ilk altı kipi gerektiği sonucuna varılmıştır. Kip genlikleri incelendiğinde kiplerin enerjisi düştükçe kip genliklerinin de düştüğü görülmüştür. Enerjilerle uyumlu olarak ilk iki kip dışındaki kiplerde kontrolsüz simülasyondakilerden yüksek genlikler elde edilmiştir.

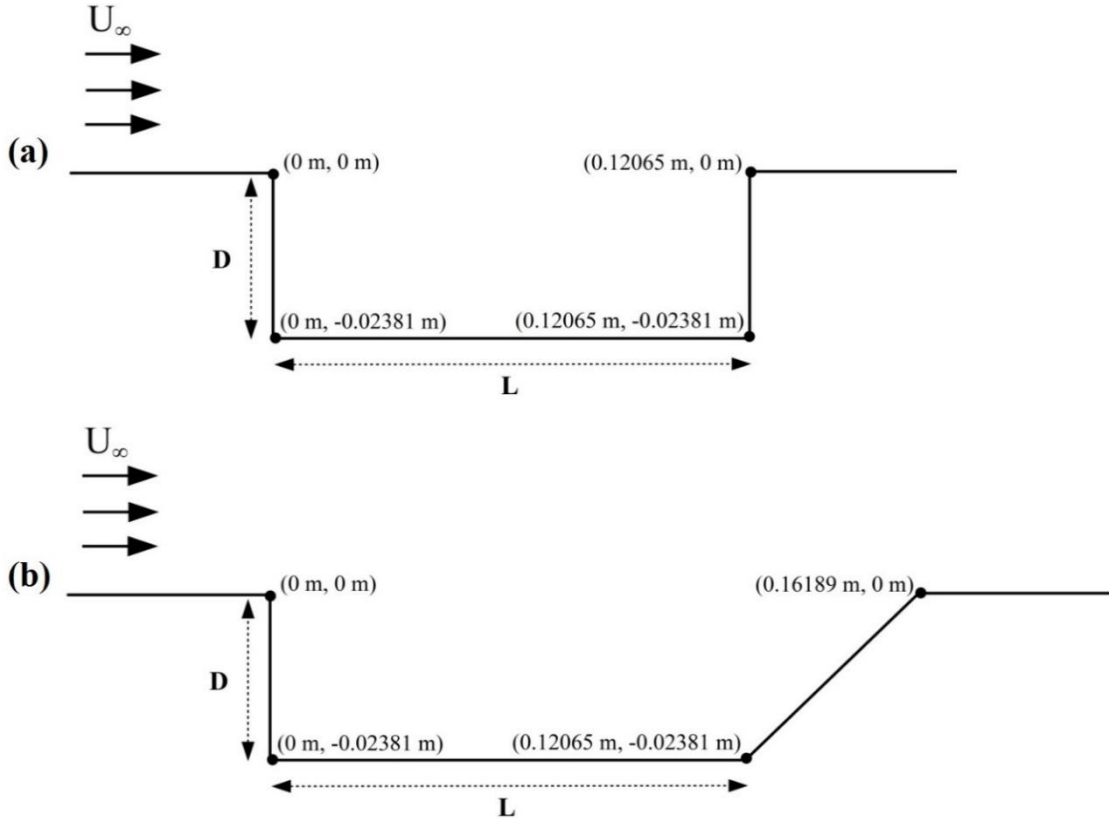
Sonuçlar değerlendirildiğinde pasif ve aktif kontrol yöntemleri ile akışın karakteristiğinin değiştirilebildiği anlaşılmıştır. Arka duvara eğim verilerek kayma tabasının arka duvar ile etkileşimi yumuşatılarak akış daha stabil hale getirilmiştir. En etkin pasif kontrolün gözlendiği TWI-60° simülasyonunda akış tek kip ile yeteri kadar ifade edilebilmektedir. Kavite girişinden dik jet üfleme gerçekleştirilerek aktif kontrolün uygulandığı JB-1-90° simülasyonunda ise akışa dışarıdan sürekli enerji verildiği için sistemi yeteri kadar temsil edebilmek için gerekli kip sayısı artmıştır. Sisteme dışarıdan enerji verilen aktif kontrol uygulamalarında enerjinin daha fazla sayıda kipe yayıldığı anlaşılmıştır.



## 7. SENSÖR YERİ BELİRLEME ÇALIŞMALARI

Uçuş sırasında gerçek zamanlı akış kontrolünün yapılabilmesi için doğru ölçümlerin alınmasını ve akışın modellenmesini sağlayacak sensörlerin uçak gövdesine konumlandırılması gerekmektedir. Hava aracının etrafındaki akışın bilgisinin doğru bir şekilde edinilip kontrole duyulan ihtiyacın belirlenmesi ve uygun kontrol yönteminin uygulanması sonucunda beklenen kontrolün gerçekleştiğinin doğrulanması adına optimum sensör yerlerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Dikgen Ayrıştırma Yöntemi enerji içeriğine göre akıştaki kipleri ortaya çıkarmaktadır. En az sayıda sensör konumlandırıp akış özelliklerini modelleyebilmek için DAY kiplerinin minimum ve maksimum noktaları tespit edilmiştir. Bu çalışmada kontrolsüz simülasyon, en etkin pasif kontrol simülasyonu ve en etkin aktif yöntem simülasyonu için kavite duvarlarından elde edilen basınç verilerine bir boyutlu dikgen ayrıştırma uygulanarak her bir simülasyon için akış kontrolü için yeterli en az sayıda sensörün konumlandırılacağı bölgeler belirlenmiştir. Her bir simülasyonda ortak olan bölgeler belirlenip akış kontrolü için nihai sensör noktaları seçilmiştir. Sensör yeri belirleme çalışması kapsamında Yılmaz'ın [81] Matlab [79] programı üzerinde kullanılmak için hazırladığı bir boyutlu DAY kodu düzenlenerek kullanılmıştır. Kullanılan DAY kodu EK 2'de verilmiştir.

Akış periyodikleştikten sonra altı Rossiter periyodu boyunca kavite duvarları üzerindeki eşit aralıklı noktalardan elde edilen basınç verilerine bir boyutlu dikgen ayrıştırma uygulanmıştır. Ön ve arka duvarlarda 51 nokta ile alt duvarda 255 nokta oluşturulmuştur. Noktalar arası uzaklıklar eşittir ve 0.0004762 metreye karşılık gelmektedir. TWI-60° simülasyonunda eğimli arka duvarın uzunluğu diğer simülasyonlardan uzundur ve burada toplam 101 nokta oluşturulmuştur. Çalışma için 8. ile 14. Rossiter periyoduna denk gelen altı periyotluk süre boyunca elde edilen 6000 anlık görüntü kullanılmıştır. Kontrolsüz simülasyon, TWI-60° simülasyonu ve JB-1-90° simülasyonu için kavite geometrisi ve koordinatları Şekil 7.1'de gösterilmiştir.



Şekil 7. 1 : Kavite geometrisi ve koordinatları (a) Kontrolsüz simülasyon ve JB-1-90° simülasyonu, (b) TWI-60° simülasyonu

### 7.1 Kontrolsüz Simülasyon için Sensör Yeri Belirleme Çalışmaları

Kontrol simülasyona dikgen ayrıştırma yöntemi uygulanıp akıştaki kipler ortaya çıkarılmıştır. Sistemi yeterli şekilde temsil edebilecek kip sayısını belirlemek için kiplerin barındırdığı enerji içerikleri incelenmiştir. Kontrolsüz simülasyondan elde edilen ilk dört kiplin enerji içeriği, her kipe ait maksimum ve minimum noktaları Çizelge 6.1’de verilmiştir. Dört kip ile sistemin toplam enerjisinin % 95.55’lik bir kısmı yansıtılabildiği için sistemi temsil edebilmek için ilk dört kiplin yeterli olduğu kararına varılmıştır. Enerjini büyük bir kısmı ilk iki kip tarafından taşınmaktadır. Maksimum ve minimum noktalarının koordinatları incelendiğinde ön duvarda bir, alt duvarda on bir ve alt duvarda beş tane yüksek aktiviteli konum olduğu anlaşılmıştır.



Çizelge 7. 1 : Kontrolsüz Simülasyon için 1 Boyutlu DAY Kiplerinin Enerji İçeriği, Maksimum ve Minimum Noktaları

Kip	Enerji İçeriği (%)	x-koordinatı (m)	y-koordinatı (m)
1	74.04	0.07030	-0.02381
		0.11685	-0.02381
		0.12065	-0.01333
		0.12065	-0.00048
2	15.95	0.05890	-0.02381
		0.08930	-0.02381
		0.11780	-0.02381
		0.12065	-0.00429
3	2.8	0.05558	-0.02381
		0.07125	-0.02381
		0.09215	-0.02381
		0.12065	-0.02381
4	2.4	0.00000	-0.00048
		0.07885	-0.02381
		0.10497	-0.02381
		0.12065	-0.01810
Toplam (%)	95.55	-	-

## 7.2 TWI-60° Simülasyonu için Sensör Yeri Belirleme Çalışmaları

TWI-60° simülasyonunda kavite duvarlarına bir boyutlu dikgen ayrıştırma uygulanarak akıdaki kipler belirlenmiştir. En yüksek enerjili ilk dört kip ve bu kiplerin barındırdığı maksimum ve minimum noktaları Çizelge 7.2’de verilmiştir. İlk dört kipte toplam enerjinin %99.98’inin taşıdığı anlaşılmıştır. TWI-60° simülasyonunda ilk üç kipte kontrolsüz simülasyona kıyasla daha fazla enerjinin barındırılmaktadır. İlk iki kipte enerjinin çok büyük kısmı taşınırken dördüncü kipten itibaren kiplerin enerji içeriği % 1’in altına düşmüştür. Maksimum ve minimum noktaları incelendiğinde ön duvarda iki, alt duvarda dokuz ve arka duvarda beş tane aktif nokta belirlenmiştir.

Çizelge 7. 2 : TWI-60° Simülasyonu için 1 Boyutlu DAY Kiplerinin Enerji İçeriği, Maksimum ve Minimum Noktaları

Kip	Enerji İçeriği (%)	x-koordinatı (m)	y-koordinatı (m)
1	71.52	0.04085	-0.02381
		0.11970	-0.02381
		0.13055	-0.01810
		0.15942	-0.00143
2	20.96	0.00000	-0.01524
		0.03943	-0.02381
		0.12017	-0.02381
		0.15488	-0.00405
3	6.83	0.04180	-0.02381
		0.09025	-0.02381
		0.12017	-0.02381
		0.15034	-0.00667
4	0.67	0.00000	-0.01143
		0.04228	-0.02381
		0.11970	-0.02381
		0.15735	-0.00262
Toplam (%)	99.98	-	-

### 7.3 JB-1-90° Simülasyonu için Sensör Yeri Belirleme Çalışmaları

JB-1-90° simülasyonunda kavite duvarlarından elde edilen basınç verilerine dikgen ayrıştırma uygulanmıştır. Elde edilen en yüksek enerjili dört kip, bu kiplerin maksimum ve minimum noktaları Çizelge 7.3'te gösterilmiştir. İlk dört kip ile toplam enerjinin % 93.36'sı taşınmaktadır. İlk iki kipte kontrolsüz simülasyon ve TWI-60° simülasyonuna kıyasla daha az enerji taşınmaktadır. Aktif kontrol ile ilk kiplerdeki enerjilerin diğer kiplere yayıldığı anlaşılmıştır. Maksimum ve minimum noktaları incelendiğinde ön duvarda bir konum belirlenemezken, alt duvarda on bir ve alt noktada beş konum belirlenmiştir.

Çizelge 7. 3 : JB-1-90° Simülasyonu için 1 Boyutlu DAY Kiplerinin Enerji İçeriği, Maksimum ve Minimum Noktaları

Kip	Enerji İçeriği (%)	x-koordinatı (m)	y-koordinatı (m)
1	72.39	0.07220	-0.02381
		0.11685	-0.02381
		0.12065	-0.01333
		0.12065	-0.00048
2	11.09	0.05700	-0.02381
		0.09215	-0.02381
		0.12065	-0.02381
		0.12065	-0.00476
3	5.06	0.03895	-0.02381
		0.07457	-0.02381
		0.09975	-0.02381
		0.12065	-0.02333
4	4.82	0.02185	-0.02381
		0.08170	-0.02381
		0.11590	-0.02381
		0.12065	-0.01143
Toplam (%)	93.36	-	-

#### 7.4 Nihai Sensör Konumları ve Yorumlar

Gerçek zamanlı akış kontrolü için sensör yeri belirleme çalışması tamamlanmıştır. Bu amaçla kavite duvarlarından elde edilen basınç verilerine bir boyutlu dikgen ayrıştırma uygulanmıştır. Dikgen ayrıştırma ile akış enerji içeriğine göre kiplere ayrıştırılmış ve kiplerde enerjinin aktif olduğu maksimum ve minimum noktaları belirlenmiştir. İlk dört kipte enerjinin aktif olduğu noktalar tespit edilerek uygun sensör konumları belirlenmiştir.

Sensör yeri belirleme çalışması kontrolsüz simülasyon, en etkin pasif simülasyon ve en etkin aktif simülasyon için ayrı ayrı yapılmıştır. Her bir durumdan elde edilen yüksek enerjili konumlar incelenmiş, ortak ya da birbirine yakın konumlar seçilip nihai sensör konumları belirlenmiştir. Nihai sensör konumları Çizelge 7.4'te gösterilmiştir. TWI-60° simülasyonunda arka duvarın eğimi olması sebebiyle sensör konumlarının x-koordinatları farklıdır ve Çizelge 7.4'te ayrı olarak gösterilmiştir. Nihai olarak ön duvarda üç, alt duvarda sekiz ve arka duvarda beş konum sensör yeri olarak belirlenmiştir.

Çizelge 7. 4 : Nihai Sensör Konumları

x-koordinatı (m)	y-koordinatı (m)	konum
0.00000	-0.01524	Ön duvar
0.00000	-0.01143	Ön duvar
0.00000	-0.00048	Ön duvar
0.03895	-0.02381	Alt duvar
0.04180	-0.02381	Alt duvar
0.05890	-0.02381	Alt duvar
0.07125	-0.02381	Alt duvar
0.07885	-0.02381	Alt duvar
0.09215	-0.02381	Alt duvar
0.11685	-0.02381	Alt duvar
0.12065	-0.02381	Alt duvar
0.12065/0.13055	-0.01810	Arka duvar
0.12065/0.1388	-0.01333	Arka duvar
0.12065/0.15364	-0.00476	Arka duvar
0.12065/0.15942	-0.00143	Arka duvar
0.12065/0.16107	-0.00048	Arka duvar

Dikgen ayrıştırma ile kavite duvarlarındaki enerjisi yüksek olan aktif konumların tespiti yapılarak en az sayıda ve verimli olacak şekilde uygun sensör yerleri belirlenmiştir. Sensörler genellikle yüksek basınç değerlerinin gözlemlendiği alt ve arka duvarlarda konumlanmıştır. Bu durum HAD simülasyonlarından elde edilen sonuçlarla da uyumludur. Ön duvarda diğer duvarlara kıyasla yüksek enerjili konumlar bulunmasa da kontrol amaçlı sensör noktaları eklenmiştir.

## 8. DEĞERLENDİRME

Süpersonik kavite akışının temel özelliklerinin incelenmesi, uygun pasif ve aktif kontrol yöntemlerinin araştırılması adına sayısal bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla öncelikle serbest akış Mach sayısı 1.5, L/D değeri 5.07 olan süpersonik kavite akışının iki ve üç boyutlu kontrolsüz HAD simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar literatürdeki deneysel bir çalışma ile doğrulanmıştır. Ardından çeşitli pasif ve aktif kontrol yöntemleri uygulanarak akışın kontrol edilebilirliği araştırılmıştır. Uygulanan pasif kontrol yöntemleri kavite arka duvarına çeşitli eğim açıları verme, kavite girişine çeşitli uzunluklarda plaka ekleme ve kavite duvarlarına engeller yerleştirme iken, aktif kontrol yöntemleri mikrojetler ve jetlerle hava üflemedir. Çalışmada son olarak, akış karakteristiklerinin daha detaylı incelenmesi ve uygun sensör yerlerinin belirlenmesi için Dikgen Ayırıştırma Yöntemi'ne başvurulmuştur.

### 8.1 Sonuçların Değerlendirilmesi

Süpersonik açık kavite akışının özelliklerinin araştırılması için iki ve üç boyutlu HAD simülasyonları tamamlanmıştır. Simülasyonlar sonucunda akışın oldukça karmaşık olduğu, türbülanslı akış alanında basınç salınımlarının ve rezonanslı akustik modların olduğu anlaşılmıştır. Akış kavite girişinde ayrılmaya uğrayıp kendi kendini besleyen kayma tabakasını oluşturmuştur. Kayma tabakasının arka duvarla etkileşimi sonucunda kavite içine kütle girişi gerçekleşmiş, kavite içine ve dışına doğru akustik dalga ilerlemesi gözlenmiştir. Kavite içine giren kütle kavite içinde çeşitli girdapları ve periyodik hareketi oluşturmuş, sonrasında ise kayma tabasını besleyerek kaviteden dışarı çıkmıştır. Kavite ön duvarı, alt duvarı ve arka duvarından başlayan ve serbest akışla ötelenen yüksek basınç dalgaları gözlenmiştir.

İki boyutlu simülasyonlardaki periyodik akış üç boyutlu simülasyonlarda değişmiş ve düzensizleşmiştir. Üç boyutlu simülasyonda iki boyutlu simülasyona göre daha düşük genlikli ve daha karmaşık basınç salınımları gözlenmiştir. Üçüncü boyutun etkisiyle baskın modlara karşılık gelen güç değerleri düşse de frekans değerlerinde belirgin bir

değişim gözlenmemiştir. İki boyutlu simülasyonda baskın mod ikinci mod iken, üç boyutlu simülasyonda ilk modun gücü ikinci moddan daha yüksek çıkmıştır. Alt duvardaki ses basınç seviyeleri incelendiğinde iki boyutlu simülasyon ile deney arasındaki fark yaklaşık % 8 iken, bu fark üç boyutlu simülasyonda % 4'e düşmüştür. Her iki simülasyonun da ses basınç seviyesi dağılım davranışı deneyle tutarlıdır. Akışta üçüncü boyutun etkisinin önemli olduğu anlaşılrsa da iki boyutlu simülasyon ile basınç salınımı, baskın frekanslar gibi akıştaki temel özelliklerin doğru tahmin edilebilmesi sebebiyle iki boyutlu simülasyonun akış incelemesi için yeterli olduğu sonucuna varılmış, aktif ve pasif kontrol uygulamalarında da iki boyutlu simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Akışın pasif yöntemlerle kontrolü amacıyla geometride kalıcı değişimler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle kavite arka duvarına y-eksenine göre hesaplanan dokuz farklı eğim açısı verilmiştir. Eğim açısı arttıkça basınç salınımlarındaki sönümlenme artmış, baskın mod frekanslarında düşüş gözlenmiştir. Eğim açısı arttıkça basınç genlikleriyle paralel olarak kavite duvarlarında gözlenen ses basınç seviyelerindeki düşüş de artmıştır. Özellikle 20°'den 30°'ye geçişte ve 30°'den 35°'ye geçişte yüksek ses basınç seviyesi düşüşleri göze çarpmıştır. En düşük ses basınç seviyelerinin gözlendiği TWI-60° simülasyonu ile kontrolsüz simülasyon arasındaki fark kavite duvarlarında 40 dB'yi aşmaktadır. TWI-60° simülasyonunda akış alanındaki yapıların kontrolsüz simülasyona kıyasla oldukça değiştiği ve özellikle arka duvarda gözlenen yüksek basınç değerlerinin düştüğü anlaşılmıştır. TWI-60° simülasyonunda kaviteyi uzunluk boyunca domine eden büyük bir girdap ve küçük bir köşe girdabı oluşumu gözlenmiştir. İkili girdap yapısı ve basınç dağılımı periyot boyunca belirgin değişimler göstermemiştir. Vortisite dağılımı incelendiğinde kayma tabakasındaki salınımların sönümlendiği anlaşılmıştır.

Kavite akışına uygulanan ikinci pasif kontrol yöntemi ise kavite girişine farklı uzunluklarda plakaların eklenmesidir. Dört farklı uzunluğun incelendiği çalışmada plaka uzunluğuna bağlı bir korelasyon elde edilememiştir. Plaka uzunluğu kavite uzunluğunun sekizde biri olan CP-L/8 simülasyonunda akış karakteristiği birden değişmiş, basınç genliklerinde yüksek sönümlenme ve ses basınç seviyelerinde yüksek düşüşler elde edilmiştir. CP-L/8 simülasyonunda ilk iki baskın moda ait frekans değerleri kontrolsüz simülasyondaki değerlerin yarısına eşit çıkmıştır. Akım çizgileri

incelendiğinde üçlü bir girdap yapısının kavite içine hapsoldüğü ve akış alanında bir periyot boyunca kaydadeğer değişimlerin gözlenmediği anlaşılmıştır. Kontrolsüz simülasyona göre daha düşük basınç değerleri görülse de girişe eklenen plakanın bitişinde yüksek basınç değerlerinin gözlendiği geniş bir alan göze çarpmıştır.

Son pasif yöntem uygulaması kapsamında kavite girişine ve kavite duvarlarına engeller konumlandırılarak akış davranışı değiştirilmeye çalışılmıştır. Farklı kombinasyonlarda engellerin konumlandırıldığı simülasyonlarda kontrolsüz simülasyon ile yakın mod frekansları elde edilirken mod güçlerinde düşüş elde edilmiştir. Arka duvara iki engelin konumlandırıldığı simülasyonda kontrolsüz simülasyona göre 1-2 dB daha yüksek ses basınç seviyeleri gözlenmiştir. Bütün kavite duvarlarında engellerin konumlandırıldığı WS-234 simülasyonu kontrolsüz simülasyonla 4-6 dB fark elde etmiş ve çalışma içinde en etkin sonuçların elde edildiği simülasyon olmuştur. WS-234 simülasyonunda kontrolsüz simülasyona kıyasla büyük yapılı girdaplarda değişme olmakla birlikte engellerin etrafında küçük yapılı oluşumların arttığı kaydedilmiştir. Vortisite dağılımı incelendiğinde kayma tabakasının değişime uğratıldığı anlaşılmıştır.

Kontrollü simülasyon sonuçları değerlendirildiğinde arka duvara eğim vermenin kavite girişine plaka ekleme ve kavite duvarlarına engel ekleme yöntemlerine kıyasla daha etkin bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durumun kavite arka duvarına eğim verilerek kayma tabakasının arka duvarla etkileşiminin hafifletilmesi sebebiyle oluştuğu düşünülmüştür. Bu durum hakkındaki ikinci bir düşünce ise arka duvara eğim vererek kavitenin üst kısmındaki uzunluk değeri arttırıldığı için akışın farklı bir uzunluk/derinlik oranına sahip kaviteye benzer hale gelmiş olabileceğidir. Kavite arka duvarına eğim verilip başka bir istenmeyen etki oluşumu gözlenmeden hem arka duvardaki ses basınç seviyeleri düşürülmüş hem de kavite içindeki karmaşık yapı hafifletilmiştir. Bununla birlikte tasarımın izin verdiği ölçüde arka duvar eğim açısı arttırıldıkça kontrolün daha etkin olacağı ve gözlenen ses basınç seviyelerinin daha düşeceği sonucuna varılmıştır.

Akışı kavite geometrisinde ciddi değişimler yapmadan manipüle etmek istenildiğinde kavite duvarlarına çivi ölçüğünde engeller eklemek oldukça etkili bir uygulamadır. Kavitenin duvarlarına engeller yerleştirilerek kavite içi oluşumların yapısı ve dolayısı ile kendi kendini besleyen kayma tabakasının yapısı değiştirilerek kavite

duvarlarındaki ses basınç seviyeleri düşürülebilmektedir. Daha etkin kontrolün sağlanması için farklı engel boyutlarında, farklı engel sayısında ve farklı engel konumlarında uygulamanın etkisi araştırılabilir. Benzer bir uygulama olarak kavite duvarlarındaki pürüzlülük değerleri değiştirilerek, bu uygulamanın akışa etkisi incelenebilir.

Kavite akışının aktif kontrolü amacıyla kavite girişi ve kavite duvarlarında konumlandırılmış jet ve mikrojet deliklerinden hava üfleme bazlı akış kontrolü çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Mikrojetler ile gerçekleştirilen kontrol çalışmasında jet deliklerinden serbest akışın %10'u, mikrojet deliklerinden ise serbest akışın %30'u hızda hava üfleme yapılmıştır. Bir üfleme konumunda 2 mm çapında bir jet deliğinin etrafında iki tane 150 µm çaplı mikrojet deliği konumlandırılmıştır. Kavite girişinde bir ve kavite duvarlarında ikişer üfleme konumu belirlenip farklı kombinasyonlarda mikrojetler ile hava üfleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde mikrojetler ile farklı konumlardan hava üfleyerek kavite duvarlarındaki ses basınç seviyelerini artırmanın ya da azaltmanın mümkün olduğu anlaşılmıştır. Baskın modlara karşılık gelen frekans değerleri kontrolsüz simülasyona kıyasla çok değişim göstermemiştir. Kavite girişinden üfleme yapılan MJB-1 simülasyonunda an az noktadan üfleme yapılarak en etkin sonuçlara ulaşılmıştır. MJB-1 simülasyonunda kavite duvarlarında kontrolsüz simülasyona göre 3-4 dB ses basınç seviyesi düşüşleri elde edilmiştir. Kavite girişinde mikrojetlerle hava üfleme gerçekleştirilerek kayma tabakasının yapısı değiştirilmiştir. Vortisite dağılımı incelendiğinde kayma tabakasının periyodik hareketinin daha düzenli bir hale geldiği anlaşılmıştır. Girişteki deliklerden yapılan üflemenin etkisiyle bu bölgedeki basınç değerleri yükselse de kontrolsüz simülasyondaki yüksek basınç değerleri hafifletilmiştir. Akım çizgileri incelendiğinde MJB-1 simülasyonunda kontrolsüz simülasyona benzeyen ama daha gevşek yapıda olan girdapların oluştuğu anlaşılmıştır.

Mikrojetlerle hava üfleme işleminde mikrojet deliklerinin mikrometre boyunda olması sebebiyle gerçek zamanlı akış kontrolünde problemlerin oluşabileceği düşünülmüş ve ek olarak jetlerle üfleme gerçekleştirilmenin akış kontrolündeki etkinliği araştırılmıştır.



Jetlerle akış kontrolü çalışmalarında öncelikle kavite girişinden farklı açılarla hava üfleminin etkisi incelenmiş, ardından kavite ön ve arka duvarlarına konumlandırılmış deliklerden farklı kombinasyonlarda hava vakumlamanın etkisi araştırılmıştır. Çalışmalarda oluşturulan jet deliklerinin tamamı 2 mm çaplı olup, deliklerden üflenen ya da vakumlanan havanın hızı serbest akışın % 10'una eşittir.

Girişe konumlandırılmış jet deliğinden altı farklı açıda hava üfleme gerçekleştirilmiştir. Girişte gerçekleştirilen hava üfleminin açısı düştükçe akış kontrolünün etkisinin azaldığı anlaşılrken, en etkin sonuçlar dik üfleme gerçekleştirilen simülasyonda elde edilmiştir. Dik üfleminin gerçekleştirildiği JB-1-90° simülasyonunda kavite duvarlarında kontrolsüz simülasyona göre 3-4 dB ses basınç seviyesi düşürümü başarılmıştır. MJB-1 simülasyonunun jetler ile üfleme yapılan hali olan JB-1-90° simülasyonundaki akış alanındaki basınç, akım çizgisi ve vortisite dağılımları MJB-1 simülasyonuna oldukça benzemektedir. Bu sebeple mikrojet deliklerindense jet deliklerinden hava üfleme gerçekleştiriminin akış kontrolü için yeterli olduğu anlaşılmıştır.

Jet deliklerinden hava vakumlama gerçekleştiriminin etkisinin araştırılması adına kavite ön ve arka duvarlarına eşit aralıklı üçer jet deliği yerleştirilmiştir. Her bir duvarda kendi içinde farklı kombinasyonlarda hava vakumlama gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar değerlendirilirken vakumlamanın yapılmadığı duvarlardaki veriler baz alınmıştır. Ön duvardan yapılan vakumlama ile kavite arka duvarından ön duvara doğru ilerleyen dalgaların yapısının değiştirilmesi, arka duvardan vakumlama gerçekleştirilerek arka duvarda gözlenen yüksek basınç seviyelerinin düşürülmesi amaçlanmıştır.

Kavite ön duvarından hava vakumlamanın yapıldığı simülasyonlarda özellikle iki delikten birlikte ve üç delikten birlikte vakumlamanın yapıldığı durumlarda kontrolsüz simülasyondan farklı basınç salınımları elde edilmiştir. Üç delikten vakumlamanın gerçekleştirildiği JS-LE-234 simülasyonunda arka duvarda ses basınç seviyesi düşürümü elde edilse de alt duvar ses basınç seviyelerinde kontrolsüz simülasyona göre oldukça belirgin bir artış dikkat çekmiştir. Ön duvarda alttaki iki delikten vakumlamanın gerçekleştirildiği JS-LE-34 simülasyonu JS-LE çalışmaları arasında en etkin durum seçilirken, bu simülasyonda alt ve arka duvarlarda kontrolsüz simülasyona göre 2-3 dB ses basınç düşürümü gözlenmiştir. JS-LE-34

simülasyonunda yüksek basınçlı dalgalar hafiflese de arka duvar etrafında kontrolsüz simülasyondan daha yüksek basınç değerleri elde edilmiştir. Ön duvardan yapılan vakumlamanın etkisiyle kaviteyi uzunluk boyunca domine eden büyük bir girdap yapısı oluşmuştur. Bu girdap yapısı içinde daha küçük girdapları da barındırır da periyot boyunca büyük girdap yapısı varlığını korumaktadır. Bu büyük girdabın etkisiyle kavite içindeki vortisite değerlerinin arttığı anlaşılmıştır. Ek olarak vakumlamanın gerçekleştiği deliklerin etrafında yüksek basınç ve vortisite değerlerinin gözlenmesi dikkat çekmiştir.

Kavite arka duvarından farklı kombinasyonlarda hava vakumlamanın gerçekleştirildiği çalışmada tek delikten vakumlama yapılan simülasyonlar ve iki delikten birlikte vakumlamaların gerçekleştirildiği simülasyonlar kendi aralarında benzer sonuçlar vermiştir. Arka duvarda konumlandırılan kritik nokta için üçüncü modun gücünde artış dikkat çekmiştir. En etkin sonuçlara üç delikten birlikte hava vakumlamanın gerçekleştirildiği JS-TE-234 simülasyonunda ulaşıırken, bu simülasyonda ön ve arka duvarlarda kontrolsüz simülasyona göre 4-6 dB ses basınç seviyesi düşürümleri elde edilmiştir. JS-TE-234 simülasyonunda kavite üzerindeki yüksek basınçlı dalgaların gücü hafiflemiştir. Fakat, arka duvarın etrafındaki yüksek basınçlı bölgedeki genişlemesi ve kavite çıkışındaki yüksek basınç dalgasının güçlenmesi dikkat çekmiştir. Kontrolsüz simülasyondaki girdap yapıları değişime uğratılmış ve periyot boyunca girdapların çok yoğun ya da çok gevşek olduğu farklı anların oluşumu gözlenmiştir. Arka duvardan hava vakumlama gerçekleştirilerek delik konumları etrafında ve kavitenin arka duvara yakın yarısında vortisite değerlerinde artış elde edilmiştir.

Kavite ön ve arka duvarlarındaki deliklerden hava vakumlama gerçekleştirilerek kontrolsüz simülasyonda akış alanında gözlenen yüksek basınçlı alanlarda hafifleme ve kavite içindeki girdap yapılarında değişim elde edilmiştir. Fakat, vakumlamanın etkisiyle istenmeyen bir durum olarak arka duvar ve vakumlama yapılan delikler etrafındaki basınç değerlerinde artış meydana gelmiştir. Girişten hava üflemenin yapıldığı simülasyonlarda kavite üzerindeki yüksek basınçlı bölgede vakumlamanın gerçekleştirildiği simülasyonlardaki kadar etkin bir hafifleme elde edilemese de arka duvar etrafındaki yüksek basınçlı değerler düşürülmüştür. Bu sebeple kavite girişinden hava üflemenin kavite duvarlarından vakumlama yapmaya kıyasla daha etkin olduğu

anlaşılmıştır. Jetlerle ve mikrojetlerle üfleminin arasında belirgin farklar olmadığı için jetlerle üfleminin akış kontrolü için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla kavite akışının aktif yöntemlerle kontrolü için en etkin durum olarak kavite girişinden dik üfleminin yapıldığı simülasyon seçilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde mikrojetler ve jetlerle hava üflemede en etkili sonuçlar kavite girişinden uygulama yapıldığında elde edilmiştir. Kavite girişinde sisteme dışarıdan enerji verilip kayma tabakasının yapısı değiştirilerek kavite içindeki yüksek etkiler hafifletilebilmiştir.

Kavite akışının süpersonik hızlarda aktif yöntemlerle kontrolü için deneysel ve sayısal çalışmalar sürse de hava aracının uçuşu esnasında aktif yöntemlerin uygulanması için gerekli teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Aktif kontrol yöntemleri akış koşullarına göre değiştirilebilir olsa da mevcut teknolojik durumda pasif yöntemlerle akış kontrolü daha uygulanabilir.

Kontrolsüz simülasyon, en etkin pasif simülasyon ve en etkin aktif simülasyon için akıştaki zamana ve makana bağlı dinamiklerin birbirinden ayrılması ve akış dinamiklerinin daha detaylı incelenmesi için Dikgen Ayırıştırma Yöntemi'ne başvurulmuştur. Bu simülasyonlarda akış periyodikleştikten sonra kavite içinden elde edilen x-yönündeki hız verilerine dikgen ayırıştırma uygulanarak DAY kipleri ve kiplerin barındırdığı enerjiler belirlenmiş ve yeterli sayıda kip kullanılarak simülasyonların düşük mertebeli yeniden modellemeleri gerçekleştirilmiştir.

Kontrolsüz simülasyonda ilk dört DAY kipi ile sistemi modelleyebilecek yeterli bilginin taşınabildiği anlaşılmıştır. İlk iki kipten sonra kip enerjileri ve kip genlikleri oldukça düşmüştür. En etkin pasif kontrol durumu olan TWI-60° simülasyonunda akış özellikleri tek kip ile yeteri kadar ifade edilebilmektedir. Arka duvara eğim verilerek kayma tabakası ve arka duvar etkileşiminin hafifletilmesi ile akışın daha stabil bir duruma getirildiği anlaşılmıştır. DAY kipleri incelendiğinde kavite içindeki iki gidabın etkileşim bölgesi dikkat çekmiştir. En etkin aktif kontrol durumu olan JB-1-90° simülasyonunda ise akışa dışarıdan sürekli enerji verildiği için sistemi yeterli şekilde temsil edebilmek için gerekli kip sayısı artmıştır. Kavite girişinden jetlerle hava üflenerek sisteme dışarıdan sürekli enerji aktarımı yapıldığı için enerjinin daha fazla sayıda kipe yayılması beklenen bir sonuçtur. Kontrolsüz simülasyon kiplerinin

dağılımına oldukça benzeyen JB-1-90° simülasyonu kiplerinde katmanlı bir şekilde hafifleyen yapılar gözlenmiştir.

Hava aracının uçuşu esnasındaki akış koşullarını belirlemek ve gerçek zamanlı akış kontrolü gerçekleştirebilmek adına sensör yeri belirleme çalışması yapılmıştır. Bu çalışma ile akışın yeterli biçimde tahmini için gerekli optimum sensör sayısı ve uygun sensör konumları belirlenmiştir. Bu amaçla kontrolsüz simülasyon, en etkin pasif simülasyon ve en etkin aktif simülasyon için kavite duvarlarından elde edilen basınç verilerine bir boyutlu dikgen ayrıştırma uygulanıp akışlara ait kipler ortaya çıkarılmıştır. Uygun sensör konumlarını belirlemek adına her bir simülasyona ait kiplerin minimum ve maksimum noktaları belirlenmiştir. Optimum sayıda sensör konumu elde edebilmek için kontrolsüz ve kontrollü simülasyonlardaki ortak ya da yakın noktalar seçilmiştir. Nihai sensör konumları akışın daha aktif olduğu ve daha yüksek basınç değerlerinin ve salınımlarının gözlemlendiği arka duvar ve alt duvarda yoğunlaşmıştır. En az sayıda sensör ön duvar üzerinde konumlandırılmıştır.

## **8.2 Gelecekte Yapılacak Çalışmalar için Öneriler**

Sınırlı zaman ve sayısal çözüm gücü sebebi ile akışın aktif ve pasif yöntemlerle kontrolü uygulamaları iki boyutlu simülasyonlar ile gerçekleştirilmiştir. Kontrolün etkinliğinin araştırılması adına ilerleyen çalışmalarda üç boyutlu kontrollü simülasyonlar gerçekleştirilip sonuçlarının değerlendirilmesi faydalı bir çalışma olabilir. Daha sıkı ağ yapıları ve daha güçlü çözümler kullanılarak DES, LES gibi modellerin sonuçları incelemek de oldukça faydalı olabilir.

Çalışmada uygulanan aktif kontrol çalışmalarına ek olarak farklı boyutta ve farklı sayıda jet delikleri oluşturularak, bu durumların akışa etkisi incelenebilir. Lazer enerjisi bırakımı, girişe girdap karıştırıcılar eklemek gibi farklı aktif kontrol yöntemlerinin süpersonik kavite akışı üzerindeki etkinliğinin araştırılması uygun bir çalışma olabilir.

Son olarak gerçek zamanlı mühimmat bırakımının modellenip sıvı-katı etkileşiminin incelendiği simülasyonlar gerçekleştirilerek mühimmat bırakımı daha detaylı olarak incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Aradag, S.**, *A critical evaluation of numerical algorithms and flow physics in complex supersonic flows*, (2006).
- [2] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AP-3 Orion with bomb bay doors open 2010.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AP-3_Orion_with_bomb_bay_doors_open_2010.jpg) [Erişim tarihi: 03.02.2019].
- [3] **Syed, S. A.**, (2005). *Detached eddy simulation of turbulent flow over an open cavity with and without cover plates*(doktora tezi). Adres: <https://www.wichita.edu/>
- [4] **Plentovich, E. B., Stallings Jr, R. L., ve Tracy, M. B.**, (1993). *Experimental cavity pressure measurements at subsonic and transonic speeds*, Nasa Technical Paper, 3358, 132.
- [5] **Rossiter, J. E.**, (1964). *Wind tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds*, Ministry of Aviation, Royal aircraft Establishment, RAE Farnborough.
- [6] **Block, P. J.**, (1976). *Noise response of cavities of varying dimensions at subsonic speeds*, NASA Technical Note (p. 36).
- [7] **Ahuja, K. K., ve Mendoza, J.**, (1995). *Effects of cavity dimensions, boundary layer, and temperature on cavity noise with emphasis on benchmark data to validate computational aeroacoustic codes*, NASA Contractor Report 4653, 284.
- [8] **Charwat, A. F., Dewey, C. F., J., Roos, J. N., ve Hitz, J. A.**, (1961). An investigation of separated flows-part II : flow in the cavity and heat transfer, *Journal of the Aerospace Sciences*, vol. 28(7), 513–527.
- [9] **Tracy, M. B., ve Plentovich, E. B.**, (1993). *Characterization of cavity flow fields using pressure data obtained in the Langley 0.3-Meter transonic cryogenic tunnel*.
- [10] **Rossiter, J. E., ve Kurn, A. G.**, (1965). *Wind tunnel measurements of the unsteady pressures in and behind a bomb bay (Canberra)*.
- [11] **Heller, H. H., ve Bliss, D. B.**, (1976). The Physical Mechanism of Flow-Induced Pressure Fluctuations in Cavities and Concepts for Their Suppression, *Aeroacoustics: STOL Noise; Airframe and Airfoil Noise*, 45, 281-296.
- [12] **Charwat, A. F., Roos, J. N., Dewey, F. C., ve Hitz, J. A.**, (1961). An investigation of separated flows-Part I : The pressure field, *Journal of Aerospace Sciences*, 28(6), 457–470.
- [13] **Carr, D. L.**, (1974). *An experimental investigation of open cavity pressure oscillations*, AIR FORCE INST. OF TECH. WRIGHT-

- [14] **Stallings Jr., R. L.**, (1983). Store separation from cavities at supersonic flight speeds, *20th Aerospace Sciences Meeting*, 20(2), 129-132.
- [15] **Kaufman, L. G., ve Clark, R. L.**, (1983). Mach 0.6 to 3.0 flows over rectangular cavities, AIR FORCE INST. OF TECH. WRIGHT-PATTERSON AFB OH.
- [16] **Perng, S. W., ve Dolling, D. S.**, (1996). Passive control of pressure oscillations in hypersonic cavity flow, *AIAA 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 444.
- [17] **Unalmis, O. H., Clemens, N. T., ve Dolling, D. S.**, (2001). Experimental study of shear-layer/acoustics coupling in Mach 5 cavity flow, *AIAA Journal*, 39, 242–252.
- [18] **Chung, K.**, (2003). Characteristics of compressible rectangular cavity flows, *Journal of Aircraft*, 40(1), 137–142.
- [19] **Disimile, P. J., ve Toy, N.**, (2004). Acoustical properties of a long rectangular cavity of constant cross-section immersed in a thick boundary layer, *International Journal of Mechanical Sciences*, 46(12), 1827–1844.
- [20] **Shih, S. H., Hamed, A., ve Yeuan, J.**, (1994). Unsteady supersonic cavity flow simulations using coupled k- $\epsilon$  and Navier-Stokes equations, *AIAA Journal*, 32(10), 2015–2021.
- [21] **Zhang, X., ve Edwards, J. A.**, (1996). Analysis of unsteady supersonic cavity flow employing an adaptive meshing algorithm, *Computers & Fluids*, 25(4), 373–393.
- [22] **Tam, C. J., Orkwis, P., ve Disimile, P.**, (1996). Supersonic open cavity flow physics ascertained from algebraic turbulence model simulations, *34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (p. 75).
- [23] **Rizzetta, D. P.**, (1988). Numerical simulation of supersonic flow over a three-dimensional cavity, *AIAA journal*, 26(7), 799–807.
- [24] **Ashcroft, G., ve Zhang, X.**, (2001). A computational investigation of the noise radiated by flow-induced cavity oscillations, *39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, p. 512.
- [25] **Ayılı, E.**, (2012). *Süpersonik kavitelerdeki akışın sayısal analizi*(yüksek lisans tezi). Adres: <http://etu.edu.tr/>.
- [26] **Fureby, C., and Lillberg, E.**, (2000). Large eddy simulations of supersonic cavity flow, *Fluids 2000 Conference and Exhibit*.
- [27] **Hamed, A., Basu, D., ve Das, K.**, (2003). Detached eddy simulation of supersonic flow over cavity, *41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (p. 549).
- [28] **Nikuradse, J.**, (1950). *Laws of flow in rough pipes*, National Advisory Committee for Aeronautics.
- [29] **Lawson, S. J., ve Barakos, G. N.**, (2011). Review of numerical simulations for

high-speed, turbulent cavity flows, *Progress in Aerospace Sciences*, 47(3), 186–216.

- [30] **Lazar, E., Elliott, G., ve . Glumac, N.,** (2008). Control of the shear layer above a supersonic cavity using energy deposition, *AIAA Journal*, 46(12), 2987–2997.
- [31] **Maurya, P. K., Rajeev, C., ve Vaidyanathan, A.,** (2015). Effect of aft wall offset and ramp on pressure oscillation from confined supersonic flow over cavity, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68, 559–573.
- [32] **Perng, S. W., ve Dolling, D. S.,** (2001). Suppression of pressure oscillations in high-Mach-number, turbulent, cavity flow, *Journal of Aircraft*, 38(2), 248–256.
- [33] **Lee, Y., Kang, M., Kim, H., ve Setoguchi, T.,** (2008). Passive control techniques to alleviate supersonic cavity flow oscillation, *Journal of Propulsion and Power*, 24(4), 697–703.
- [34] **Levasseur, V., Sagaut, P., Mallet, M., ve Chalot, F.,** (2008). Unstructured Large Eddy Simulation of the passive control of the flow in a weapon bay, *Journal of Fluids and Structures*, 24(8), 1204–1215.
- [35] **Kim, I., ve Chokani, N.,** (1992). Navier-Stokes study of supersonic cavity flowfield with passive control, *Journal of Aircraft*, 29(2), 217–223.
- [36] **Rizzetta, D. P., ve Visbal, M. R.,** (2003). Large-Eddy simulation of supersonic cavity flowfields including flow control, *AIAA journal*, 41(8), 1452-1462.
- [37] **Apacoglu, B., Paksoy, A., ve Aradag, S.,** (2012). Effects of air blowing on turbulent flow over a circular cylinder, *J. of Thermal Science and Technology*, 32(2), 107–119.
- [38] **Vakili, A. D., ve Gauthier, C.,** (1994). Control of cavity flow by upstream mass-injection, *Journal of Aircraft*, 31(1), 169–174.
- [39] **Arunajatesan, S., Kannepalli, C., Sinha, N., Sheehan, M., Alvi, F., Shumway, G., ve Ukeiley, L.,** (2009). Suppression of cavity loads using leading-edge blowing, *AIAA Journal*, 47(5), 1132–1144.
- [40] **Zhuang, N., Alvi, F. S., Alkislal, M. B., ve Shih, C.,** (2006). Supersonic cavity flows and their control, *AIAA Journal*, 44(9), 2118–2128.
- [41] **Choi, J. J., Annaswamy, A. M., Lou, H., ve Alvi, F. S.,** (2006). Active control of supersonic impingement tones using steady and pulsed microjets, *Experiments in Fluids*, 41(6), 841–855.
- [42] **Aradag, S., Gelisli, K. A., ve Yaldir, E. C.,** (2017). Effects of active and passive control techniques on Mach 1.5 cavity flow dynamics, *International Journal of Aerospace Engineering*, 2017.
- [43] **Meyerand, R. G., ve Haught, A. F.,** (1963). Gas breakdown at optical frequencies, *Physical Review Letters*, 11(9), 401–403.
- [44] **Yan, H., Adelgren, R., Boguszko, M., Elliott, G., ve Knight, D.,** (2003). Laser

energy deposition in quiescent air, *AIAA Journal*, 41(10), 1988–1995.

- [45] **Aradag, S., Yan, H., ve Knight, D.,** (2009). The effects of laser energy deposition on supersonic cavity flow, *Isı Bilimi Ve Tekniği Dergisi/ Journal of Thermal Science and Technology*, 29, 67–73.
- [46] **Yilmaz, I., ve Aradag, S.,** (2013). Numerical laser energy deposition on supersonic cavity flow and sensor placement strategies to control the flow, *The Scientific World Journal*, 2013.
- [47] **Newman, A. J.,** (1996). *Model reduction via the Karhunen-Loeve expansion Part I: An exposition*.
- [48] **Holmes, P., Lumley, J. L., Berkooz, G., ve Rowles, C. W.,** (2012). *Turbulence, coherent structures, dynamical systems and symmetry*, Cambridge University Press.
- [49] **Chatterjee, A.,** (2000). An introduction to the proper orthogonal decomposition, *Current Science*, 78, 808–817.
- [50] **Berkooz, G., Holmes, P., ve Lumley, J. L.,** (1993). The Proper Orthogonal Decomposition in the analysis of turbulent flows, *Annual Review Fluid Mechanics*, 25(1), 539–575.
- [51] **Cao, Y., Zhu, J., Luo, Z., ve Navon, I. M.,** (2006). Reduced-order modeling of the upper tropical pacific ocean model using proper orthogonal decomposition, *Computers & Mathematics with Applications*, 52(8-9), 1373-1386.
- [52] **Uzunoglu, B., Fletcher, S. J., Navon, I. M., ve Zupansky, M.,** (2005). Adaptive ensemble size reduction and inflation, *Q J R Meteorol. Soc.*, 128, 1-999.
- [53] **Feeny, B. F., ve Kappagantu, R.,** (1998). On the physical interpretation of proper orthogonal modes in vibrations, *Journal of Sound and Vibration*, 211(4), 607–616.
- [54] **Kappagantu, R., ve Feeny, B. F.,** (1999). An “optimal” modal reduction of a system with frictional excitation, *Journal of Sound and Vibration*, 224(5), 863–877.
- [55] **Aubry, N., Holmes, P., Lumley, J. L., ve Stone, E.,** (1988), The dynamics of coherent structures in the wall region of a turbulent boundary layer, *Journal of Fluid Mechanics*, 192, 115–173.
- [56] **Cohen, K., Siegel, S., ve McLaughlin, T.,** (2006). A heuristic approach to effective sensor placement for modeling of a cylinder wake, *Computers & Fluids*, 35(1), 103–120.
- [57] **Aradag, S., Siegel, S., Seidel, J., Cohen, K., ve McLaughlin, T.,** (2011). Filtered POD-based low-dimensional modeling of the 3D turbulent flow behind a circular cylinder, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 66(1), 1-16.
- [58] **Paksoy, A.,** (2011). *Yapay sinir ağları ile akış kontrolü için sayısal yöntemlerin geliştirilmesi*(yüksek lisans tezi). Adres: <http://etu.edu.tr/>.



- [59] **Rowley, C., Colonius, T., ve Murray, R. M.,** (2000). POD based models of self-sustained oscillations in the flow past an open cavity, *6th Aeroacoustics Conference and Exhibit* (p. 1969).
- [60] **Rowley, C. W., Colonius, T., ve Murray, R. M.,** (2004). Model reduction for compressible flows using POD and Galerkin projection, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 189(1-2), 115–129.
- [61] **Gloerfelt, X.,** (2006). Compressible POD/Galerkin reduced-order model of self-sustained oscillations in a cavity, 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (p. 2432).
- [62] **Kasnakoglu, C.,** (2007). *Reduced order modeling, nonlinear analysis and control methods for flow control problems*(doktora tezi). Adres: <https://etd.ohiolink.edu/>.
- [63] **Nagarajan, K. K., Cordier, L., Airiau, C., ve Kourta, A.,** (2009). POD based reduced order modelling of a compressible forced cavity flow, *Congrès français de mécanique*.
- [64] **Bortz, D. M., Rubio, A. D., Banks, H. T., Cain, A. B., ve Smith, R. C.,** (2000). *Reduced order modeling in control of open cavity acoustics*, NORTH CAROLINA STATE UNIV AT RALEIGH CENTER FOR RESEARCH IN SCIENTIFIC COMPUTATION.
- [65] **Cantwell, B. J.,** (2005). *Fundamentals of Compressible Flow*, AA210 Stanford University Department of Aeronautics and Astronautics.
- [66] **Davidson, L.,** (2012). *Fluid Mechanics, Turbulent Flow and Turbulence Modeling*.
- [67] **Hoffmann, K. a, and Chiang, S. T.,** (2000). *Computational Fluid Dynamics Vol.III*, Kansas: Engineering Education System.
- [68] **ANSYS Inc.,** *ANSYS FLUENT Theory Guide*, 2011.
- [69] **Roe, P. L.,** (1986). Characteristic-based schemes for the Euler equations, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 18(1), 337–365.
- [70] **Barth, T., ve Jespersen, D.,** (1989). the design and application of Upwind schemes on unstructured meshes, *27th Aerospace Sciences Meeting* (p. 366).
- [71] **Deane, A. E., Kevrekidis, I. G., Karniadakis, G. E., ve Orszag, S. A.,** (1991). Low-dimensional models for complex geometry flows: Application to grooved channels and circular cylinders, *Physics of Fluids A: Fluid dynamics*, 3(10), 2337–2354.
- [72] **Ly, H. V., ve Tran, H. T.,** (2001). Modeling and control of physical processes using proper orthogonal decomposition, *Mathematical and Computer Modelling*, 33(1-3), 223–236.
- [73] **Ahlman, D., Söderlund, F., Jackson, J., Kurdila, A., ve Shyy, W.,** (2002). Proper orthogonal decomposition for time-dependent lid-driven cavity flows, *Numerical Heat Transfer: Part B: Fundamentals*, 42(4), 285–306.

- [74] **Sanghi, S., ve Hasan, N.,** (2011). Proper orthogonal decomposition and its applications,” *Asia-Pacific Journal Of Chemical Engineering*, 6(1), 120–128.
- [75] **Smith, T. R., Moehlis, J., ve Holmes, P.,** (2005). Low-dimensional modelling of turbulence using the proper orthogonal decomposition: a tutorial, *Nonlinear Dynamics*, 41 (1-3), 275–307.
- [76] **Sirovich, L.,** (1987). Turbulence and the dynamics of coherent structures part I: coherent structures, *Quarterly of Applied Mathematics*, 45, 573–582.
- [77] **Hoffmann, K. A., and Chiang, S. T.,** (2000), *Computational Fluid Dynamics Vol.II*, Kansas: Engineering Education System.
- [78] **Canonsburg, T. D.,** (2010). ANSYS CFD-Post User’s Guide, vol. 15317, 724–746.
- [79] **Mathworks, C.,** Matlab-Simulink ® User’s Guide R2015a, 2015.
- [80] **Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., and Sanders, J. V.,** (2000). *Fundamentals Of Acoustics*, John Wiley & Sons, Inc.
- [81] **Yılmaz, İ.,** (2013). *Lazer enerjisinin sesüstü kavite akışa etkilerinin düşük dereceli modelleme yardımı ile sayısal analizi*(yüksek lisans tezi). Adres: <http://etu.edu.tr/>.

## **EKLER**

EK 1: Dikgen Ayrıştırma Yöntemi Kodu

EK 2: Sensör Yeri Belirleme Kodu





## EK 1

```
clc
clear all
close all

%% Data Collection for POD %%
tic
h=waitbar(0,'1','Name','Collecting data, please wait...');
k=1;
int_data=8000;
end_data=14000;
Data=zeros(13005,4,(end_data-int_data)+1);
ms=1;%%Data acquisition rate
total=((end_data-int_data)/ms)+1;
for i=int_data:ms:end_data;
    FN=strcat('E:\TAITM2041\PART2\POD\POD final\POD_Data\r50\LD5-
6000t-',num2str(i));
    New_Data=importdata(FN);
    Data(:, :, k)=New_Data.data;
    k=k+1;

waitbar(k/total,h,sprintf('%s%d%s','% ',round((k/total)*100),'/100'))
;
end
close(h);
h=msgbox('Data importing process Successful');
disp('Data importing process...
Successful');
close(h)

%% Arrangement of Imported Data %%
gx=255;
gy=51;
x=linspace(0,0.12065,gx);
y=linspace(-0.02381,0,gy);
[X,Y]=meshgrid(x,y);
clear a b i j plotter fname
h=waitbar(0,'1','Name','Arranging data, please wait...');
for j=1:total
a=1;
b=length(x);
    for i=1:length(y)
        ux(i, :, j)=Data(a:b, 4, j);
        a=a+length(x);
        b=b+length(x);
    end

waitbar(j/total,h,sprintf('%s%d%s','% ',round((j/total)*100),'/100'))
;
end
close(h);
```

```

plotter=figure(1);
    SN=(end_data-int_data)/ms;
    surf(X,Y,ux(:,:,SN))
    title([' Original Data, Snapshot No:',num2str(SN)])
    set(gca,'fontsize',18)
    xlabel('x (m)','FontSize',24)
    ylabel('y (m)','FontSize',24)
    zlabel('Stream Function Value')
    colorbar
    colormap(jet)
    set(gcf,'color','white')
    grid on
    fname='E:\TAITM2041\PART2\POD\POD
final\POD_Data\r50\Graphs\OrgSurface';
    hgsave(plotter,fname);
clear plotter fname
plotter=figure(2);
    contourf(X,Y,ux(:,:,SN))
    title(['Original Data, Snapshot No:',num2str(SN)])
    caxis([-200 350])
    set(gca,'fontsize',18)
    xlabel('x (m)','FontSize',24)
    ylabel('y (m)','FontSize',24)
    colorbar
    colormap(jet)
    set(gcf,'color','white')
    grid off
    fname='E:\TAITM2041\PART2\POD\POD
final\POD_Data\r50\Graphs\OrgContour';
    hgsave(plotter,fname);
    h=msgbox('Data arrangement process Successful');
disp('Data arrangement process...
Successful');
close(h)
h=msgbox('Mesh grid structure initiation Successful');
disp('Mesh grid structure initiation...
Successful');
close(h)
h=msgbox('Plotting original data...');
disp('Plotting original data... ');
close(h)

%% Pre Study for POD Method %%
clear prompt dlg_title num_lines def answer
prompt = {'Enter the desired total mode number.'};
dlg_title = 'User Input';
num_lines = 1;
def = {'4'};
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
UserModNumber = str2double(answer);
M=total; % Number of total snapshots
% Determination of the average snapshot matrix and modification of
it
% Method of Snapshots offered by "Sirovich"
clear k
sum_ux=zeros(gy,gx);
V=zeros(gy,gx,total);
h=waitbar(0,'Adding snapshots, please wait...');
for k=1:M

```

```

        sum_ux=sum_ux+ux(:,:,k);           % Addition of snapshots
        waitbar(k/M,h,sprintf('%s%d%s','% ',round((k/M)*100),'/100'));
    end
    close(h);
    Ux_Mean=sum_ux/M;                       % Determination of the mean matrix
    clear k
    h=waitbar(0,'Modifying snapshots, please wait...');
    for k=1:M
        V(:,:,k)=ux(:,:,k)-Ux_Mean;       % Subtracting mean value from each
        element of the ensemble
        waitbar(k/M,h,sprintf('%s%d%s','% ',round((k/M)*100),'/100'));
    end
    close(h);
    disp('Pre-study for POD method...
    Successful');

%% Determination of the Covariance Matrix %%
C_Temp3=zeros(gy,gx);
C=zeros(gy,gx);
clear i j
h=waitbar(0,'1','Name','Generating covariance matrix, please
wait...');
for i=1:M
    for j=1:M
        C_Temp1=V(:,:,i).*V(:,:,j);
        C_Temp2=sum(C_Temp1);
        C_Temp3(i,j)=sum(C_Temp2);
        C(i,j)=(4.76*10^-4)^2/M*C_Temp3(i,j);
    end
    waitbar(i/M,h,sprintf('%s%d%s','% ',round((i/M)*100),'/100'));
end
close(h);
disp('Determination of the covariance matrix...
Successful');

%% Eigen Value Decomposition and Energy Distribution %%
[EVector,EValue,dummy]=svd(C);
[T_EValue,Order]=sort(diag(EValue));
TotalEnergy=sum(T_EValue);
clear i
EnergyDistribution=zeros(M,1);
h=waitbar(0,'Calculating energy distribution, please wait...');
for i=1:M
    EnergyDistribution(i,1)=T_EValue(i,1)/TotalEnergy;
    waitbar(i/M,h,sprintf('%s%d%s','% ',round((i/M)*100),'/100'));
end
close(h);
disp('Eigen value decomposition and energy distribution...
Successful');

%% Determination of the Basis Functions %%
clear r k n
r=UserModNumber;
Phi_Mode=zeros(gy,gx,r);
h=waitbar(0,'Generating modes, please wait...');
for k=1:r
    Phi=zeros(gy,gx);
    for n=1:M
        Phi=Phi+(EVector(n,k)/sqrt(EValue(k,k))*V(:,:,n));
    end
end

```

```

        end
        Phi_Mode(:, :, k) = Phi;
        waitbar(k/r, h, sprintf('%s%d%s', '%', round((k/r)*100), '/100'));
    end
    close(h);
    disp('Determination of the basis functions...
    Successful');

%% Mode Graphs %%
h=waitbar(0, 'Graphing modes, please wait...');
for i=1:r
    clear plotter fname
    plotter=figure(i+2);
    contourf(X, Y, Phi_Mode(:, :, i));
    title(['Mode ', num2str(i)])
    set(gca, 'fontsize', 24)
    xlabel('x (m)', 'FontSize', 30)
    ylabel('y (m)', 'FontSize', 30)
    colorbar
    caxis([-10000 4000])
    colormap(jet)
    set(gcf, 'color', 'white')
    grid off
    fname=['E:\TAITM2041\PART2\POD\POD
    final\POD_Data\r50\Graphs\Mode', num2str(i)];
    hgsave(plotter, fname);
    waitbar(i/r, h, sprintf('%s%d%s', '%', round((k/r)*100), '/100'));
end
close(h);
disp('Plotting modes...
Successful');

%% Determination of the Time Coefficients %%
New_Phi_Mode = zeros(gy*gx, r);
TimeC=zeros(r, M);
h=waitbar(1, 'Modifying modes, please wait...');
for i=1:r
    Temporary_Mode=Phi_Mode(:, :, i);
    New_Phi_Mode(:, i)=Temporary_Mode(:);
    waitbar(i/r, h, sprintf('%s%d%s', '%', round((k/r)*100), '/100'));
end
close(h);
h=waitbar(1, 'Estimating time coefficients, please wait...');
for i=1:M
    Selected_Data_Ensemble=V(:, :, i);
    TimeC(:, i)=New_Phi_Mode\Selected_Data_Ensemble(:);
    waitbar(i/M, h, sprintf('%s%d%s', '%', round((k/r)*100), '/100'));
end
close(h);
disp('Determination of the time coefficients...
Successful');

%% Time Coefficient Graphs %%
xekseni=1:1:M;
for i=1:r
    plotter=figure(r+3);
    plot(xekseni, TimeC(i, 1:M), 'color', rand(1, 3), 'LineWidth', 3)
    legendlist{i}=['Mode ' num2str(i)];
    hold on

```



```

end
set(gca,'fontsize',18)
xlabel('Snapshot Number','FontSize',24)
ylabel('Mode Amplitudes','FontSize',24)
set(gcf,'color','white')
legend(legendlist)
fname=['E:\TAITM2041\PART2\POD\POD
final\POD_Data\r50\Graphs\ModeAmplitude'];
hgsave(plotter,fname);
figure

%% Reconstruction of the Cavity Flowfield %%
clear t i
h=waitbar(1,'Reconstructing, please wait...');
for t= 1:M
    RDE(:,:,t)=Ux_Mean;
    for i=1:r
        RDE(:,:,t)=RDE(:,:,t)+(Phi_Mode(:,:,i)*TimeC(i,t));
    end

waitbar(t/M,h,sprintf('%s%d%s','% ',round((t/M)*100),'/100'));
end
close(h);
disp('Reconstruction process...
Successful');

%% Comparison Study %%
clear prompt dlg_title num_lines def answer
prompt = {'Do you want to make comparison with the original data?
Answer must be "1" for Yes or "0" for No.'};
dlg_title = 'User Input';
num_lines = 1;
def = {'1'};
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
UserDefinition = str2double(answer);
if UserDefinition==1
    clear prompt dlg_title num_lines def answer plotter fname
    prompt = {'Enter the snapshot number (1 to 20000) you needed to
compare.'};
    dlg_title = 'User Input';
    num_lines = 1;
    def = {'20000'};
    answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
    UserAction = str2double(answer);
    clear r
    r=UserModNumber;
    plotter=figure(4+r);
    surf(X,Y,RDE(:,:,UserAction));
    i=UserAction;
    title([' Reconstructed Surface Figure, Snapshot
No:',num2str(i)])
    set(gca,'fontsize',18)
    xlabel('x (m)','FontSize',24)
    ylabel('y (m)','FontSize',24)
    zlabel('Stream Function Value')
    colorbar
    set(gcf,'color','white')
    caxis([-200 350])
    colormap(jet)

```

```

        grid on
        fname='E:\TAITM2041\PART2\POD\POD
final\POD_Data\r50\Graphs\RecSurface';
        hgsave(plotter,fname);
        clear plotter fname
        plotter=figure(5+r);
        contourf(X,Y,RDE(:,:,UserAction));
        title([' Reconstructed Contour Figure, Snapshot
No:',num2str(i)])
        set(gca,'fontsize',18)
        xlabel('x (m)','FontSize',24)
        ylabel('y (m)','FontSize',24)
        zlabel('Stream Function Value')
        colorbar
        caxis([-200 350])
        colormap(jet)
        set(gcf,'color','white')
        grid off
        fname='E:\TAITM2041\PART2\POD\POD
final\POD_Data\r50\Graphs\RecContour';
        hgsave(plotter,fname);
        clear plotter fname

        %% Calculation of the Maximum Value and Error %%
        S1_temp=max(ux(:,:,UserAction));
        S1=max(S1_temp,[],2);
        S2_temp=max(ux(:,:,UserAction));
        S2=max(S2_temp,[],2);
        VmaxError=(abs(S2-S1)/S1)*100;
        disp('=====');
        disp('Maximum (Vmax) Error Value for the User Selected Time
Value')
        disp(VmaxError)
        disp('=====');
        clear prompt dlg_title num_lines def
        prompt = {'Do you want to see the error matrix? Answer must be
"1" for Yes or "0" for No.'};
        dlg_title = 'User Input';
        num_lines = 1;
        def = {'1'};
        answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
        TakeDecision = str2double(answer);
        if TakeDecision==1
            ErrorMatrix=(RDE(:,:,UserAction)-
ux(:,:,UserAction))./(ux(:,:,UserAction))*100;
            disp('Error Matrix for the User Selected Time Value')
            disp(ErrorMatrix);%

disp('=====');
        disp('You have reached the end.')

disp('=====');
        else

disp('=====');
        disp('You have reached the end.')

disp('=====');
        end

```

```

else
    disp('You have reached the end.')
    disp('=====');
end
disp('Comparison process...
Successful');

%% Check Orthonormality %%
clear i j
for i=1:r
    for j=1:r

OC(i,j)=(sum(sum(Phi_Mode(:, :, i).*Phi_Mode(:, :, j))))*((4.76*10^-
4)^2/M);
        end
    end
disp('Orthonormality Check Results:');
disp('=====
=====');
disp(OC)
disp('=====
=====');

%% Energy Content of Modes %%
j=1;
for i=((end_data-int_data)/ms)+1:-1:1
    Temp(j,1)=EnergyDistribution(i,1);
    EnergyContent(j,1)=Temp(j,1);
    j=j+1;
end
clear plotter fname
plotter=figure(6+r);
clear xaxis
xaxis=1:12;
EnergyContent(1:12,1)=100*EnergyContent(1:12,1);
plot(xaxis,EnergyContent(1:12,1), 'LineWidth',3)
set(gca, 'fontsize',24)
title('POD Modes Energy Content')
xlim([1 12])
xlabel('Mode Number', 'FontSize',24)
ylabel('% Energy Content', 'FontSize',24)
set(gcf, 'color', 'white')
grid on
fname='E:\TAITM2041\PART2\POD\POD
final\POD_Data\r50\Graphs\EnergyContent';
hgsave(plotter, fname);
toc
%end

```



## EK 2

```
clc
clear all
close all

%% Data Collection for Analysis and Interpolation %%
a=importdata('E:\TAITM2041\PART4\Sensor\DATA\JB-1\JB-1-sensor-16016');
b=a.data;
x=zeros(355,1);
x(1:50,1)=b(50:-1:1,2);
x(51:305,1)=b(52:306,2);
x(306:355,1)=b(308:357,2);
y=zeros(355,1);
y(1:50,1)=b(50:-1:1,3);
y(51:305,1)=b(51:305,3);
y(306:355,1)=b(308:357,3);
y_on=y(1:50,1);
x_alt=x(51:305,1);
y_arka=y(306:355,1);
tic
h=waitbar(0,'1','Name','Collecting data, please wait...');
k=1;
int_data=16016;
end_data=28016;
total=((end_data-int_data)+1);
p=zeros(355,1,total);
for i=int_data:end_data;
    c=importdata(strcat('E:\TAITM2041\PART4\Sensor\DATA\JB-1\JB-1-sensor-',num2str(i)));
    b=c.data;
    p(1:50,1,k)=b(50:-1:1,4);
    p(51:305,1,k)=b(52:306,4);
    p(306:355,1,k)=b(308:357,4);
    p_on=p(1:50,1,k);
    p_alt=p(51:305,1,k);
    p_arka=p(306:355,1,k);
    p_inter(1:50,1,k)=p_on;
    p_inter(51:305,1,k)=p_alt;
    p_inter(306:355,1,k)=p_arka;
    loc(1:50,1)=y_on;
    loc(51:305)=x_alt;
    loc(306:355)=y_arka;
    k=k+1;
    waitbar(k/total,h,sprintf('%s%d%s','% ',round((k/total)*100),'/100'));
;
end
close(h);
h=msgbox('Data importing process Successful');
disp('Data importing process... Successful');
```

```

close(h)

%% Pre Study for POD Method %%
clear prompt dlg_title num_lines def answer
prompt = {'Enter the desired total mode number.'};
dlg_title = 'User Input';
num_lines = 1;
def = {'4'};
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
UserModNumber = str2double(answer);
M=total; % Number of total snapshots
% Determination of the average snapshot matrix and modification of
it
% Method of snapshots offered by "Sirovich"
clear k
sum_p=zeros(355,1);
V=zeros(355,1,total);
h=waitbar(0,'Adding snapshots, please wait...');
for k=1:M
    sum_p=sum_p+p_inter(:, :, k); % Addition of snapshots
    waitbar(k/M,h,sprintf('%s%d%s', '%', round((k/M)*100), '/100'));
end
close(h);
p_Mean=sum_p/M; % Determination of the mean matrix
clear k
h=waitbar(0,'Modifying snapshots, please wait...');
for k=1:M
    V(:, :, k)=p_inter(:, :, k)-p_Mean; % Subtracting mean value from
each element of the ensemble
    waitbar(k/M,h,sprintf('%s%d%s', '%', round((k/M)*100), '/100'));
end
close(h);
disp('Pre-study for POD method...
Successful');

%% Determination of the covariance matrix %%
C_Temp3=zeros(355,1);
C=zeros(355,1);
clear i j
h=waitbar(0,'1', 'Name', 'Generating covariance matrix, please
wait...');
for i=1:M
    for j=1:M
        C_Temp1=V(:, :, i).*V(:, :, j);
        C_Temp2=sum(C_Temp1);
        C_Temp3(i, j)=sum(C_Temp2);
        C(i, j)=((4.762*10^-4)^2/M)*C_Temp3(i, j);
    end
    waitbar(i/M,h,sprintf('%s%d%s', '%', round((i/M)*100), '/100'));
end
close(h);
disp('Determination of the covariance matrix...
Successful');

%% Eigen Value Decomposition and Energy Distribution %%
[EVector,EValue,dummy]=svd(C);
[T_EValue,Order]=sort(diag(EValue));
TotalEnergy=sum(T_EValue);
clear i
EnergyDistribution=zeros(M,1);

```

```

h=waitbar(0,'Calculating energy distribution, please wait...');
for i=1:M
    EnergyDistribution(i,1)=T_EValue(i,1)/TotalEnergy;
    waitbar(i/M,h,sprintf('%s%d%s','% ',round((i/M)*100),'/100'));
end
close(h);
disp('Eigen value decomposition and energy distribution...
Successful');

%% Determination of the Basis Functions %%
clear r k n
r=UserModNumber;
Phi_Mode=zeros(355,1,r);
h=waitbar(0,'Generating modes, please wait...');
for k=1:r
    Phi=zeros(355,1);
    for n=1:M
        Phi=Phi+(EVector(n,k)/sqrt(EValue(k,k))*V(:, :, n));
    end
    Phi_Mode(:, :, k)=Phi;
    waitbar(k/r,h,sprintf('%s%d%s','% ',round((k/r)*100),'/100'));
end
close(h);
disp('Determination of the basis functions...
Successful');

%% Graphing Modes %%
h=waitbar(0,'Graphing modes, please wait...');
clear plotter fname
for i=1:r
    plotter=figure(i);
    plot(Phi_Mode(:, :, i))

%%%
ymax=[];
imax=[];
ymin=[];
imin=[];
[ymax,imax,ymin,imin] = extrema(Phi_Mode(:,1,i));
%extrema find max and min points of a function
hold on
plot((imax),ymax,'r*',(imin),ymin,'g*')
%%%

    title(['Sensor - Mode ',num2str(i)])
    xlabel('Surface Point')
    set(gca,'fontsize',30)
    set(gcf,'color','white')
    grid off
    fname=['E:\TAITM2041\PART4\Sensor\graphs\Mode',num2str(i)];
    hgsave(plotter,fname);
    waitbar(i/r,h,sprintf('%s%d%s','% ',round((k/r)*100),'/100'));
end
close(h);
disp('Plotting modes...
Successful');

%% Determination of the Time Coefficients %%
New_Phi_Mode = zeros(355*1,r);
TimeC=zeros(r,M);

```

```

h=waitbar(1,'Modifying modes, please wait...');
for i=1:r
    Temporary_Mode=Phi_Mode(:, :, i);
    New_Phi_Mode(:, i)=Temporary_Mode(:);
    waitbar(i/r, h, sprintf('%s%d%s', '%', round((k/r)*100), '/100'));
end
close(h);
h=waitbar(1,'Estimating time coefficients, please wait...');
for i=1:M
    Selected_Data_Ensemble=V(:, :, i);
    TimeC(:, i)=New_Phi_Mode\Selected_Data_Ensemble(:);
    waitbar(i/M, h, sprintf('%s%d%s', '%', round((k/r)*100), '/100'));
end
close(h);
disp('Determination of the time coefficients...
Successful');

%% Time Coeff. Graphs %%
xekseni=1:1:M;
for i=1:r
    plotter=figure(r+3);
    plot(xekseni, TimeC(i, 1:M), 'color', rand(1, 3), 'LineWidth', 2)
    legendlist{i}=['Mode ' num2str(i)];
    hold on
end
xlabel('Snapshot Number')
ylabel('Mode Amplitudes')
legend(legendlist)
fname=['E:\TAITM2041\PART4\Sensor\graphs\ModeAmplitude'];
hgsave(plotter, fname);

%% Reconstruction
clear t i
h=waitbar(1,'Reconstructing, please wait...');
for t= 1:M
    RDE(:, :, t)=p_Mean;
    for i=1:r
        RDE(:, :, t)=RDE(:, :, t)+(Phi_Mode(:, :, i)*TimeC(i, t));
    end
end

waitbar(t/M, h, sprintf('%s%d%s', '%', round((t/M)*100), '/100'));
end
close(h);
disp('Reconstruction process...
Successful');

%% Check Orthonormality %%
clear i j
for i=1:r
    for j=1:r

OC(i, j)=(sum(sum(Phi_Mode(:, :, i).*Phi_Mode(:, :, j))))*((4.762*10^-
4)^2/M);
    end
end
disp('Orthonormality Check Results:');
disp('=====');
disp('=====');
disp(OC)

```



```

disp('=====');
=====');

%% Additional Graphs
j=1;
for i=(end_data-int_data+1):-1:1
    Temp(j,1)=EnergyDistribution(i,1);
    EnergyContent(j,1)=Temp(j,1);
    j=j+1;
end
clear plotter fname
plotter=figure(6+r);
clear xaxis
xaxis=1:10;
plot(xaxis,EnergyContent(1:10,1))
title('POD Modes Energy Content')
xlabel('Mode Number')
ylabel('Energy Content, x 100%')
grid on
fname='E:\TAITM2041\PART4\Sensor\graphs\EnergyContent';
hgsave(plotter,fname);
toc
%% End

```



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Kübra Asena Gelişli  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 23/04/1993, Ankara  
**E-posta** : k.asenagelisli@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, TOBB ETÜ, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2019, TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2016-2017	TOBB ETÜ	Proje Burslu Yüksek Lisans Öğrencisi
2017-2019	TOBB ETÜ	Proje Mühendisi (Personel)

### YABANCI DİL:

- İngilizce, iyi seviye
- Korece, orta seviye
- Almanca, başlangıç seviyesi

## TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Aradag, S., **Gelisli, K. A.**, Yaldir, E. C., 2017. Effects of Active and Passive Control Techniques on Mach 1.5 Cavity Flow Dynamics, *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2017, Article ID 8253264, 24 pages, <https://doi.org/10.1155/2017/8253264>
- **Gelisli, K. A.**, Aradag, S., 2017. Passive Control of Supersonic Cavity flow Pressure Oscillations, 8th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering, July 22-25, Prague, Czech Republic
- Yaldir, E. C., **Gelisli, K. A.**, Ozer, M. B., Tascioglu, Y., Aradag, S., 2018. Comparison of Open Source and commercial Software Simulation Results for supersonic Cavity Flow, 5th International Congress on Fundamental and Applied Sciences, June 18-22, Skopje, Macedonia.
- **Gelisli, K. A.**, Aradag, S., Tascioglu, Y., Ozer, M. B., 2019. Active and Passive Control of Supersonic Cavity Flow, 3rd International Conference on Mechatronics Systems and Control Engineering, February 26-28, Nice, France
- **Gelisli, K. A.**, Aradag, S., Tascioglu, Y., Ozer, M., B., 2019. Computational Fluid Dynamics and Proper Orthogonal Decomposition based control of flow over supersonic cavities, 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, May 20-23, Delft, The Netherlands