



**SÜPERSONİK KAVİTE AKIŞINDA ARKA DUVAR ETKİSİNİN
OPENFOAM AÇIK KAYNAK KODLU ÇÖZÜCÜ KULLANILARAK
SAYISAL İNCELENMESİ**

Engin TAŞKIRAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Engin TAŞKIRAN

04/02/2021

SÜPERSONİK KAVİTE AKIŞINDA ARKA DUVAR ETKİSİNİN OPENFOAM AÇIK KAYNAK KODLU ÇÖZÜCÜ KULLANILARAK SAYISAL İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Engin TAŞKIRAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2021

ÖZET

Yeni nesil savaş uçaklarının mühimmat taşıdıkları yerleri temsil eden kavite bölgesi üzerindeki yüksek hızlı akışlar, havacılık uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan, anlaşılması zor, karmaşık, zamana bağlı ve türbülanslı bir yapıya sahip olup, çözülmesi elzem bir problemdir. Bu doğrultuda literatürde birçok sayısal ve deneysel çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, süpersonik rejimde 1,4 Mach ile 1,8 Mach aralığında serbest akış hızına sahip olan dikdörtgen şeklindeki açık kavite akışının hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada; iki boyutlu, türbülanslı, sıkıştırılabilir akış için zamana bağlı Reynolds Ortalamalı Navier Stokes Denklemleri açık kaynak kodlu bir program olan OpenFOAM yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bulunan sonuçlar, kavitenin kritik bölgeleri olan arka ve alt duvar için basınç katsayıları ve ses basınç seviyeleri cinsinden sunulmuştur. Kavite bölgesinde yüksek hızlı akıştan ve türbülans kaynaklanan basınç salınımlarını ve ses basınç seviyelerini düşürebilmek için akışa pasif kontrol yöntemleri uygulanmıştır. Pasif kontrol yöntemleri kapsamında, kavitenin en kritik bölgesi olan arka duvar geometrisinde parametrik modifikasyonlar yapılarak kavitede oluşan gürültü seviyeleri azaltılmaya çalışılmıştır. Bu parametrik çalışmalar; kavite arka duvarına eğim verme çalışmaları, kavite arka duvarında hilal geometrisi oluşturma çalışmaları ve kavite arka duvar boyunu kısaltma çalışmalarıdır. Çalışmalarda kesme tabakası ile kavite arka duvar etkileşiminin azaltılması sonucunda ses basınç seviyelerinde iyileşmeler sağlanmıştır. Gürültü seviyelerini azaltan en iyi arka duvar geometrilerinin kombinasyonları ile sistematik bir şekilde parametrik eniyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmaların sonucunda gürültü seviyelerinin en iyi olduğu ideal kavite konfigürasyonu elde edilmiştir. Son olarak, en iyi sonuçları veren kavite konfigürasyonu için süpersonik rejimde farklı Mach sayılarının akışa etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan açık kaynak kodlu HAD çözücüsü OpenFOAM yazılımının güvenilirliği süpersonik kavite akışı için ispatlanmıştır.

Bilim Kodu : 91411

Anahtar Kelimeler : Kavite, OpenFOAM, süpersonik akış

Sayfa Adedi : 161

Danışman : Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA

NUMERICAL INVESTIGATION OF REAR WALL EFFECT IN SUPERSONIC CAVITY FLOW USING OPENFOAM

(M. Sc. Thesis)

Engin TAŞKIRAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2021

ABSTRACT

High velocity flows over cavity regions representing the places where new generation fighter aircrafts position weapons are difficult to understand, complex, time-dependent and involve highly turbulent structures, which are frequently encountered in aviation applications, and are an essential problem to be solved. In this direction, there are many numerical and experimental studies in the literature. In this study, a numerical analyzes of a rectangular open cavity flow with free stream velocity between 1.4 Mach and 1.8 Mach in supersonic regime are performed using Computational Fluid Dynamics (CFD). Time dependent Reynolds Averaged Navier Stokes Equations for two-dimensional, turbulent, compressible flow are solved using OpenFOAM, an open source code. The results are presented in terms of pressure coefficients and sound pressure levels for the rear and bottom wall, which are the critical regions of the cavity. Passive control methods have been applied to the flow in order to reduce the pressure fluctuations and sound pressure levels caused by high velocity flow and turbulence in the cavity region. Within the scope of the passive control methods, parametric modifications are made in the geometry of the rear wall which is the most critical part of the cavity, in order to reduce the noise levels generated in the cavity. These parametric studies are geometrical changes such as inclination of rear wall of the cavity, creating a crescent geometry on the rear wall of the cavity and shortening the rear wall height of the cavity. Due to the reduction of the interaction between the shear layer and the cavity rear wall, sound pressure levels are decreased. Systematically, parametric optimization studies are carried out with combinations of the best rear wall geometries that reduce noise levels. As a result of the studies, the ideal cavity configuration with the best noise levels is obtained. Finally, the effects of different Mach numbers on the flow in the supersonic regime have been investigated for best results. The reliability of the CFD solver OpenFOAM used in this study has also been proven for supersonic cavity studies.

Science Code : 91411

Key Words : Cavity, OpenFOAM, supersonic flow

Page Number : 161

Supervisor : Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada sürekli olarak yardım ve yönlendirmeleri ile bana katkıda bulunan, tecrübelerinden ve derin bilgi birikiminden yararlandığım, örnek bir akademisyen Sayın Hocam Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Değerli tez jüri üyeleri Sayın Hocam Prof. Dr. Selin ARADAĞ ve Sayın Hocam Dr. Öğr. Üyesi Tamer ÇALIŞIR'a tezimi değerlendirdikleri, vermiş oldukları geri bildirimler ve jürimde yer aldıkları için teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma TM2041 No'lu "Süpersonik Kavitelerin HAD ile Aerodinamik Analizleri, Aktif ve Pasif Kontrol Çalışmaları" adlı Türk Havacılık ve Uzay Sanayii projesinin devamı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yüksek lisans eğitimim boyunca bana sağlamış olduğu imkânlardan dolayı Türk Havacılık ve Uzay Sanayii'ne teşekkürlerimi sunarım.

Beni her türlü zorluklara göğüs gererek büyüten ve bugünlere gelmemi sağlayan aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	11
2.1. Deneysel Çalışmalar.....	11
2.2. Sayısal Çalışmalar	18
2.3. Literatür Çalışması ile Mevcut Çalışmanın Karşılaştırılması	23
3. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL FORMÜLASYON.....	25
3.1. Problemin Genel Tanımı	25
3.2. Fiziksel Model.....	25
3.2.1. Varsayımlar	26
3.3. Matematiksel Modelin Tanımlanması.....	26
3.3.1. Korunum denklemleri	27
3.3.2. Türbülanslı akış ve türbülans denklemleri	29
3.4. Sınır Şartları	34
3.5. Ard İşleme Yöntemleri.....	35
4. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ VE OPENFOAM YAZILIMI.....	39

	Sayfa
4.1. OpenFOAM Yazılımı.....	39
4.1.1. Sonlu hacimler yöntemi	40
4.1.2. Sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırma	41
5. REFERANS DENEYSEL ÇALIŞMALARIN DOĞRULANMASI VE LİTERATÜRLE KARŞILAŞTIRILMASI.....	45
5.1. Birincil Referans Deneysel Çalışmanın Doğrulanması.....	45
5.1.1. Sayısal çalışmanın hücre sayısından bağımsızlaştırılması.....	49
5.1.2. Sayısal çalışmanın zaman adımından bağımsızlaştırılması	56
5.1.3. Sayısal çalışmanın uzak alan bölgesinden bağımsızlaştırılması	57
5.1.4. HAD sonuçlarının birincil deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.....	66
5.2. İkincil Referans Deneysel Çalışmanın Doğrulanması	67
5.2.1. Sayısal çalışmanın hücre sayısından bağımsızlaştırılması.....	68
5.2.2. HAD sonuçlarının ikincil deneysel sonuçlarla karşılaştırılması	78
6. PARAMETRİK SAYISAL ÇALIŞMALAR	79
6.1. Kavite Arka Duvarına Eğim Verme Çalışmaları	80
6.2. Kavite Arka Duvarına Eğrilik Verme (Hilal Geometrisi) Çalışmaları	91
6.3. Kavite Arka Duvar Boyunu Kısaltma (Offset Verme) Çalışmaları	103
6.4. Kavite Arka Duvar Eğiminin 30° Olduğu Durumda Arka Duvar Üst Köşesinden Eğrilik Verme Çalışmaları.....	113
6.5. Kavite Arka Duvar Eğiminin 30° Olduğu Durumda Arka Duvara Tabandan Eğrilik Verme (Hilal Geometrisi) Çalışmaları.....	123
6.6. 30° Eğimli Kavite Arka Duvarına 90°'lik Eğrilik Oluşum Açısı ile Oluşan Hilal Geometrisinin Yerleştirildiği TC90 Konfigürasyonu için Süpersonik Rejimde Mach Sayısının Akışa Etkileri	135
6.7. Parametrik Çalışma Sonuçlarının Toplu Değerlendirilmesi	141
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	145
KAYNAKLAR	149

	Sayfa
EKLER.....	153
EK-1. OpenFOAM çözüm çıktıları örneği	154
EK-2. MATLAB FFT kodu	155
ÖZGEÇMİŞ	161



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. $k - \omega$ türbülans model sabitleri	33
Çizelge 5.1. Kaufman ve Clark'ın [14] deneysel çalışma koşulları	46
Çizelge 5.2. Kullanılan ayırıklaştırma şemaları	47
Çizelge 5.3. Ağ yapılarında kullanılan hücre sayıları	49
Çizelge 5.4. Ağ yapılarının özellikleri	50
Çizelge 5.5. Ağ yapılarının baskın ilk dört frekans mod değerleri ve Rossiter Modu ile kıyaslaması	53
Çizelge 5.6. Kavite bölgesi uzak alan bağımsızlaştırması konfigürasyon özellikleri.....	58
Çizelge 5.7. Xiansheng vd.'nin [42] deneysel çalışma koşulları	68
Çizelge 5.8. Ağ yapılarında kullanılan hücre sayıları	69
Çizelge 5.9. Ağ yapılarının özellikleri	70
Çizelge 6.1. Parametrik çalışma tablosu bilgileri	79
Çizelge 6.2. Kavite arka duvarına eğim verme çalışmaları konfigürasyon özellikleri...	82
Çizelge 6.3. Kavite arka duvar eğim çalışmaları sonucunda TK ile E30 konfigürasyonlarının kavite alt duvarı için SPL değerleri.....	90
Çizelge 6.4. Kavite arka duvar eğim çalışmaları sonucunda TK ile E30 konfigürasyonlarının kavite arka duvarı için SPL değerleri.....	91
Çizelge 6.5. Kavite arka duvarına eğrilik verme konfigürasyon özellikleri	93
Çizelge 6.6. Kavite arka duvar hilal geometri çalışmaları sonucunda TK ile C90 konfigürasyonlarının kavite alt duvarı için SPL değerleri.....	102
Çizelge 6.7. Kavite arka duvar hilal geometri çalışmaları sonucunda TK ile C90 konfigürasyonlarının kavite arka duvarı için SPL değerleri.....	102
Çizelge 6.8. Kavite bölgesi arka duvar boyunu kısaltma konfigürasyon değerleri	104
Çizelge 6.9. Kavite arka duvar boyunu kısaltma çalışmaları sonucunda TK ile O20 konfigürasyonlarının kavite alt duvar konumu için SPL değerleri.....	111

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.10. Kavite arka duvar boyunu kısaltma çalışmaları sonucunda TK ile O20 konfigürasyonlarının kavite arka duvar konumu için SPL değerleri.....	112
Çizelge 6.11. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvar üst köşesine eğrilik verme çalışmaları konfigürasyon özellikleri	115
Çizelge 6.12. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvar üst köşesine eğrilik verme çalışmaları sonucunda TK ile EC5 konfigürasyonlarının kavite alt duvar konumu için SPL değerleri.....	122
Çizelge 6.13. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvar üst köşesine eğrilik verme çalışmaları sonucunda TK ile EC5 konfigürasyonlarının kavite arka duvar konumu için SPL değerleri.....	123
Çizelge 6.14. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvara tabandan eğrilik verme çalışmaları konfigürasyon değerleri.....	125
Çizelge 6.15. Kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvara tabandan eğrilik verme çalışmaları sonucunda TK ile TC90 konfigürasyonlarının kavite alt duvar konumu için SPL değerleri	133
Çizelge 6.16. Kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvara tabandan eğrilik verme çalışmaları sonucunda TK ile TC90 konfigürasyonlarının kavite arka duvar konumu için SPL değerleri	134
Çizelge 6.17. Süpersonik rejimdeki parametrik çalışmaların akış özellikleri	136
Çizelge 6.18. Temel kavite konfigürasyonu parametrik çalışma metotları	142
Çizelge 6.19. Kavite arka duvarına 30°'lik açı verilen E30 konfigürasyonu parametrik çalışma tablosu	144

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Kavite bölgesi akış fiziği	4
Şekil 1.2. Kapalı kavite akışı a) ses altı hızlar için b) ses üstü hızlar için	5
Şekil 1.3. Geçiş bölge kavite akışı	6
Şekil 1.4. Açık kavite akışı a) ses altı hızlar için b) ses üstü hızlar için	7
Şekil 1.5. Rossiter mekanizması	8
Şekil 1.6. Farklı Mach sayılarına göre T.S.R.2 kavite bölgesi rezonans frekans değerleri	9
Şekil 2.1. Kavite akış mekanizmaları ve basınç dağılımları	13
Şekil 2.2. Kavite arka duvar boyunun kısaltılması	16
Şekil 2.3. Kavite arka duvarına eğim verme konfigürasyonu	17
Şekil 2.4. Kavite arka duvarında hem eğim hem de boy kısaltma konfigürasyonu	18
Şekil 2.5. Kavite bölgesi kesme tabakası etkileşim mekanizması	19
Şekil 2.6. Kavite bölgesine küçük kaviteler ekleyerek kontrol çalışması	20
Şekil 2.7. Kavite ön duvarına engel ekleyerek akış kontrol çalışması örneği	21
Şekil 2.8. Farklı arka duvar geometrilerinde akış davranışları (Mach, türbülanslı kinetik enerji ve ses basınç seviyeleri cinsinden)	22
Şekil 3.1. Fiziksel modelin iki boyutlu görünümü ve koordinat sistemi	26
Şekil 3.2. Fiziksel problemin sınır şartları	34
Şekil 3.3. Kavite bölgesi kritik nokta konumu	36
Şekil 4.1. OpenFOAM dosya yapısı	39
Şekil 4.2. Herhangi bir kontrol hacmi	41
Şekil 5.1. Kaufman ve Clark'ın [14] deneysel çalışma modeli	45
Şekil 5.2. Kavite arka duvar kritik noktasının basınç – zaman grafiği	48
Şekil 5.3. Ağ yapısı 1	50

Şekil	Sayfa
Şekil 5.4. Ağ yapısı 6	51
Şekil 5.5. Ağ yapılarının kavite alt duvarında basınç katsayıları cinsinden karşılaştırılması	52
Şekil 5.6. Ağ yapısı 3 için basınç – zaman grafiği.....	54
Şekil 5.7. Ağ yapısı 3 için güç – frekans grafiği.....	54
Şekil 5.8. Ağ yapılarının kavite alt duvarında ses basınç seviyeleri cinsinden karşılaştırılması.....	55
Şekil 5.9. Ağ yapısı 3 ile deneysel çalışmanın kavite alt duvarı için ses basınç seviyeleri cinsinden karşılaştırılması	56
Şekil 5.10. Zaman adımı çalışmalarının kavite alt duvarında ses basınç seviyeleri cinsinden karşılaştırılması	57
Şekil 5.11. Kavite bölgesi uzak alan bağımsızlaştırması parametreleri.....	58
Şekil 5.12. Uzak alan bölgelerinin kavite alt duvarında ses basınç seviyesi cinsinden karşılaştırılması	59
Şekil 5.13. Ağ yapısı 3 için zamana bağlı x yönündeki vektörel hız dağılımları	62
Şekil 5.14. Ağ yapısı 3 için zamana bağlı sıcaklık konturları	64
Şekil 5.15. Ağ yapısı 3 için zamana bağlı türbülans kinetik enerji dağılımı	66
Şekil 5.16. Xiansheng vd.'nin [42] deneysel çalışma modeli	67
Şekil 5.17. Ağ yapısı 1	71
Şekil 5.18. Ağ yapısı 5	72
Şekil 5.19. Ağ yapılarının kavite alt duvarı için ses basınç seviyeleri cinsinden karşılaştırılması	73
Şekil 5.20. Ağ yapısı 5 için zamana bağlı x yönündeki vektörel hız dağılımları	74
Şekil 5.21. Ağ yapısı 5 için zamana bağlı sıcaklık konturları	76
Şekil 5.22. Ağ yapısı 5 zamana bağlı türbülans kinetik enerji dağılımı	77
Şekil 6.1. Kavite arka duvar eğim çalışmalarının şematik gösterimi	81
Şekil 6.2. Kavite arka duvarına eğim verme çalışmalarının alt duvar konumuna göre SPL grafiği.....	83

Şekil	Sayfa
Şekil 6.3. Kavite arka duvarına eğim verme çalışmalarının arka duvar konumuna göre SPL grafiği.....	84
Şekil 6.4. Parametrik arka duvar eğim çalışmaları için x yönündeki vektörel hız dağılımları.....	86
Şekil 6.5. Parametrik arka duvar eğim çalışmaları için türbülans kinetik enerji konturları.....	88
Şekil 6.6. Parametrik arka duvar eğim çalışmaları için arka duvarda oluşan türbülans kinetik enerji konturları	90
Şekil 6.7. Kavite arka duvarına eğrilik verme (hilal geometrisi) çalışmalarının şematik gösterimi.....	92
Şekil 6.8. Kavite arka duvarına eğrilik verme (hilal geometrisi) çalışmalarının alt duvar konumuna göre SPL grafiği.....	94
Şekil 6.9. Kavite arka duvar eğrilik verme (hilal geometrisi) çalışmalarının arka duvar konumuna göre SPL grafiği.....	95
Şekil 6.10. Parametrik arka duvar hilal geometri çalışmaları için vektörel hız dağılımları.....	97
Şekil 6.11. Parametrik arka duvar hilal geometri çalışmaları için türbülanslı kinetik enerji konturları	99
Şekil 6.12. Parametrik arka duvar hilal geometri çalışmaları için yakınlaştırılmış arka duvar türbülanslı kinetik enerji konturları	101
Şekil 6.13. Kavite arka duvar boyunu kısaltma (offset verme) çalışmalarının şematik gösterimi	103
Şekil 6.14. Kavite arka duvar boyunu kısaltma (offset verme) çalışmalarının alt duvar konumuna göre SPL grafiği.....	105
Şekil 6.15. Kavite arka duvar boyunu kısaltma (offset verme) çalışmalarının arka duvar konumuna göre SPL grafiği	106
Şekil 6.16. Parametrik arka duvar boyunu kısaltma çalışmaları için vektörel hız dağılımları.....	108
Şekil 6.17. Parametrik arka duvar boyunu kısaltma çalışmaları için türbülanslı kinetik enerji konturları	109
Şekil 6.18. Parametrik arka duvar boyunu kısaltma çalışmaları için arka duvar türbülanslı kinetik enerji dağılımı	111

Şekil	Sayfa
Şekil 6.19. Kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durum için kavite arka duvarının üst köşesinden eğrilik verme çalışmalarının şematik gösterimi	114
Şekil 6.20. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvar üst köşesine eğrilik verme çalışmalarının alt duvar konumuna göre SPL grafiği	116
Şekil 6.21. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvar üst köşesine eğrilik verme çalışmalarının arka duvar konumuna göre SPL grafiği	117
Şekil 6.22. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvar üst köşesine eğrilik verme çalışmalarının vektörel hız dağılımları.....	118
Şekil 6.23. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvar üst köşesine eğrilik verme çalışmalarının türbülanslı kinetik enerji konturları .	120
Şekil 6.24. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvar üst köşesine eğrilik verme çalışmalarının arka duvar türbülanslı kinetik enerji konturları	121
Şekil 6.25. Kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durum için kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme çalışmalarının şematik gösterimi	124
Şekil 6.26. Kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durum için kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme çalışmalarının arka duvar konumuna göre SPL grafiği	126
Şekil 6.27. Kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durum için kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme çalışmalarının arka duvar konumuna göre SPL grafiği	127
Şekil 6.28. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme çalışmalarının vektörel hız dağılımları ...	128
Şekil 6.29. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme çalışmalarının türbülanslı kinetik enerji konturları	130
Şekil 6.30. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme çalışmalarının arka duvar türbülanslı kinetik enerji konturları	132
Şekil 6.31. TC90 konfigürasyonunun farklı Mach sayılarında kavite alt duvarı için SPL grafiği.....	137
Şekil 6.32. TC90 konfigürasyonunun farklı Mach sayılarında kavite arka duvarı için SPL grafiği.....	138

Şekil	Sayfa
Şekil 6.33. TC90 konfigürasyonunun süpersonik rejimde farklı Mach sayılarında vektörel hız dağılımları.....	139
Şekil 6.34. TC90 konfigürasyonunun süpersonik rejimde farklı Mach sayılarında türbülanslı kinetik enerji konturları	141



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. F15 savaş uçağı gövde dışarısında mühimmat bırakma bölgesi	1
Resim 1.2. F35 savaş uçağı gövde içerisinde mühimmat bırakma bölgesi	2
Resim 2.1. Kavite akış modeli	12
Resim 3.1. Farklı rejimlerde sayısal kavite çalışmalarının özeti	32



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
C	Kavite arka duvar eğrilik uzunluğu (m)
C_p	Basınç katsayısı
D	Kavite derinliği (m)
dB	Desibel
E	Kavite eğim oranı
f	Frekans (Hz)
f_1, f_2, f_3, f_4	Frekans modları değerleri (Hz)
Hz	Hertz
k	Türbülans kinetik enerjisi (m^2/s^2)
K	Rossiter formülasyonu deneysel sabiti
K	Kavite eğrilik oranı
L	Kavite uzunluğu (m)
L/D	Kavite uzunluk/derinlik oranı
L/W	Kavite uzunluk/genişlik oranı
M	Mach Sayısı
M_∞	Serbest ortam Mach Sayısı
m	Mod sayısı
O	Kavite offset oranı
P	Basınç (Pa)
p_∞	Serbest akış basınç değeri (Pa)
Pa	Pascal
R	Kavite açısı uzunluğu (m)
Re	Reynolds Sayısı
St	Strouhal Sayısı
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
t	Zaman (s)

Simgeler**Açıklamalar****x-y-z**

Koordinat sistemleri

 t_r

Rossiter periyodu (s)

 u_∞

Serbest ortam akış hızı (m/s)

V

Serbest akış hızı (m/s)

W

Kavite genişliği (m)

W/D

Kavite genişlik/derinlik oranı

 ρ Yoğunluk (kg/m³) **μ**

Dinamik viskozite (kg/m.s)

 μ_T

Türbülans viskozitesi

 ω

Türbülanslı kinetik enerji yitim oranı

 δ

Rossiter formülasyonu deneysel sabiti

 Δt

Zaman adımı (s)

Kısaltmalar**Açıklamalar****DES**

Detached Eddy Simulation

FFT

Hızlı Fourier Dönüşümü

HAD

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

LES

Large Eddy Simulation

PISO

Pressure Implicit with Splitting of Operator

RANS

Reynolds Averaged Navier Stokes Equations

SIMPLE

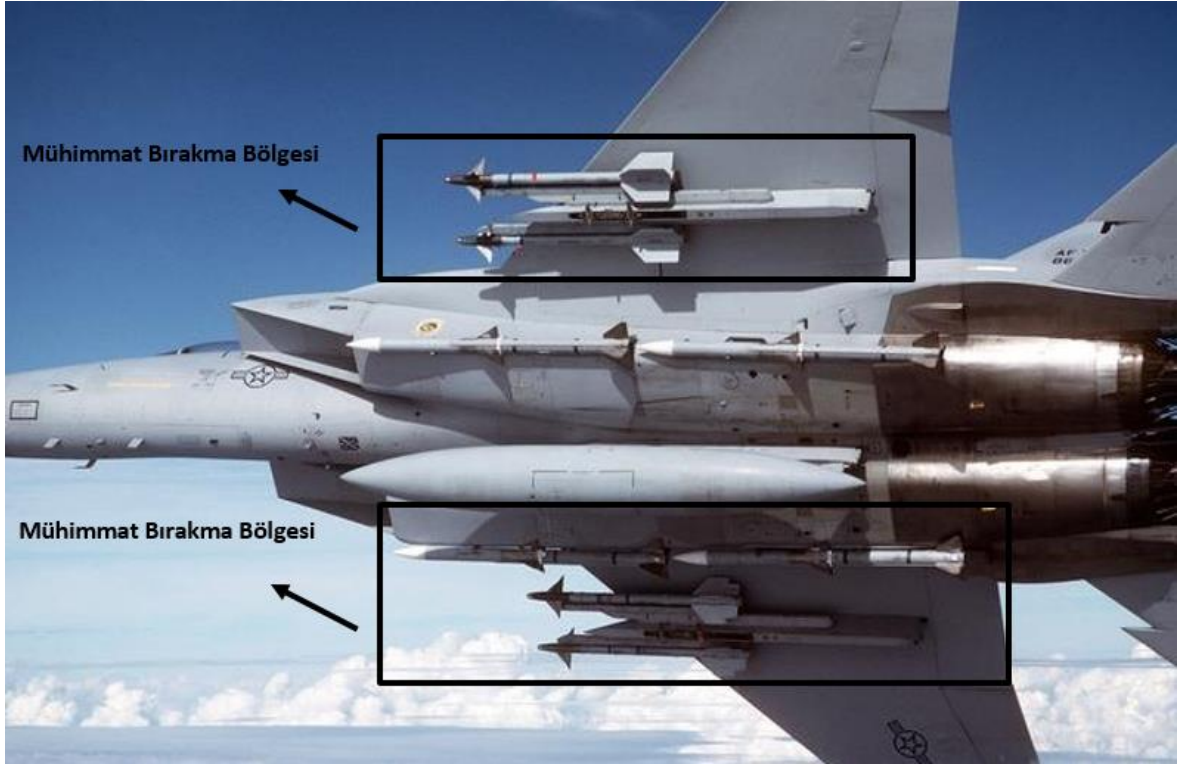
Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

SPL

Ses Basınç Seviyesi

1. GİRİŞ

Savaş uçaklarında mühimmat bırakma çalışmaları 1940'lı yılların başından bu yana dikkate alınan oldukça problemlili bir uygulamadır. Özellikle yüksek ses altı (subsonik), ses ötesi (transonik) ve ses üstü (süpersonik) akışlarda mühimmat bırakılırken maruz kalınan rejim oldukça zorlayıcıdır [1]. Mühimmat bırakma çalışmaları uçak gövdesi içerisinde ve dışarısında olmak üzere iki kategoride incelenebilir. Dördüncü nesil ve altındaki savaş uçaklarında mühimmatlar kanat altına yerleştirilen pylonlar aracılığı ile gövde dışarısında taşınır. Resim 1.1'de gövde dışarısında mühimmat taşıyan F15 savaş uçağı [2] gösterilmiştir.



Resim 1.1. F15 savaş uçağı gövde dışarısında mühimmat bırakma bölgesi [2]

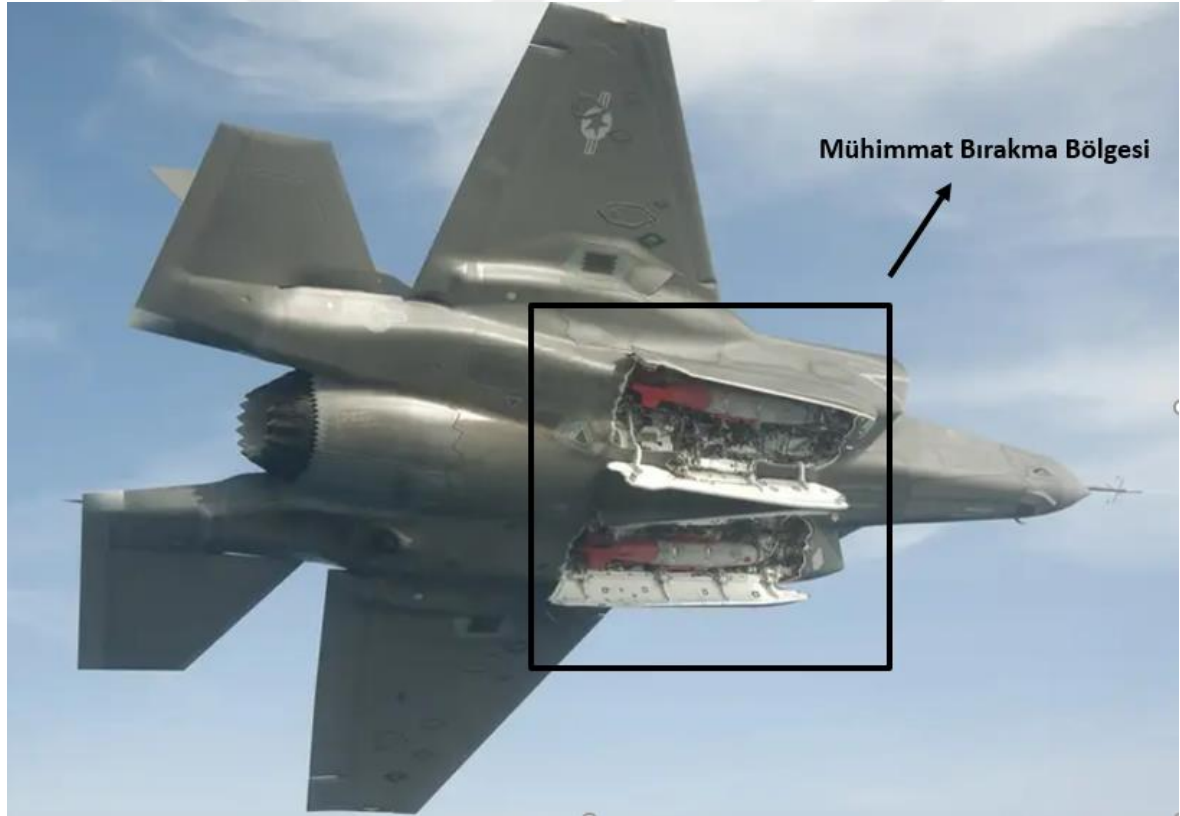
Beşinci nesil modern savaş uçaklarında mühimmatlar uçak gövdesi içerisinde taşınmaktadır. Resim 1.2'de gövde içerisinde mühimmat taşıyan F35 savaş uçağı [3] gösterilmiştir. Modern savaş uçaklarında mühimmatların gövde içerisinde taşınmalarının birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Uçağın düşük görünürlükte uçuşması
- Uçağın radara yakalanma riskinin azalması

- Maruz kalınan sürüklenme kuvvetinin azalması
- Aerodinamik ısınmanın azalması
- Uçağın manevra yeteneğinin artması
- Uçağın beka ve ömrünün artması

Yukarıda sayılan sebeplerden dolayı uçakların mühimmat bırakma bölgelerindeki akış fiziğinin anlaşılması havacılık uygulamalarında vazgeçilmez bir alan olarak sınıflandırılır.

Savaş uçaklarının mühimmat bıraktıkları bölge havacılık uygulamalarında *kavite bölgesi* olarak adlandırılır. Havacılık uygulamalarında kavite bölgesi olarak adlandırılan farklı uçak komponentleri de bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak hava aracı tekerleklerinin bulunduğu iniş takımları verilebilir [1].



Resim 1.2. F35 savaş uçağı gövde içerisinde mühimmat bırakma bölgesi [3]

Kavite içerisindeki yüksek hızlı akış alanı güçlü akustik etkiler, kararsızlık, düzensizlik ve türbülans içerir. Akış alanında oluşan bu kararsız ve güçlü yapılar aerodinamik ve aeroakustik açıdan yapısal ve geri dönüşü olmayan hasarlar meydana getirebilir. Dolayısıyla kavite içerisinde oluşan akış fiziğini ve doğasını anlamak, oluşabilecek hasarların önüne geçecektir. Bu yüzden Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

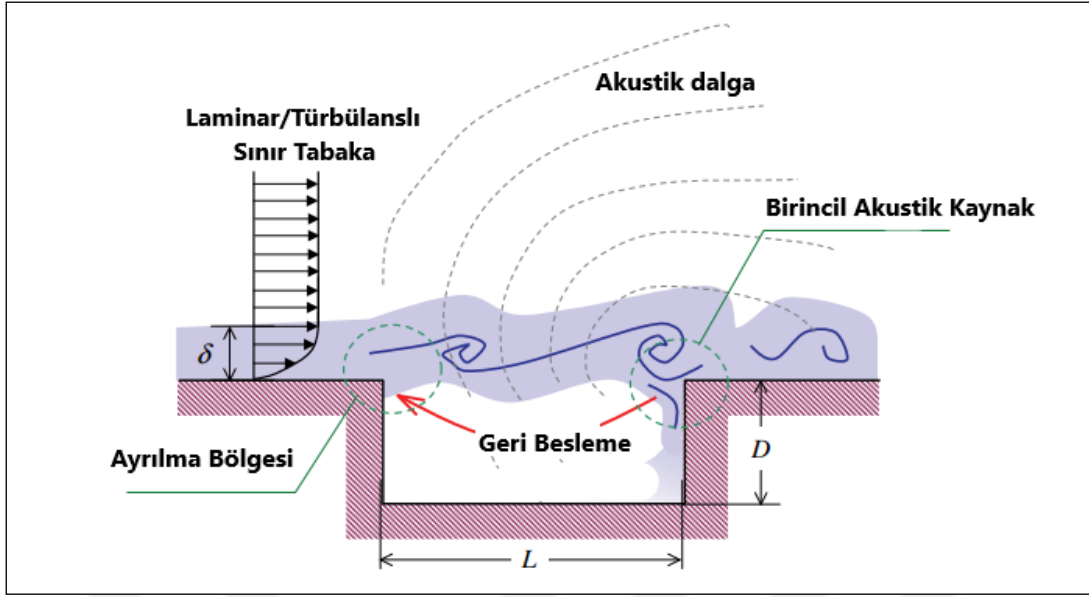
simülasyonlarıyla ve rüzgar tüneli deneyleriyle kavite akış fiziği anlaşılmaya ve kontrol edilmeye çalışılmıştır.

Kavite Akışı

Kavite araştırmaları konusunda yapılan çalışmalara göre kavite akışı içerisindeki akış davranışının büyük ölçüde kavite geometrisine ve serbest akım hızına bağlı olduğu yönündedir. Kaviterler önceleri sadece geometrik özelliklerine göre sınıflandırıldıklarında derin ve sığ kaviterler olmak üzere iki grupta incelenmiştir. Derin kaviterlerin özelliği kavite geometrisi derinliğinin (D), uzunluğundan (L) büyük olmasıdır. Sığ kaviterlerde ise kavite uzunluğu (L) kavite derinliğinden (D) büyüktür. Derin kaviterlerde en fazla iki sirkülasyon bölgesi oluşurken, sığ kaviterlerde daha fazla sirkülasyon bölgeleri oluşabilir.

Daha sonraları yapılan çalışmalarda kavite duvarlarındaki basınç katsayılarının hesaplanması ile kaviterler üç grupta incelenmiştir. Bunlar *açık*, *kapalı* ve *geçişli* kaviterlerdir [1].

Genel olarak kavite akış fiziğini anlatmak gerekirse; kavite bölgesine doğru gelen serbest akış kavite ön duvar köşesinde ayrılmaya uğrar. Bu ayrılma sonucunda akışın bir bölümü kaviteyi aşar, akışın diğer bölümü ise kavite bölgesi içerisine doğru ilerleyerek dönmeye ve girdap oluşumuna sebep olur. Kavite iç bölgesi ve dış bölgesini ayıran tabakaya kesme (kayma) tabakası adı verilir. Kavite akışında akustik dalga oluşumunu tetikleyen olay arka duvara akışın çarpmasıdır. Şekil 1.1’de kavite akış fiziğinin yapısı gösterilmiştir.



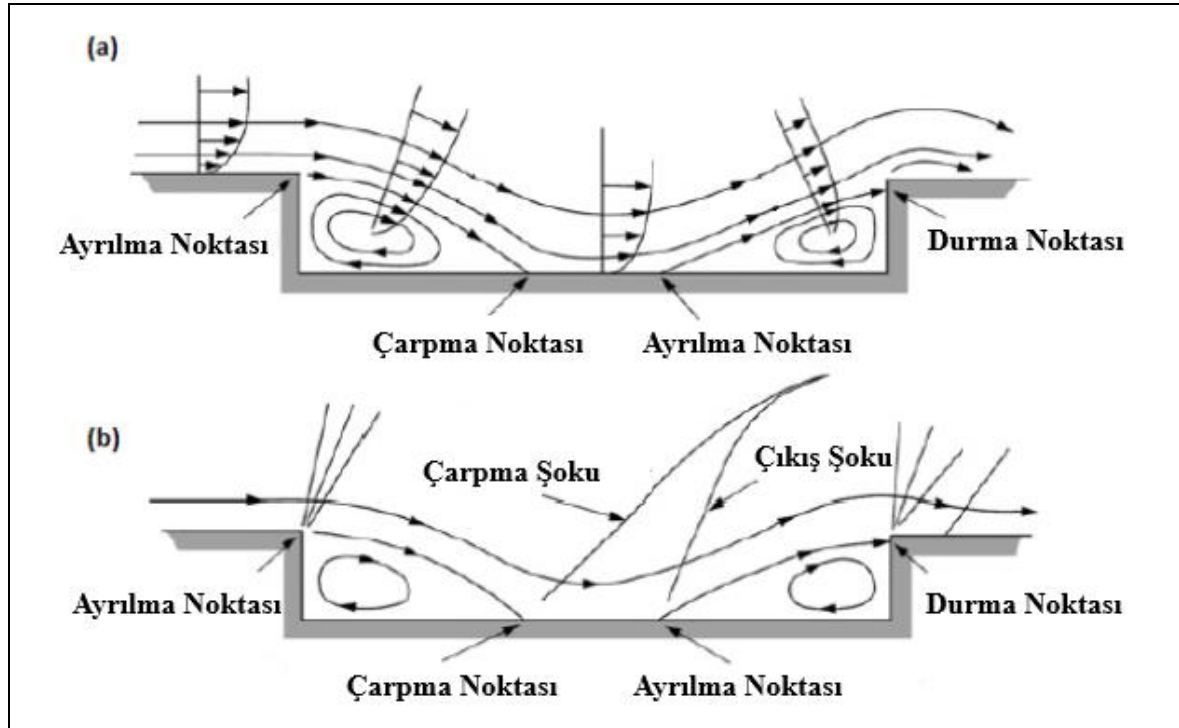
Şekil 1.1. Kavite bölgesi akış fiziği [4]

Tracy ve diğ. [5] yaptıkları çalışmalarda ses ötesi ve ses altı koşullar altında akustik ton oluşumunu incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda akış rejimindeki Reynolds sayısının kavitede oluşan ses basınç seviyelerini çok az etkilediğini görmüşlerdir. Kavite geometrisinin akış özelliklerini domine etmediğini serbest ortam hızının dolayısıyla Mach sayısının etkisinin de olduğunu tespit etmişlerdir.

Plentovich ve diğ. [6] ses altı ve transonik akış koşullarında kavite akış davranışının sınırlarını belirlemek için çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada transonik rejimdeki kavite akışı ile sesaltı rejimdeki kavite akışının arasındaki farklılığın sadece kavite uzunluk derinlik (L/D) oranına bağlı değil, Mach sayısı ve genişlik derinlik (W/D) oranına da bağlı olduğunu görmüşlerdir.

Kapalı Kavite

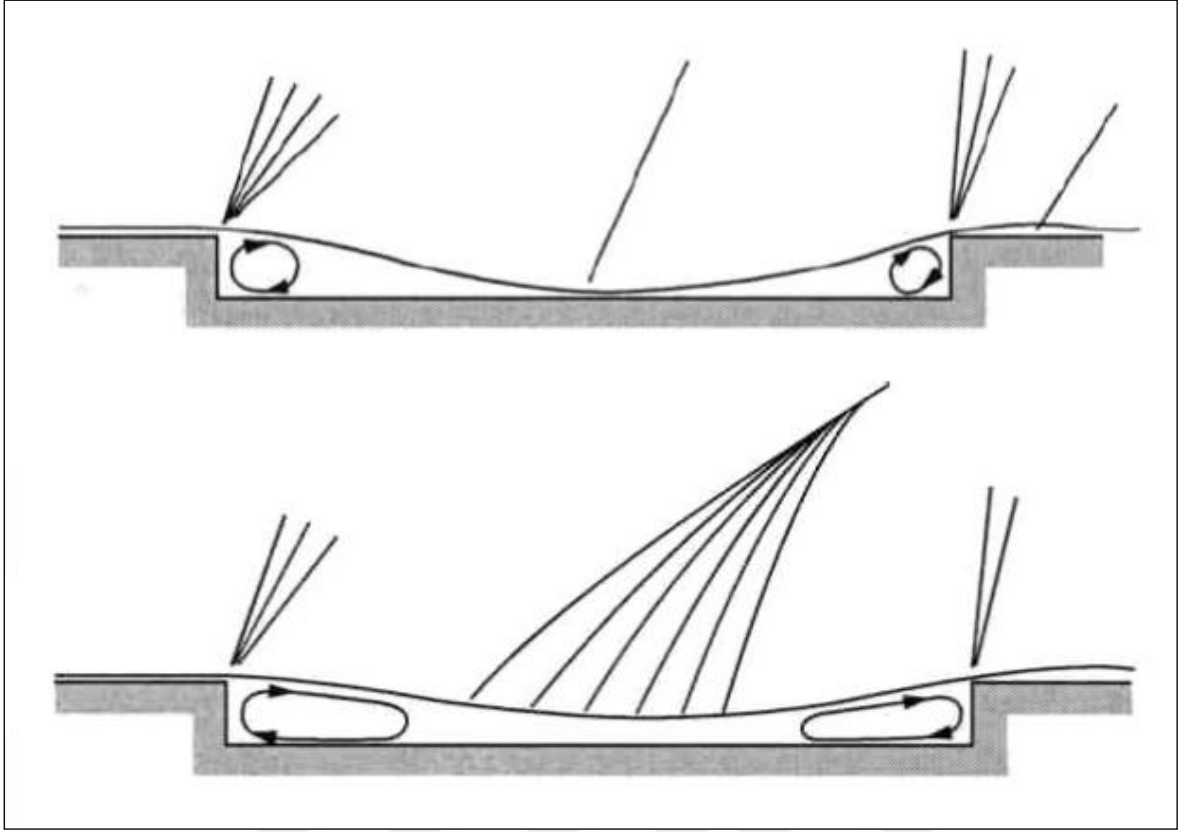
Kapalı kavitelerde serbest akış ile gelen sınır tabakası kavite ön duvar köşesinde ayrılarak kavite tabanına çarpar. Kavite tabanına (alt duvarına) akışın çarpmasının nedeni akış enerjisinin kaviteyi aşabilecek enerjiye sahip olmamasıdır. Kavite tabanına çarpan akış daha sonra kavite tabanından ayrılır ve tekrardan kavite arka duvar köşesinde durma noktası meydana getirerek kayma tabakası ile tekrar birleşir. Şekil 1.2’de ses altı ve ses üstü hızlar için kapalı kavite akış mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Kapalı kavite akışı a) ses altı hızlar için b) ses üstü hızlar için [7]

Geçişli Kavite

Geçiş bölgesi kavite akışı; açık ve kapalı kavite akış sınırları arasında gerçekleşir. Uzunluk derinlik oranı (L/D) oranı 10 ile 13 arasında kalan bölge geçiş bölgesi olarak kabul edilmektedir. L/D oranı 10'dan küçüldükçe kavite akışı özellikleri açık kaviteye, 13'den büyüldükçe kapalı kavite özelliklerini barındırır. Şekil 1.3'de geçiş bölgesi kavite akışı mekanizması gösterilmiştir.

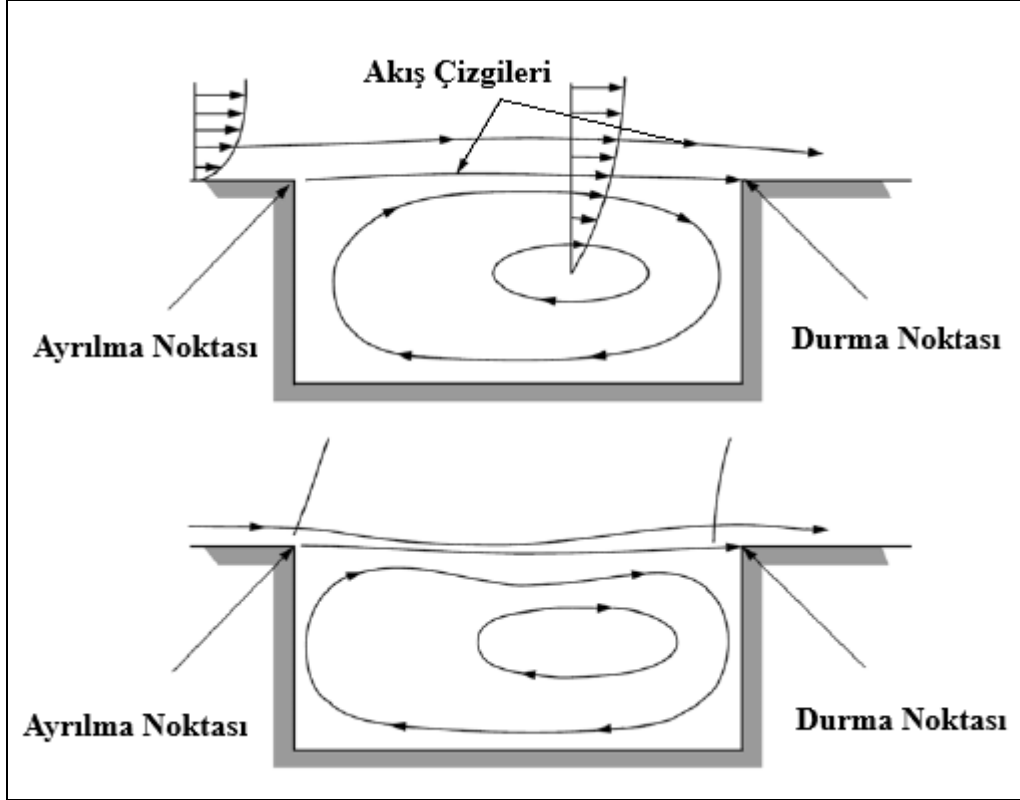


Şekil 1.3. Geçiş bölge kavite akışı [6]

Açık Kavite

Süpersonik kavite akışlarında Stallings ve Wilcox [8]'a göre açık kaviteler; kavite uzunluğunun (L) derinliğine (D) oranının 10'dan küçük veya eşit olduğu geometrilerde meydana gelir. Açık kavite akışları derin kavitelerde oluşmaktadır. Açık kavitelerde serbest akış ile gelen sınır tabakası kavite ön duvarından ayrılır ve kavite arka duvarında tekrar birleşir. Bu birleşmeyle birlikte serbest akış bölgesi ile kavite içerisindeki akış bölgesi arasında bir kesme tabakası oluşur. Dolayısıyla oluşan bu kesme tabakası akışı kavite içi ve dışı olmak üzere iki bölgeye ayırır. Açık kavite akışında kavite içerisinde büyük ve düzenli sirkülasyon bölgeleri oluşur. Bu düzenli sirkülasyon bölgeleri kavite duvarlarındaki basınç katsayılarını oldukça homojen yapar. Basınç katsayılarındaki bu düzenli dağılım mühimmat bırakma bölgelerinde arzu edilen bir isterdir. Açık kavite akışında; arka duvardaki basınç katsayılarında ise nispeten düzensizlik ve artış görülebilir. Ayrıca kesme tabakasının kontrolsüz olarak arka duvara çarpması; yüksek yoğunluklu akustik dalgaların oluşumuna sebep olur ve kavite bölgesinde istenmeyen hasarlara sebep

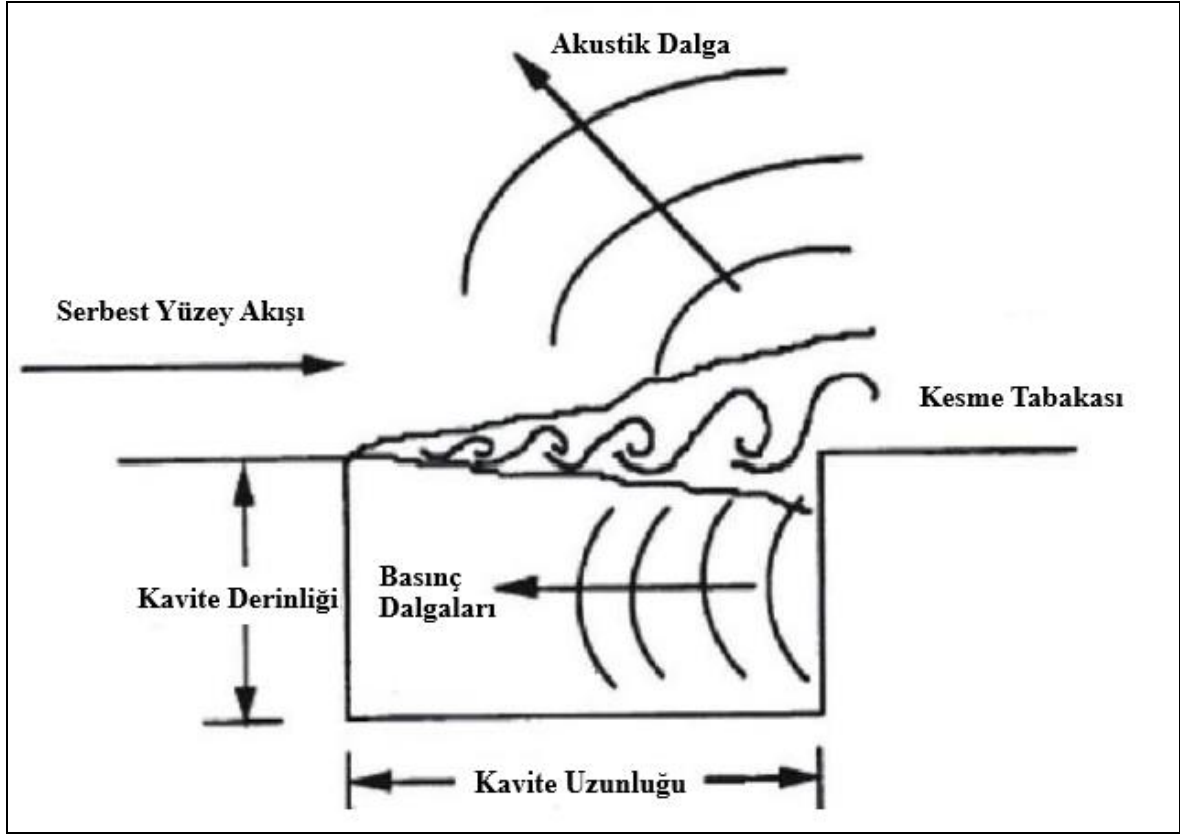
olabilir. Şekil 1.4’de ses altı ve ses üstü hızlar için açık kavite akış mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Açık kavite akışı a) ses altı hızlar için b) ses üstü hızlar için [7]

Rossiter Mekanizması

Kavite çalışmalarının öncü araştırmacılarından birisi olan Rossiter [9-11]; yapmış olduğu çeşitli deneylerden sonra kavite içerisinde oluşan mekanizmayı dört bölüme ayırmıştır. İlk olarak, girdaplar kavite ön duvar köşesinde oluşur ve arka duvara doğru ilerler. İkinci bölümde girdaplar arka duvar köşesine çarparak akustik dalgaları oluşturur. Üçüncü bölümde oluşan akustik dalgalar ikiye ayrılırlar; kavite dışında doğru ilerleyen dalgalar akustik alan oluştururken, kavite içerisine ilerleyen dalgalar ise basınç dalgalarını oluşturur. Son bölümde ise kavite içerisinde ön duvara doğru ilerleyen dalgalar ön duvara çarpar ve kesme tabakasında yeni girdap oluşumu tetiklenir. Bu oluşum akustik dalgalar ve girdaplar tarafından geri besleme mekanizması olarak kendini tekrar eder. Oluşan geri besleme mekanizması Şekil 1.5’de gösterilmiştir.

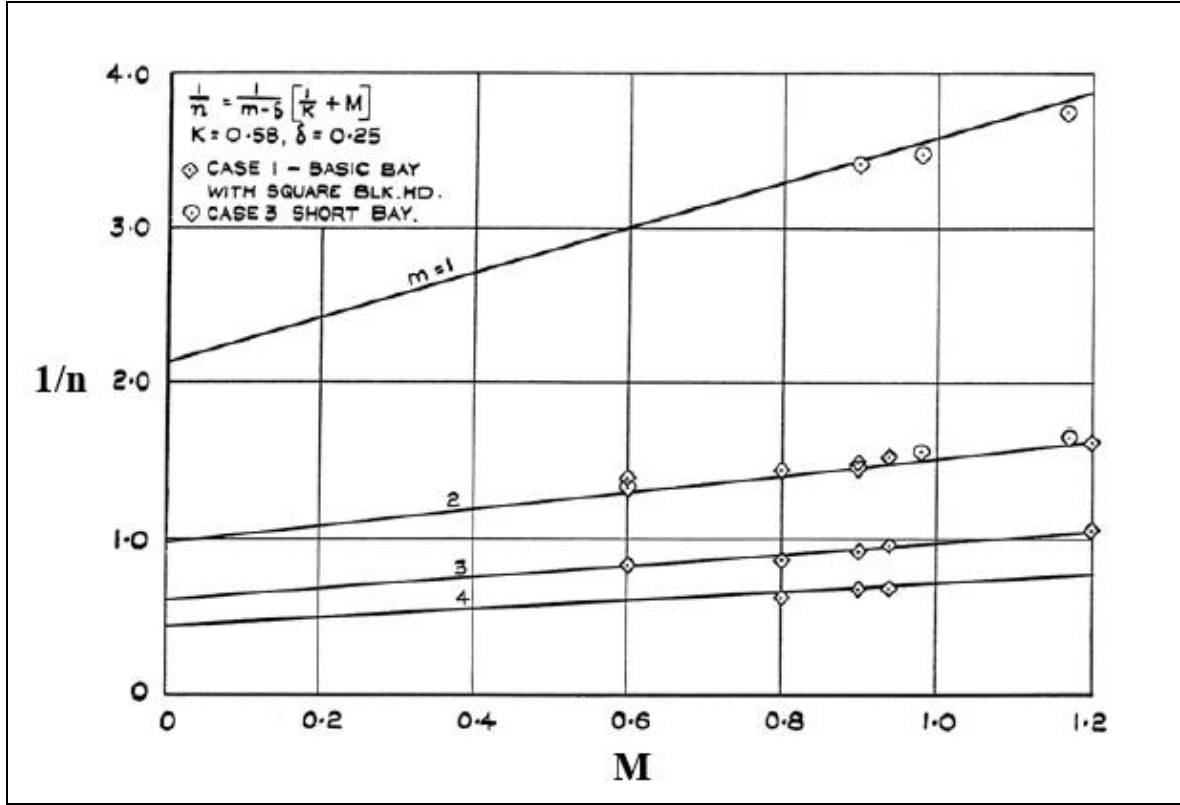


Şekil 1.5. Rossiter mekanizması [12]

Rossiter çeşitli kavite geometrilerinde ses altı rejimden ses üstü rejime kadar birçok deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Yaptığı çalışmalar sonucunda basınç dalgalanmalarının frekans değerini bulmaya yarayan yarı ampirik bir formül önermiştir. Rossiter'e göre; basınç dalgalanmalarının olduğu frekans yaklaşık olarak serbest akış hızıyla doğru, kavite uzunluğu ile ters orantılıdır. Bu ilişki Strouhal sayısı olarak tanımlanmıştır [9-11]. Eşitlik 1.1'de f frekans değerini, L kavite uzunluğunu, St Strouhal sayısını ve V serbest akış hızını göstermektedir.

$$St = \frac{fL}{V} \quad (1.1)$$

Rossiter [11]'in yapmış olduğu T.S.R.2 (Tactical Strike and Reconnaissance) saldırı ve keşif uçağı kavite bölgesinin ilk dört rezonans frekans değeri için Mach sayısına bağlı $1/St$ sayısı ($1/n$) grafiği Şekil 1.6'da elde edilmiş ve eşitlik 1.2'deki formüle ulaşılmıştır [11].



Şekil 1.6. Farklı Mach sayılarına göre T.S.R.2 kavite bölgesi rezonans frekans değerleri [11]

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

1.2 numaralı eşitlikte m , mod sayısını ifade etmektedir. K ve δ ise deneysel sabitlerdir. Deneysel sabit olan K ve δ 'nın değerleri sırasıyla 0,25 ve 0,57'dir. M Mach sayısını ifade etmektedir. $1/n$ değeri ise boyutsuz bir değer olup kavite rezonans frekans değerlerinin belirlenmesinde kullanılır [1].

Rossiter daha sonra yapmış olduğu deneyler sonucunda 1.2 numaralı eşitliği güncelleyerek kaçınıcı modda hangi frekans değerinin olduğunu ifade eden 1.3 numaralı eşitliği geliştirmiştir [1].

$$f_m = \frac{u_\infty}{L} \left[\frac{m - \alpha}{M_\infty + \frac{1}{K}} \right] \quad (1.3)$$

1.3 numaralı eşitlikte u_∞ serbest ortam akış hızı, m mod sayısı, L kavite uzunluğu ve M_∞ serbest ortam Mach sayısı olarak ifade edilir.

Rossiter'in geliştirmiş olduğu 1.3 numaralı eşitlik 0,4 ile 1,4 Mach aralığındaki deneysel sonuçlara ve çeşitli kavite geometrilerine göre geliştirilmiştir. Eřitliđin bu aralıklar dışında gúvenilirliđi yeterli olmadığından, 1.3 numaralı eşitlik Heller ve Bliss [13] tarafından tüm Mach sayılarında kullanılabilecek şekilde modifiye edilmiştir. Modifiye edilmiş denklem 1.4 numaralı eşitlikte gústerilmiřtir.

$$f_m = \frac{u_\infty}{L} \left[\frac{m - \alpha}{M_\infty \left(1 + \left[\frac{(\gamma - 1)}{2} \right] M_\infty^2 \right)^{-1/2} + \frac{1}{K}} \right] \quad (1.4)$$

1.4 numaralı eşitlikte m mod sayısı, γ özgül ısılar oranı, K deneysel sabit, α faz değişimi ve M_∞ serbest ortam hızının Mach sayısı cinsinden değeridir. Rossiter'in bu formúlasyonu halen kavite akışında oluşan akustik tonların frekanslarını tahmin etmek için kullanılır [1].

Bu bűlűmde kavite akıřının genel tanımı, sınıflandırılması, akıř mekanizması ve ilgili yarı ampirik öncű forműllerden bahsedilmiřtir. Bundan sonraki bűlűmde kavite akıřı ile ilgili literatűrde yapılan çalıřmalardan bahsedilmiřtir.

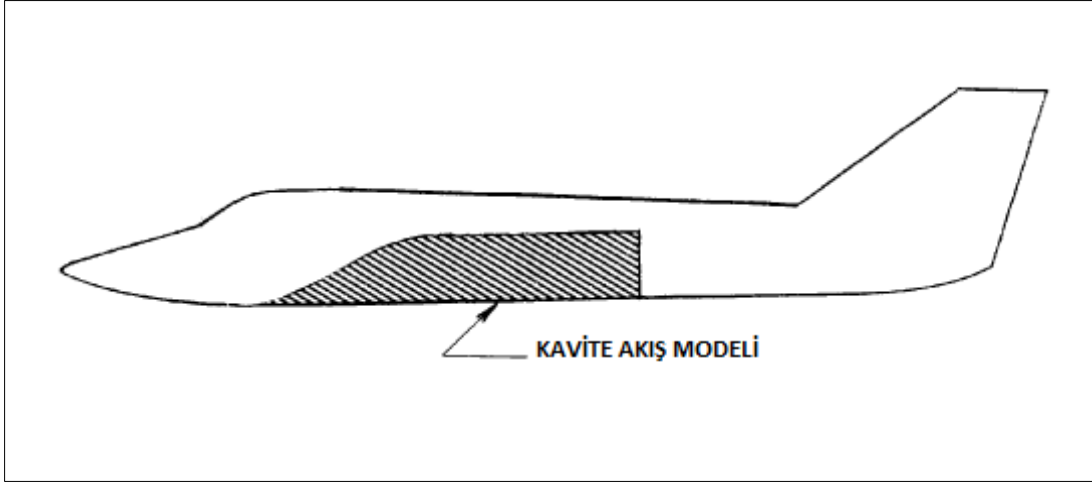
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde uçakların mühimmat bırakma bölgesini temsil eden kavite çalışmalarıyla ilgili literatürde bulunan deneysel ve sayısal çalışmalar özetlenmiştir. Bu kapsamda, ayrıntılı bir şekilde literatür araştırması sunulmuştur.

Lawson ve Barakos yapmış oldukları derleme çalışmasında son yirmi yılda gerçekleştirilmiş olan sayısal ve deneysel kavite çalışmalarını özetlemiştir. Lawson ve Barakos'a göre kavite akış fiziğini anlamak için sayısal çalışmalar yeterli olabilir fakat zamana bağlı akış verileri ile basınç ölçümlerini birleştiren deneylerin yapılması; kavite içi ve dışı arasında oluşan kayma tabakasının çalkalanma mekanizmasını irdelemek için gereklidir. Ayrıca transonik akış rejimlerinde hesaplamalı yöntemlerden Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes Equations (URANS) ve Reynolds Averaged Navier Stokes Equations (RANS) modellerinin yetersiz kaldığı, Detached Eddy Simulation (DES) sonuçlarının deneylerle büyük oranda tutarlı olduğu vurgulanmıştır. Kavite akışının doğası anlaşıldıktan sonra çeşitli pasif kontrol yöntemleri (duvar modifikasyonları, çubuk ve spoyler yerleştirme) uygulamalarının güvenli bir şekilde incelenebileceğini vurgulamışlardır [1].

2.1. Deneysel Çalışmalar

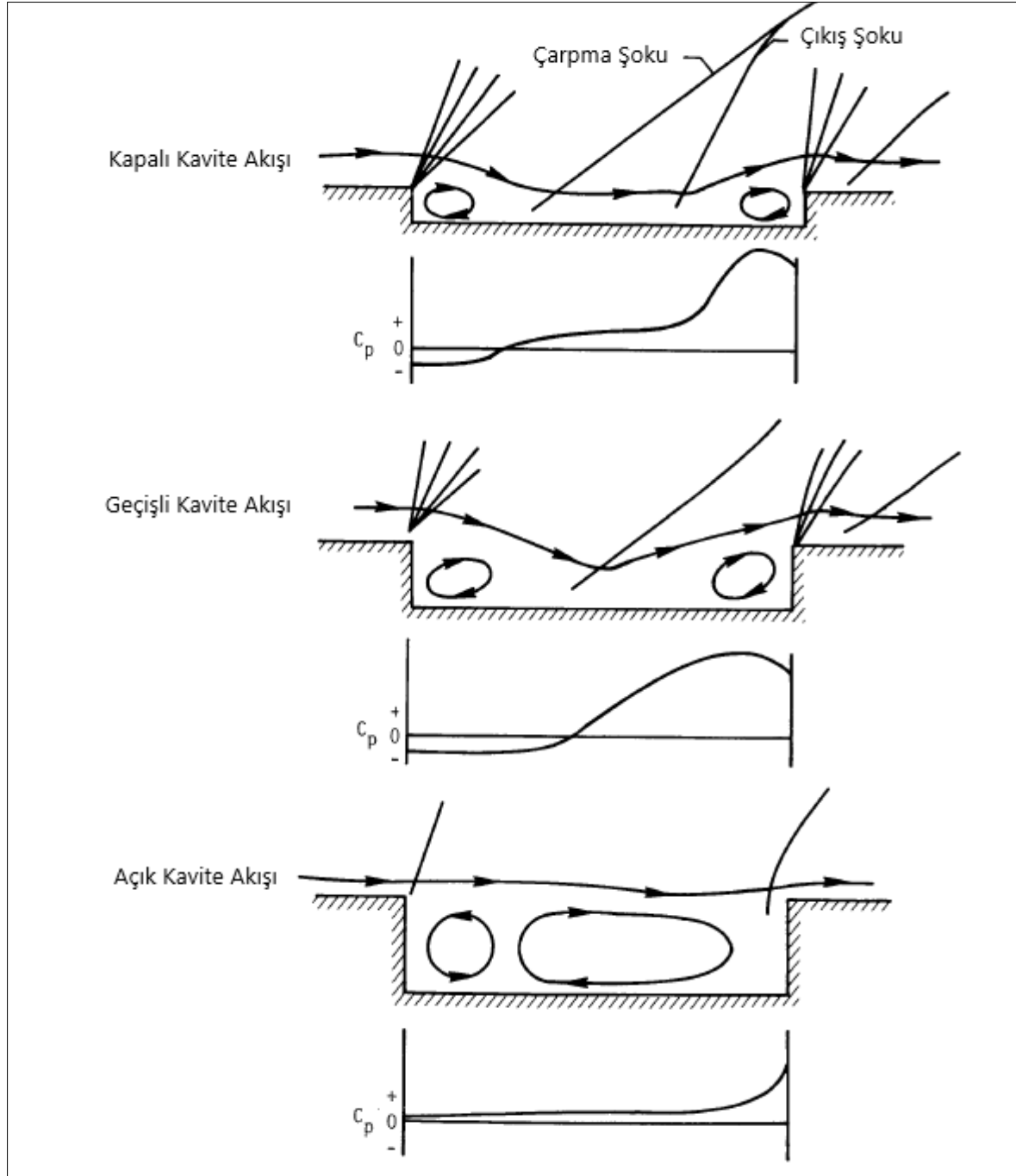
Kaufman ve Clark'ın yapmış oldukları deneysel çalışmada; düz bir plaka üzerinde sığ dikdörtgen şeklindeki kaviteler üzerinden 0,6 ile 3 Mach arasındaki akış koşulunda statik ve çalkantılı basınç verileri elde edilmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği modelde kavite uzunluk derinlik oranı (L/D) 5 ile 10 arasında değiştirilmiştir. En yüksek dalgalanma basıncı test edilen koşullar arasında 1,5 Mach rejiminde ve kavite bölgesinin arka duvarında meydana gelmiştir. Ses altı ve düşük ses üstü rejimlerde kavite duvarına spoyler (çit) eklenmesinin akustik dalgalanmaların azalmasını sağladığı görülmüştür [2]. Gerçekleştirilmiş olan kavite akışı deney modeli Resim 2.1'de gösterilmiştir.



Resim 2.1. Kavite akış modeli [14]

Charwart ve diğerleri ses altı ve sesüstü (Mach 2 ve 4) kavite akış fiziğinin yapısını deneysel olarak araştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda; kavite akış yapısının kritik bir kesme tabakası uzunluğunun kavite derinlik oranı ile değiştiğini görmüşlerdir. Bu kritik oranın değişmesiyle gelen sınır tabaka akışındaki laminar türbülanslı bölge geçişinin değiştiği görülmüş olup, bu olayın Mach sayısı ve Reynolds sayısından bağımsız olarak gerçekleştiğini sunmuşlardır [15].

Stallings ve Wilcox'un yapmış oldukları deneysel çalışma; süpersonik kavite akışlarının en önemli çalışmalardan bir tanesidir. Dikdörtgen şeklindeki çeşitli açık, kapalı ve geçiş bölgesi kavite geometrilerinde deneyler yaparak basınç dağılım sonuçlarını bulmuşlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda kavite genişliği (W) etkisinin kapalı ve geçiş bölge kavitelerinde açık kavitelere oranla daha az olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca kapalı kavite akışlarında genişlik azaldıkça arka duvardaki üç boyutlu etkilerin ve basınç gradyanlarının arttığını gözlemlemişlerdir [8]. Şekil 2.1'de farklı tipteki kavite akışlarındaki basınç dağılımları ve akış mekanizmaları gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Kavite akış mekanizmaları ve basınç dağılımları [8]

Plentovich ve diğerlerinin yapmış oldukları çalışmada; ses altı ve ses ötesi rejimde, uzunluk derinlik oranı (L/D) 1'den 17,5'e kadar, genişlik derinlik (W/D) oranı ise 1, 4, 8 ve 16 seçilerek detaylı bir statik basınç sonuç veri takımı ortaya çıkarılmıştır. Çalışmaya göre akış alanının özelliklerini belirlemede kavite geometrisi ve Mach sayısı etkilidir. Açık kavite özelliklerinden geçiş bölge kavite özelliklerine geçiş L/D 6 ile 8 arasındayken meydana gelmiştir. Ayrıca L/D oranı sabit tutularak kavitenin genişliğinin azaltıldığı veya

derinliğinin artırıldığı durumlarda; kavitedeki basınç dağılımı, kapalı kavite özelliklerini göstermiştir [6].

Konunun öncülerinden Rossiter tarafından 1964 yılında ses altı ve ses ötesi rejimde yapılan kavite çalışmasına göre kararsız basınç dalgalanmaları, rastgele oluşan ve periyodik oluşan bileşenler içermektedirler. Rastgele oluşan dalgalanmalar sığ kavitelerde ($L/D > 4$) gözlemlenirler ve arka duvarda en yoğunurlar. Periyodik oluşumlu bileşenler daha derin kavitelerde ($L/D < 4$) baskındırlar ve durağan dalga yapıları oluştururlar. Periyodik bileşenler kavite içerisindeki akustik rezonanstan kaynaklanırlar ve kavite ön bölgesine küçük spoyler (çit) ile sönmülenebilirler [9].

Tracy ve Plentovich tarafından ses altı ve ses ötesi gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda L/D oranı arttıkça kavite akışının rezonans genliklerinde azalmalar görülmüştür. Rezonans spektrumlarına büyük ölçüde açık ve geçiş bölge kavitelerinde rastlanmıştır. Bazı durumlarda da kapalı kavite bölgelerinde görülmüştür. L/D oranı sabit tutulurken kavite genişliğinin (W) artırılması rezonans genliklerini artırırken rezonansı da tetiklemiştir. Ayrıca değişen uzunluk ve Mach sayısının rezonans frekanslarına etkileri Rossiter [9-11] denklemi ile tutarlıdır [5].

Heller ve arkadaşları yapmış oldukları deneysel kavite çalışmasında kayma tabakasının stabilizasyonu sağlayarak akışı kontrol etmişlerdir. Bu çalışmalar; kavite arka duvarını eğme, kavite ön duvarına spoyler (çit) ekleme ve kavite yüzeyine bağımsız panjur ekleme olarak sıralanabilir [16].

Zhang ve arkadaşları kavite akış tipinin L/D oranının artması ve azalmasına göre mekanizmasını anlamak için deneysel çalışma yapmışlardır. 1,94 Mach rejiminde gerçekleştirilen iki boyutlu çalışmada kavite özelliklerinin; açık kavite tipinden geçiş bölge tipine geçişinde kritik L/D oranının 10, geçiş kavite tipinden kapalı kavite tipine geçişte 14 olduğunu göstermişlerdir [17].

Block'un yaptığı çalışmada kavite uzunluk genişlik (L/W) oranının akışın akustik alan boyutlarını belirlediğini ifade etmiştir. Buna göre L/W değerinin 1'den küçük olduğu durumlarda akışta iki boyutlu bir akustik alan elde edilirken, L/W değerinin 1'den büyük olduğu durumlarda akışta üç boyutlu bir akustik alan elde edilmektedir. Kavite genişliği

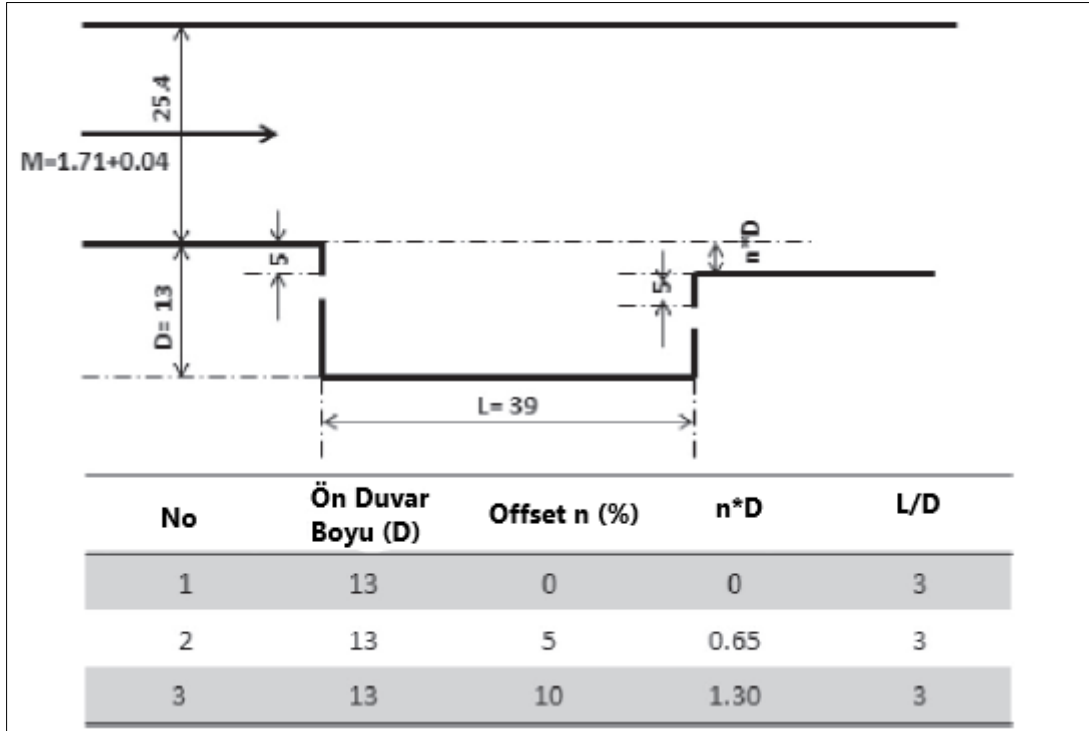
değiştikçe rezonans frekanslar değişmediğinden iki boyutlu yapılan çalışmalar göreceli olarak deneysel çalışmalar ile kıyaslanabilir [18].

Ahuja ve Mendoza'nın yapmış oldukları deneysel çalışmada kavite bölgesinde oluşan gürültünün; kavite geometrisinden, sınır tabakasından ve akış sıcaklığından nasıl etkilendiğini incelemişlerdir. $L/W < 1$ olan küçük olan üç boyutlu kavitelerde, $L/W > 1$ olan iki boyutlu kavitelere kıyasla yaklaşık olarak 15 dB daha az ses tonu oluşumunu gözlemlemişlerdir [12].

Ünalmiş ve diğerleri L/D değeri 3 ile 7 arasında değişen Mach sayısı 5 olan açık kavite akışında salınımlı basınç değerlerini deneysel olarak hesaplamışlardır. Yapılan çalışmaya göre kavite arka duvar salınımları ön duvar salınımlarına göre daha fazladır. Planer lazer akış görüntüleyicileri ve basınç ölçümleri sonucunda arka duvarda şok oluşumu gözlemlenmiştir. Oluşan bu şok türbülanslı kesme tabakasının arka duvara çarpmasından kaynaklandığı belirtilmiştir [19].

Thagmani, L/D değeri 2 olan 1,58 Mach rejiminde süpersonik kavite akışını; salınım modlarının davranışını incelemek için deneysel olarak çalışmıştır. Çalışmada, kavite ön duvar ve arka duvar şoklarının her ikisinin de ilk mod için birbirlerinin zıt fazında olduğu görülmüş olup, akışta genel olarak baskın modun ikinci mod olduğu belirtilmiştir. Ayrıca ölçümler sonucunda ortaya çıkan faz farkı kavite akustik rezonansının, salınımlar üzerindeki güçlü etkisini göstermiştir [20].

Malhotra ve Vaidyanathan, L/D değeri 2 ve 3 olan 1,71 Mach süpersonik kavite akışında kavite arka duvar boyunu kısaltmanın (offset vermenin) açık kavite üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Schlieren akış görselleştirmesi sonucunda kesme tabakası ve meydana gelen şok oluşumları kavite bölgesinde gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlarda her iki uzunluk/derinlik oranı için arka duvar boyunu kısaltma genliklerde azalmayı sağlamıştır. L/D değeri 2 olan geometride toplam ses basınç seviyesinde 3 dB, L/D değeri 3 olan geometride ise 10 dB düşüş sağlanmıştır. Şekil 2.2'de L/D oranı 3 olan kavitenin parametrik çalışması gösterilmiştir [21].



Şekil 2.2. Kavite arka duvar boyunun kısaltılması [21]

Perng ve Dolling, 5 Mach rejiminde W/D değerini sabit tutup L/D değerinin 3 ve 5 olarak değiştiği açık kavite geometrisinde delikli ve eğimli duvar yapısının akışa etkisini deneysel incelemişlerdir. Yapılan çalışmaya göre düşük Mach sayılarının aksine, yüksek Mach sayılarında kesme tabakası dinamiği ile kavite akustiği arasındaki ilişki zayıftır. Geometri manipülasyonlarından bağımsız olan kavite mod frekansları, Rossiter'in yarı empirik formül tahminleriyle olduğu gibi frekans tahminleri ile de uyum içerisinde [22].

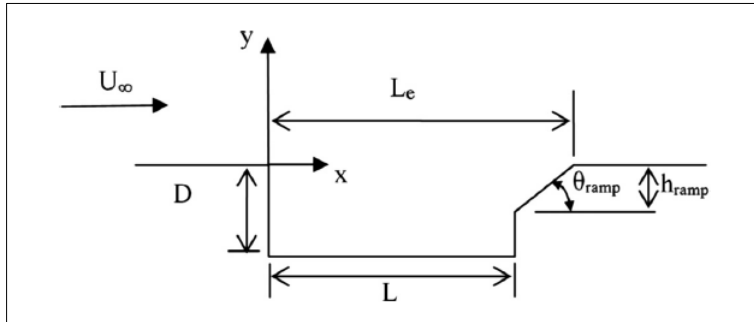
Vikramidatya ve Kurian'ın L/D değeri 1 olan 1,63 Mach rejiminde kavite uzunluk ve derinliklerini sabit tutarak arka duvarın tamamına ve bir bölümüne eğim vererek kavite akışını kontrol etmeye çalışmışlardır. Yapmış oldukları deneysel çalışmaya göre; daha yüksek açılı konfigürasyonlarda yüksek genlikli tonlar oluşurken kavite bölgesinden yukarı doğru hareket eden akustik dalga oluşumu gözlemlenmiştir [23].

Gautam ve diğerleri ses basınç seviyelerini azaltabilecek optimum kombine pasif ve aktif kontrol yöntemlerinden en iyi konfigürasyonu bulmak için deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada pasif kontrol yöntemi olarak arka duvara offset verme (arka duvarın boyunu değiştirme) ve aktif kontrol yöntemi olarak kütle enjeksiyonu yöntemini birleştirmişlerdir. Ön duvardan yüzde % 75 kavite uzunluğundaki enjeksiyon

yerinin, akışı baskılamada ve ses basınç seviyelerini düşürmede en iyi konfigürasyon olduğu sonucunu görmüşlerdir [24].

Pey ve Chua L/D değeri 2, 3, 4, 6 ve 8 olan kavitelerin arka duvar açılarını 30° , 45° ve 60° , arka duvar yüksekliklerini ise normal yüksekliğin yarısı ve çeyreği olacak şekilde kısaltarak, 6 farklı kavite geometri konfigürasyonu ile akışı pasif olarak kontrol etmeye çalışmışlardır.

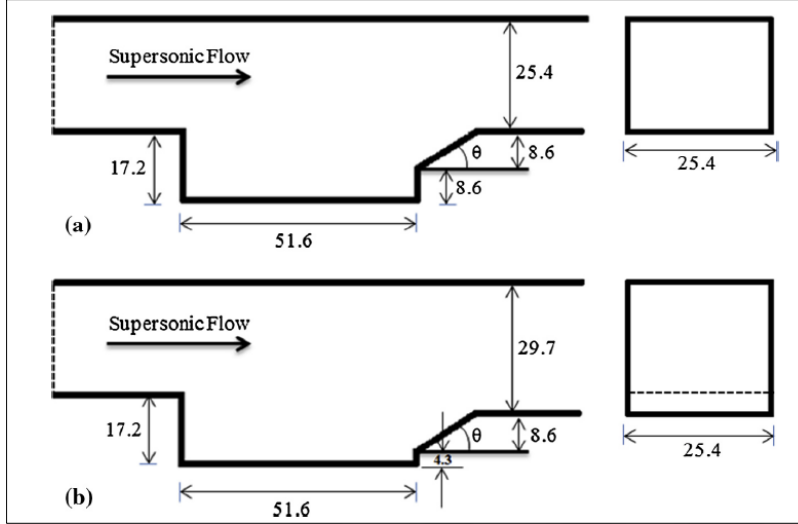
Şekil 2.3’de gerçekleştirmiş oldukları parametrik çalışma gösterilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada arka duvar açıları ve yüksekliklerin değişmesinin kavite duvarlarındaki etkisi ve kavite içerisindeki sürüklenme ve moment katsayılarına etkileri incelenmiştir. Rampa açısının 30 derece olduğu durumda L/D değeri 2 ve 3 durumlarında kavite taban momentinde düşüş sağlanırken, L/D değeri 8 olduğunda ters etkiler gözlemlenmiştir. $L/D=2$ değerinde rampa açısının 30° ve kavite derinliğinin dörtte birine düştüğü konfigürasyonda basınç değerlerinde düşüş gözlemlenirken, diğer geometrilerde kavite derinliğinin yarısı olan 30° ’lik rampa durumunda basınç değerlerinde düşüş sağlanmıştır [25].



Şekil 2.3. Kavite arka duvarına eğim verme konfigürasyonu [25]

Maurya ve arkadaşları, süpersonik kavite akışını; L/D değeri 3 olan durumda 1,65 Mach değerinde deneysel incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada arka duvar rampa açısını 30° , 60° ve 90° olarak arka duvar boyunu ise normal kavite ön duvarının % 25'i kadar kısaltarak, 7 farklı duvar kombinasyonları şeklinde analiz etmişlerdir. Şekil 2.4’de gerçekleştirmiş oldukları parametrik çalışma gösterilmiştir. Akış fiziğini daha iyi anlayabilmek için anlık Schlieren akış görüntüleri ve düzensiz basınç ölçümlerini kullanmışlardır. Akışta arka duvar rampa açısının düşmesi ile kavitadaki tüm bölgelerde

statik basıncın azaldığını göstermişlerdir. Ek olarak kavite arka duvarının boyunun kısaltılması kesme tabakası salınımının azalmasını sağlamıştır. Ayrıca 90°'lik rampa açısı verilen konfigürasyonda dominant mod frekansı ikinci moddan üçüncü moda değişmiştir [26].



Şekil 2.4. Kavite arka duvarında hem eğim hem de boy kısaltma konfigürasyonu [26]

2.2. Sayısal Çalışmalar

Zhang ve Edwards'ın 1,5 ve 2,5 Mach rejiminde L/D değerinin 1, 3 ve 5 olduğu süpersonik kavite çalışmasını sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada zamana bağlı değişkenlerin etkisini inceleyebilmek için adaptif bir ağ yapısı kullanmışlardır. Kavite uzunluğu, ağ yapısı ve zaman adımı gibi farklı değişkenlerin akışa etkileri ortaya koyulmuş olup; tek bir modun dominant olduğu akışın L/D değeri 1 olan konfigürasyonda, çoklu modların dominant olduğu akışın ise daha uzun kavitelerde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ek olarak, L/D değerinin 1 olduğu durumda basınç salınımlarının güçsüz olduğu ve akışın ağ yapısından etkilendiği gözlemlenirken, daha uzun kavitelerde salınımlar güçlü ve baskın olup, sayısal çözüm ağ yapısından daha az etkilenmiştir [27].

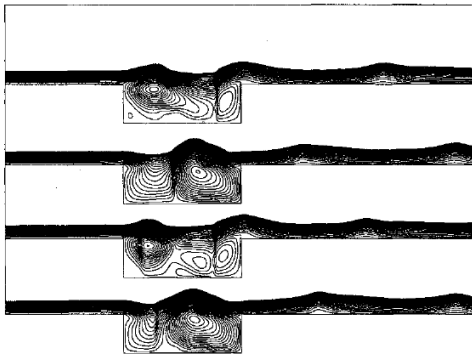
Suhs ve diğerleri 0,74 ve 1,5 Mach rejiminde L/D değeri 5,6 olan açık kavite akışını hem sayısal hem de deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan sayısal çalışmada; tek yönde ince sınır tabaka ile kapalı olarak Navier-Stokes denklemlerini kullanan chimera şeması, üç boyutlu kavite akışını tahmin etmek için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar gerçekleştirilen deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. 0,74 Mach rejimindeki sayısal çalışmalar deney

sonuçları ile uyurken, 1,5 Mach rejiminde arka duvarda basınç katsayılarında ve ses basınç seviyelerinde bazı saplamalar meydana gelmiştir. Bunun sebebi ise arka duvarda viskoz etkilerin modellenmediği olarak belirtilmiştir [28].

Rizzeta L/D değeri 5,07 olan süpersonik açık kavite akışının iki ve üç boyutlu simülasyonlarını gerçekleştirilmiştir. Yapılan iki ve üç boyutlu analizlerin karşılaştırmasına göre akıştaki salınımın temel davranışının iki boyutlu olduğu vurgulanmıştır. Bununla birlikte üç boyutlu simülasyonlarda kavite simetri ekseninde gelişen girdapların üç boyutlu etki ürettiği görülmüştür [29].

Ayli, yapmış olduğu nümerik çalışmada süpersonik kavite akışını iki ve üç boyutlu olarak incelemiştir. Yapılan sayısal çalışma RANS ile gerçekleştirilmiş olup, iki boyutlu simülasyonlar akışın genel fiziği hakkında bilgi vermekte olup, üç boyutlu etkilerin ihmal edilmemesi gerektiğini vurgulamıştır. Ayrıca DES metodunu da kullanarak türbülans yaklaşımları farkını da incelemiştir. İki yöntem arasındaki farklarda ağ yapısının etkilerinin kuvvetli olduğunu vurgulamıştır [30].

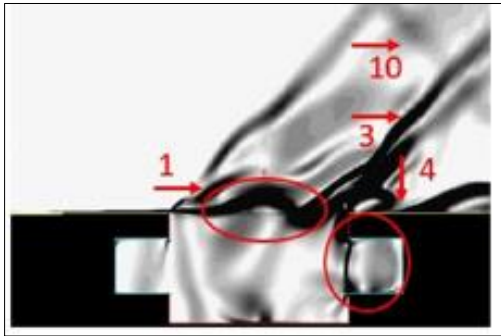
Zhang gerçekleştirmiş olduğu sayısal çalışmada, L/D değeri 3 olan 1,5 ve 2,5 Mach rejimindeki süpersonik kavite akışında kütle ortalama Navier-Stokes denklemlerini $k - \omega$ türbülans modeli kullanarak çözmüştür. Şekil 2.5’de kavite bölgesinde kesme tabakasının dinamik yapısı gösterilmiştir. Çalışmaya göre; şok dalgaları ile genişleme dalgalarının etkileşimleri, salınım modları, zaman ortalama yüzey basınç değerleri ve ses basınç seviyeleri deney sonuçları ile yakın sonuçlar göstermiştir [31].



Şekil 2.5. Kavite bölgesi kesme tabakası etkileşim mekanizması [31]

Nayyar ve diğ erleri, L/D değeri 5 W/D değeri 1 olan kavite geometrisini 0,85 Mach rejiminde URANS, DES ve LES yöntemi ile incelemişlerdir. LES ve DES yöntemleri zamana bağlı basınç ölçümleri, faz değişimi ve ses basınç seviyeleri açısından URANS yönteminden deneyle daha uygun sonuçlar göstermiştir. Ek olarak, kavite geometrisine pasif kontrol yöntemlerinden engel ekleme ve kavite duvarını eğme, aktif kontrol yöntemlerinden jet üfleme metodlarını denemişlerdir. Jet  fleme yönteminin en etkili yöntem olduğu gösterilmiş ve gürültü seviyesi 35 dB kadar düşürülmüştür [32].

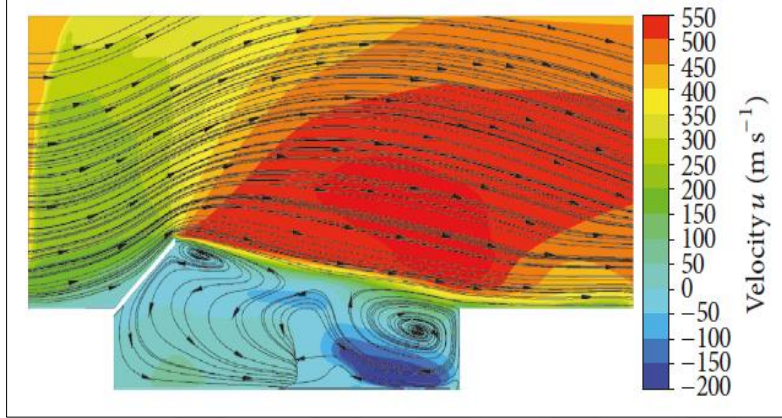
Panigrahi ve diğ erlerinin yapmış oldukları deneysel ve sayısal çalışmalarda kavite  n ve arka duvarına küçük kaviteler eklemişlerdir. şekil 2.6'da yapmış oldukları sayısal çalışmadaki kavite modeli gösterilmiştir. Kavite  n duvarına eklenen küçük kavite geometrisinde; akustik dalganın eğilmesiyle kesme tabakası kubbe şeklinde yukarıya doğru şekillenir. Kavite arka duvarına eklenen küçük kavite geometrisinde ise; kesme tabakası küçük kavite içerisinde oluşan akış ile etkileşir. Böylece kesme tabakasının kavite arka duvarı ile etkileşimi en aza indirilir ve salınımlar önemli ölçüde azalır. Aynı şekilde hem  n hem de arka duvara küçük kavite konulduğu geometride yine kesme tabakasının arka duvar ile etkileşiminin azalması söz konusudur ve en baskın mod için ses basınç seviyesinde 34,9 dB azalma ve genel ses basınç seviyesinde 14,5 dB azalma sağlanmıştır [33].



şekil 2.6. Kavite bölgesine küçük kaviteler ekleyerek kontrol  alışması [33]

Aradağ ve diğ erleri 1,5 Mach rejiminde L/D değeri 5,07 olan süpersonik kavite akışını çeşitli pasif ve aktif kontrol yöntemleri ile nümerik olarak çalışmışlardır. Aktif kontrol yöntemi olarak jet üfleme, pasif kontrol yöntemi olarak ise kavite girişine engeller yerleştirme, arka duvar köşesine radius verme ve arka duvara eğim verme çalışmalarını denemişlerdir.

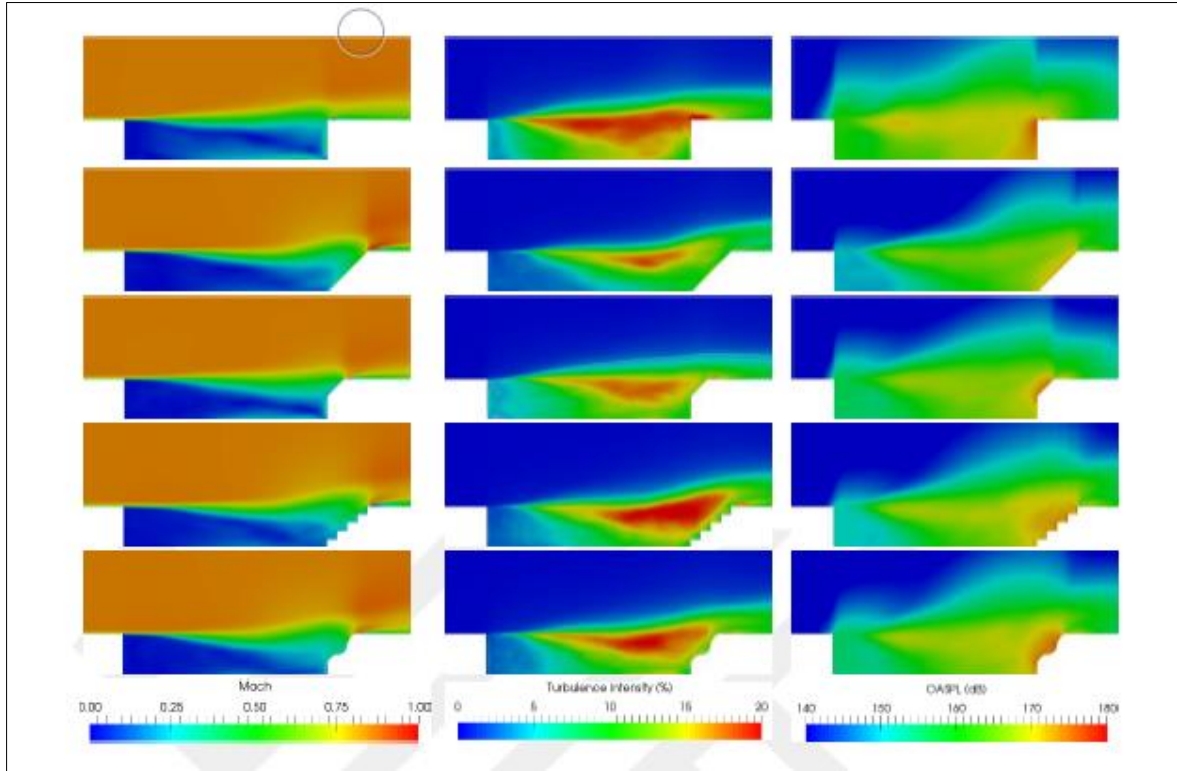
Şekil 2.7’de kavite ön duvarına engel eklenen çalışmanın vektörel hız konturları gösterilmiştir. Çalışma sonrasında pasif kontrol yöntemlerinden en etkili yöntemin arka duvara eğim verme olduğunu görmüşlerdir. Arka duvara eğim verilen çalışmalardaki en yüksek ses basınç seviyesi düşüşü 60° eğim verilen konfigürasyonda olmuştur [34].



Şekil 2.7. Kavite ön duvarına engel ekleyerek akış kontrol çalışması örneği [34]

Ren ve diğerleri 1,75 Mach rejimindeki L/D değeri 5,82 olan süpersonik açık kavite akışını LES yöntemini kullanarak sayısal çözmüşlerdir. Çalışmada arka duvara eğim verme çalışmaları sonucunda; alt duvarın statik basınç değerlerinde azalmalar görülmüş olup, kesme tabakası ile eğimli arka duvar etkileşiminin azaltılmasıyla kavite basınç dalgalanmalarında azalmalar görülmüştür [35].

Demir'in yapmış olduğu sayısal çalışmada L/D değeri 5 olan transonik rejimdeki açık kavite akışı, pasif kontrol yöntemleri ile kontrol edilmeye çalışılmıştır. Pasif kontrol yöntemlerinden ön ve arka duvar geometrisi değişimleri, kavite bölgesi öncesine çeşitli kontrol cihazlarının yerleştirilmesi (spoiler, girdap üretici gibi) ve kaviteden geometrik değişikliklerle pasif emme ve üfleme yöntemleri akış kontrolü için denenmiştir. Şekil 2.8’de kavite akışına uygulanan kontrol yöntemlerinin farklı konturları gösterilmiştir. Çalışma sonucunda kavite arka duvarının gürültü oluşumunda en büyük rol oynadığı ve arka duvar geometrisinin değiştirildiği konfigürasyonlarda en fazla iyileşmenin sağlandığı gösterilmiştir. Bunun sebebi ise kesme tabakasının arka duvara çarpma açısının azaltılması ile etkileşimin azalmasıdır [36].



Şekil 2.8. Farklı arka duvar geometrilerinde akış davranışları (Mach, türbülanslı kinetik enerji ve ses basınç seviyeleri cinsinden) [36]

Yaldır'ın yapmış olduğu sayısal çalışmada L/D değeri 5,07 olan süpersonik rejimdeki açık kavite akışı, açık kaynak kodlu bir program olan OpenFOAM kullanılarak gerçekleştirilmiştir. OpenFOAM yazılımının bu problemdeki kabiliyeti ticari bir yazılım olan ANSYS-Fluent yazılımı ile kıyaslanmıştır. Sonuçlara göre OpenFOAM yazılımı ses üstü hızlarda açık kavite akışında ANSYS-Fluent yazılımından daha iyi sonuçlar vermiştir [44].

Gelişli 1,5 Mach serbest akış hızına sahip L/D oranı 5,07 olan açık kavite akışını pasif ve aktif kontrol yöntemleri kullanılarak sayısal incelemiştir. İncelenen pasif kontrol yöntemleri kavite arka duvarına eğim verme, kavite girişine plaka ekleme ve kavite duvarlarına engeller eklemektir. Bu yöntemler arasında en etkili sonuçlar kavite arka duvarına eğim verilen çalışmalarda olmuştur. Aktif kontrol çalışmaları olarak mikrojetler ile hava üfleme çalışmalarıdır. Bu çalışmalardaki en etkili sonuçlar kavite girişinden üfleme yapılan sonuçlar olmuştur [45].

2.3. Literatür Çalışması ile Mevcut Çalışmanın Karşılaştırılması

Literatür çalışmasında sunulan deneysel ve sayısal çalışmalardan görüldüğü gibi kavitelerle ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda kavite bölgesi; ses altı, ses ötesi (transonik) ve ses üstü rejimlerde farklı geometrilerde incelenmiştir. Giriş bölümünde de anlatıldığı gibi kavite çalışmalarında en önemli problem basınç kaynaklı oluşan gürültünün azaltılması problemidir. Literatürde bu problemi ortadan kaldırmak için birçok pasif ve aktif kontrol yöntemi denenmiştir. Aktif kontrol yöntemleri kavite bölgesine harici bir enerji girdisine ihtiyaç duyarken, pasif kontrol yöntemlerinde böyle bir ihtiyaç gerekmemektedir. Pasif kontrol yöntemlerinde kavite geometrisinde değişiklikler yapılarak akış kontrol edilmeye çalışılmaktadır. Pasif kontrol yöntemlerinin aktif kontrol yöntemlerine göre pratikte daha çok tercih edilmesi ve akış kontrolünün daha uygulanabilir olması yönlerinden bu tez çalışmasında pasif kontrol yöntemleri ele alınacaktır.

Gerçekleştirilen literatür çalışmasındaki deneysel ve sayısal çalışmalarda görüldüğü gibi pasif kontrol yöntemlerinde en etkili parametre arka duvar geometrisinde yapılan değişikliklerdir. Bunun sebebi ise kavite ön duvarından ayrılan türbülanslı kesme tabakasının doğrudan arka duvara çarpması ve akustik dalga oluşumunun gözlemlenmesidir. Yapılan çalışmalarda arka duvara eğim verme, arka duvar boyunu kısaltma, arka duvara eğrilik verme, arka duvara küçük kavite ekleme gibi çalışmalar mevcuttur. Fakat bu çalışmalarda bir kavite problemi için tüm arka duvar geometri değişikliklerinin bir arada incelendiği, arka duvarda yapılan geometrik değişikliklerin farklarının ortaya koyulduğu ve ses basınç seviyelerindeki düşüşü sağlayan en etkili yöntem ve kavite geometrisi belirlenememiş olup kapsamlı bir şekilde literatürde sunulmamıştır.

Bu tez çalışmasında; L/D değeri 5 olan 1,5 Mach rejiminde ve L/D değeri 6 olan 1,8 Mach rejiminde süpersonik açık kavite akışlarının türbülanslı ve zamana göre değişen karmaşık yapısı açıklanacak, daha sonra da pasif kontrol yöntemlerinden arka duvar geometrisinin değiştirilmesiyle kontrol edilmeye çalışılacaktır. Uygulanacak arka duvar çalışmaları temelde üç konfigürasyondan oluşacaktır. Birinci konfigürasyonda arka duvara eğim verme çalışmaları yapılacaktır. İkinci konfigürasyonda arka duvar geometrisi hilal (üç nokta eğrisi) şeklinde modifiye edilecektir. Üçüncü konfigürasyonda ise arka duvar boyunu kısaltma (offset verme) çalışmaları gerçekleştirilecektir. Son olarak ise bu üç

konfigürasyonun en iyi sonuç veren çalışması ile farklı parametrik kavite arka duvar çalışmaları sistematik olarak oluşturulup ses basınç seviyelerinde düşüş sağlanan en iyi konfigürasyon belirlenecektir. Belirlenen nihai kavite geometrisi ile süpersonik rejimde farklı Mach sayılarında simülasyonlar gerçekleştirilip, farklı Mach sayılarının akışa olan etkileri incelenecektir.

Yukarıda bahsedilen kavite arka duvar geometrisi parametrelerinin detaylı olarak incelenip akışa etkilerinin ortaya konulması, ses basınç seviyelerini en çok azaltabilen özgün arka duvar şeklinin bulunması; literatürdeki boşlukların doldurulması açısından fayda gösterecektir. Çalışma kapsamında oluşturulacak parametrik kavite arka duvar geometrilerinin detaylı bir şekilde incelenmesi ve yorumlanması, kavitenin kritik duvarlarındaki gürültüyü azaltan optimum kavite geometrisinin bulunması, bulunan nihai geometriye süpersonik rejimde farklı Mach sayılarındaki akışın etkilerinin incelenmesi tezin kapsamı ve amacını oluşturmaktadır.

3. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL FORMÜLASYON

Bu bölümde tez kapsamında incelenen problem tanımlanıp, problemin sayısal olarak çözülmesi için gerekli olan fiziksel model ve matematiksel formülasyon sunulmuştur. Problemin çözüm alanı, geometrisi ve çözüm için kullanılan korunum denklemleri ve türbülans denklemleri ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Bunlara ek olarak problemin sınır şartları bilgileri sunulmuştur.

3.1. Problemin Genel Tanımı

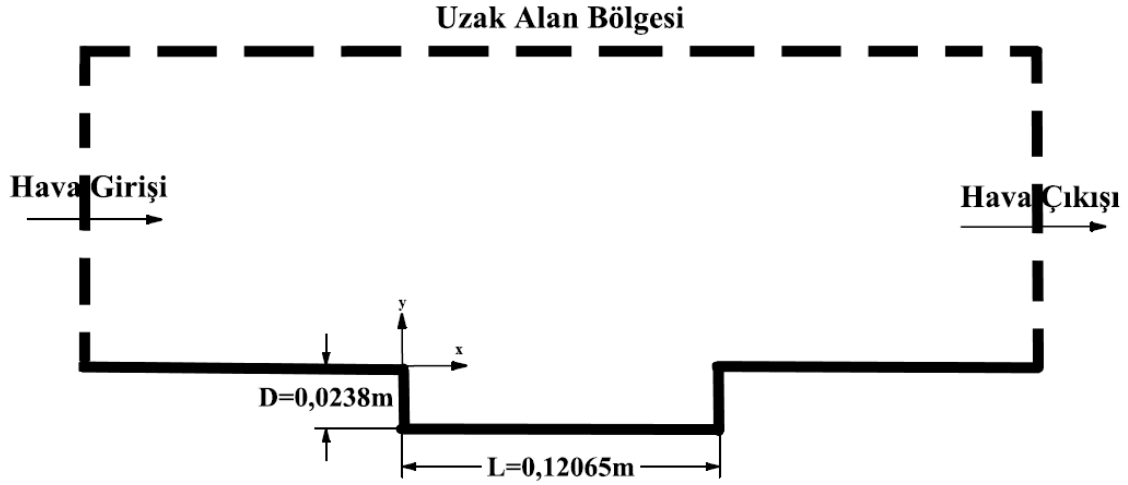
Bu çalışmada uzunluk derinlik oranı (L/D) 5,07 olan 1,5 Mach süpersonik rejimdeki açık kavite akışının aerodinamik ve aeroakustik analizleri iki boyutlu olarak OpenFOAM açık kaynak kodlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsü kullanılarak sayısal incelenmiş ve sunulmuştur.

Çalışmada öncelikle referans alınan ilk deney çalışması üç farklı parametre ile doğrulanmıştır. Bu parametreler sırasıyla; Rossiter'in yarı ampirik formülü, basınç katsayıları ve ses basınç seviyeleridir. Çalışmanın tüm bu parametrelerle doğrulanması, kavite akışını hem aerodinamik hem de aeroakustik açıdan doğru şekilde incelenmesini sağlamıştır. Validasyon çalışmasının ardından arka duvar geometrisi değişimlerinin akışa etkileri incelenmiş olup, akış kontrolü çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Yapılan tez kapsamında kütle korunumu, momentum korunumu, enerji korunumu ve türbülans denklemleri uygun sınır şartları altında OpenFOAM açık kaynak kodlu program ile çözülüp, sonuçlar sunulmuştur.

3.2. Fiziksel Model

Sayısal olarak incelenecek problemin fiziksel modeli ve referans alınacak koordinat sistemi Şekil 3.1'de detaylı olarak sunulmuştur. Ek olarak, incelenen problemdeki varsayımlar yine bu başlık altında gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Fiziksel modelin iki boyutlu görünümü ve koordinat sistemi

3.2.1. Varsayımlar

Kavite problemi türbülanslı ve sıkıştırılabilir bir dış akış problemidir. Gerçekleştirilecek sayısal probleme ait genel varsayımlar şu şekilde sıralanabilir:

- Newtonian tipi akış kabulü
- Sıkıştırılabilir gaz
- Süpersonik akış rejimi
- İdeal gaz denklemi
- Yerçekimi kuvvetinin etkileri ihmal
- Kimyasal reaksiyon ve faz değişimi ihmal
- İhmal edilebilir radyasyon

3.3. Matematiksel Modelin Tanımlanması

Bu bölümde mevcut problemin çözümü için kullanılacak korunum denklemleri sunulmuştur. Bu denklemlere ek olarak türbülanslı akış çözümü için kullanılan model ve denklemleri ayrıntılı olarak verilmiştir.

3.3.1. Korunum denklemleri

Kartezyen koordinatlarda zamana bağlı sıkıştırılabilir akış için süreklilik, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri diferansiyel formda aşağıda sunulmuştur. Ayrıca sıkıştırılabilir akış çözümlerinde gerekli olan ideal gaz denklemi de aşağıda gösterilmiştir:

Süreklilik Denklemi

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

Momentum Denklemi

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j + p \delta_{ij} - \tau_{ij}) = 0 \quad (3.2)$$

Enerji Denklemi

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho e + p)}{\partial x_i} = \frac{\partial(u_i \tau_{ij} - q_i)}{\partial x_i} \quad (3.3)$$

İdeal Gaz Denklemi

$$p = \rho RT \quad (3.4)$$

Kartezyen koordinatlarda Newton tipi bir akışkan için altı denklem ve altı bilinmeyen bulunmaktadır. Bu denklemlerin beşi lineer olmayan kısmi diferansiyel denklem ve bir tanesi de lineer olan ideal gaz denklemdir.

Korunum denklemlerinde geçen ρ yoğunluğu, u_i hız bileşenlerini, p basıncı, e iç enerjiyi, τ_{ij} gerilme tensörünü ve q_i ise ısı akısını temsil etmektedir.

İdeal gaz denkleminde ρ yoğunluğu, R özgül gaz sabitini ve T sıcaklığı (Kelvin cinsinden) göstermektedir.

Gaz sabitinin, iç enerjinin, gerilme tensörünün ve ısı akışının hesaplanması aşağıda gösterilmiştir:

$$R = c_p - c_v \quad (3.5)$$

c_p ve c_v terimleri sırasıyla sabit basınçta ve sabit hacimde özgül ısı katsayılarıdır.

$$\tau_{ij} = 2\mu\delta_{ij} + \lambda \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3.6)$$

Gerilme tensöründeki $\delta_{ij} = 2(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$ açısal deformasyonu temsil ederken, δ_{ij} Kronecker delta, $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$ ikincil viskozite terimi, μ ise dinamik viskozite terimidir. Eşitlik 3.7'de gösterilen dinamik viskozite μ ise sıcaklığın bir fonksiyonu olup Sutherland Yasası ile hesaplanır [37].

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_0 + S}{T + S} \quad (3.7)$$

3.7 numaralı eşitlikte μ_0 referans viskozite değeri olup $1,7894 \times 10^{-5}$ kg/m/s olarak alınır. T Kelvin cinsinden statik sıcaklık değeri olup, T_0 referans sıcaklık değeri olup 273,11 K alınır. S değeri ise efektif sıcaklık olup 110,56 K değerini alır.

Ek olarak, eşitlik 3.3.'de verilen q_i ısı akısı olup eşitlik 3.8 şeklinde yazılabilir. Bu denklemde k havanın ısı iletim katsayısıdır. Isı iletim katsayısına eşitlik 3.9'de verilen Prandtl boyutsuz sayısı ile ulaşılabilir.

$$q_i = -k \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (3.8)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (3.9)$$

$$e = c_v T + \frac{1}{2} u_i u_i \quad (3.10)$$

Eşitlik 3.10'da gösterilen e termodinamik ilişkide iç enerjiyi göstermektedir.

3.3.2. Türbülanslı akış ve türbülans denklemleri

Türbülans, bir akışkanın hareket halindeki düzensizlikleri olarak tanımlanabilir. Türbülanslı akışla günlük hayatta veya mühendislik uygulamalarında sıkça karşılaşılır. Okyanus, nehir, atmosfer akışı, otomobil, tren, uçak etrafındaki akış, boru ve kanal içerisindeki akış türbülansın en belirgin örnekleri arasındadır. Türbülanslı akış; her bir akış özelliğinin (hız, basınç, sıcaklık, yoğunluk vb.) zamana bağlı ortalama değeri ve ortalamadan sapan çalkantılı değerini içerir. Eşitlik 3.11’de akış özelliklerinden biri olan hızın ortalama $\overline{u_i}$ ve ortalamadan sapma u_i' ifadesi gösterilmiştir.

$$u_i = \overline{u_i} + u_i' \quad (3.11)$$

Türbülansın matematiksel ifadesi, akışkanın atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı ile tanımlanır. Bu tanım boyutsuz bir sayıdır ve Reynolds sayısı olarak adlandırılır. Eşitlik 3.12’de verilen eşitlikte akışın türbülanslı olup olmadığı; akışkanın yoğunluğuna (ρ), hızına (U), dinamik viskozitesine (μ) ve akışkanın temas ettiği cismin karakteristik uzunluğuna (L) bağlıdır.

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (3.12)$$

Reynolds sayısının düşük olduğu durumlarda akış laminar kabul edilirken, büyük olduğu durumlarda akış türbülanslı kabul edilir. Kesin olarak akış laminar bölgeden türbülanslı bölgeye ayıran bir Reynolds değeri olmamakla birlikte belirli problemlerde ortalama değerler akış hakkında bilgiler verir. Örneğin boru içerisindeki akışta Reynolds sayısı 2300’den küçük olan akışlar laminar, büyük olan akışlar ise türbülanslı olarak değerlendirilir.

Türbülansın Genel Özellikleri

Von Karman’a göre türbülans; akışkanların katı yüzeylerden geçtiklerinde veya akışkan parçacığı ile komşu akışkan parçacığının birbiri üzerinden geçtiği zaman ortaya çıkan düzensiz hareketlerdir [38].

Hinze'e göre türbülans; belirli niteliklerin zaman ve uzay boyutunda rastgele varyasyonlarından oluşan bir akış hareketidir [38].

Türbülansın başlıca genel özellikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Türbülans her zaman kaotik, rastgele ve düzensiz bir akışı temsil etmektedir.
- Türbülanslı akışta türbülans ölçekleri moleküler seviyeden daha büyük kabul edildiğinden akış süreklidir. Gerçekçi bir sayısal yaklaşım için akış içerisindeki bütün ölçekli olayların çözülmesi gereklidir.
- Türbülanslı akışı oluşturan enerjinin çoğunu büyük ölçekli yapılar taşımaktadır. Büyük ölçekli girdap yapıları küçük ölçekli girdap yapılarına göre daha karmaşık ve rotasyoneldir. Küçük ölçekli girdap yapıları daha düzenli ve benzer karakteristik özelliklere sahiptir. Bu yüzden büyük ölçekli yapıların analizi küçük ölçekli yapılara göre daha elzemdir.
- Türbülanslı akışta enerji yitimi meydana gelir. Türbülanslı akış mekanizmasına göre büyük ölçekli girdaplar enerjilerini küçük ölçekli girdaplara aktarırlar. En küçük ölçekli girdap bünyesindeki kinetik enerji, viskozite etkilerinden dolayı ısı enerjisine dönüşür ve yitim gerçekleşir. Büyük ölçekli girdaplardan küçük ölçekli girdaplara aktarılan enerji süreci Kolmogorov tarafından açıklanmıştır [38].

Türbülanslı akışlarda tüm akışkan parçacıklarının davranışlarının detaylı bir şekilde incelenmesi, açıklanması ve çözülmesi günümüz imkanlarıyla mümkün değildir. Bunun yerine önceki bölümde bahsedilen korunum denklemlerinde geçen akış özellikleri, eşitlik 3.11'de gösterilen ortalama akış özellikleri ve salınımlı akış özellikleri olarak bileşenlerine ayrılır. Tüm akış özellikleri için ortalama ve salınımlı değerler aşağıdaki şekilde ayrıştırılabilir:

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' ; \quad p = \bar{p} + p' ; \quad T = \bar{T} + T' ; \quad e = \bar{e} + e' \quad (3.13)$$

Yukarıdaki ifadeler korunum denklemlerinde yerlerine konulur ve zaman ortalamalı değerleri alınır. Türbülanslı akış için yoğunluk tabanlı zaman ortalamalı korunum

denklemleri elde edilir. Elde edilen denklemler Türbülanslı Korunum Denklemleri başlığı altında gösterilmiştir.

Türbülanslı Korunum Denklemleri

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} u_i u_j + \bar{p} \delta_{ij} - \bar{\tau}_{ij} + \overline{\rho u_i'' u_j''}) = 0 \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} e)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} u_i e + \bar{u}_j \bar{p} + \bar{u}_j'' \bar{p} + \overline{\rho u_j'' e''} + \bar{q}_i - \bar{u}_i \bar{\tau}_{ij}) = 0 \quad (3.16)$$

Yoğunluk tabanlı zaman ortalamalı denklemlerin düzenlenmesi sonucunda $\overline{\rho u_i'' u_j''}$ terimi ortaya çıkmaktadır. Bu terim türbülans etkilerini ifade eden Reynolds gerilmesi terimi olarak adlandırılmaktadır.

$$\overline{\rho u_i'' u_j''} = 2\mu_T \delta_{ij} - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \delta_{ij} \quad (3.17)$$

Eşitlik 3.17’de gösterilen Reynolds gerilmesi formülündeki μ_T türbülanslı viskozite olarak adlandırılmaktadır ve türbülans girdapları tarafından taşınan ilave momentumu temsil etmektedir (Eşitlik 3.18). Türbülans viskozitesini bulmak için çeşitli modellemeler yapılmıştır. Bunlardan en yaygın olanları; $k - \varepsilon$ türbülans modeli ve $k - \omega$ türbülans modelidir.

$$\mu_T = \frac{\bar{\rho} k}{\omega} \quad (3.18)$$

Süpersonik kavite akışının sayısal olarak çözümlerinde literatürde RANS çözümleri kullanan araştırmacıların çoğunlukla $k - \omega$ türbülans modelini tercih ettikleri ve deneylere yakın sonuçlara ulaştıkları gözlemlenmiştir. Resim 3.1’de çoğunlukla süpersonik rejimdeki sayısal çalışmalarda kullanılan modeller gösterilmiştir.

Çalışma	Geometri		Akış Koşulları		Model	Validasyon
	L/D	W/D	Mach	Re		
Hankey and Shang [40]	2,25	2D	1,5	$1,17 \times 10^6$ (L)	C-S	Heller and Bliss [25]
Baysal and Stallings [42]	6,12,16	2D	1,5	$8,33 \times 10^4$ (D)	B-L	Own data
Kim and Chokani [107]	6	2D	1,5	$1,00 \times 10^6$ (L)	Mod C-S	Stallings [16]
	17,5	2D	1,6	$1,17 \times 10^6$ (L)	Mod C-S	Wilcox [223]
Atwood and Van Dalsem [195,44]	2	2D	0,9	$1,47 \times 10^6$ (L)	Mod B-L	Rossiter [18]
Baysal et al. [102]	4,5	2D	0,95	$3,60 \times 10^6$ (L)	Mod B-L	Dix and Dobson [224]
Shih et al. [51]	5,07	2D	1,5	$1,09 \times 10^6$ (L)	Mod $k-\epsilon$	Kaufman et al. [225]
Jeng and Payne [108]	3	2D	2,5	$0,45 \times 10^6$ (D)	Mod B-L	Zhang [226]
Zhang et al. [52,53,172,55]	3	2D	1,5,2,5	$0,45 \times 10^6$ (D)	$k-\omega$	Zhang and Edwards [171]
Tam et al. [46,47]	2	2D	1,5	$0,40 \times 10^6$ (L)	Mod B-L	Disimile and Orkwis [227]
Zhang and Edwards [196]	1,3,5	2D	1,5, 2,5	$0,45 \times 10^6$ (D)	$k-\omega$	Zhang and Edwards [171]
Lamp and Chokani [94]	4,33	2D	1,75	$9,21 \times 10^6$ (L)	Mod B-L	Vakil et al. [228]
Orkwis et al. [197]	2	2D	2,0	$0,40 \times 10^6$ (L)	Laminar	-
Zhang and Edwards [54]	1,3	2D	1,5, 2,5	$0,45 \times 10^6$ (D)	Mod $k-\omega$	Zhang and Edwards [171, 229]
Henderson [56]	5	2D	0,4-1,35	$4,12-7,35 \times 10^6$ (L)	$k-\omega$	Ross et al. [75]
	4-16	2D	0,85	$0,78 \times 10^6$ (L)	$k-\omega$	Tracy and Plentovich [176]
	10-20	2D	1,35	$7,35 \times 10^6$ (L)	$k-\omega$	Kaufman et al. [225]
Ashcroft et al. [198] ^a	0,57	2D	0,147	$0,30 \times 10^5$ (L)	$k-\omega$	Henderson [230]
Ritchie et al. [58]	5	2D	0,82	-	$k-\epsilon$	Own data
Lawrie [59]	5	2D	0,4-0,9	$0,005-6,7 \times 10^6$ (L)	$k-\omega$, SST	Ross et al. [75]
Nayyar [61]	2-16	2D	0,85	$6,78-10,9 \times 10^6$ (L)	$k-\omega$, SST	Ross et al. [75]
Rona [62]	3	2D	1,5,2,5	$0,45 \times 10^6$ (D)	$k-\omega$	Zhang [226]
Woo et al. [64]	2-4	2D	1,5	$0,45 \times 10^6$ (D)	$k-\omega$	Zhang and Edwards [229]

Resim 3.1. Farklı rejimlerde sayısal kavite çalışmalarının özeti [1]

Zhang gerçekleştirmiş olduğu sayısal çalışmada, L/D değeri 3 olan 1,5 ve 2,5 Mach rejimindeki süpersonik kavite akışında kütle ortalama Navier-Stokes $k - \omega$ türbülans modelini kullanarak çözmüştür. Çalışmaya göre; şok dalgaları ile genişleme dalgalarının etkileşimleri, salınım modları, zaman ortalama yüzey basınç değerleri ve ses basınç seviyeleri deney sonuçları ile yakın sonuçlar göstermiştir [31].

Aradağ ve diğerleri 1,5 Mach rejiminde L/D değeri 5,07 olan süpersonik kavite akışını çeşitli pasif ve aktif kontrol yöntemleri ile nümerik olarak çalışmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada kütle ortalama Navier-Stokes denklemleri ile $k - \omega$ türbülans modeli kullanarak akış kontrolü sağlamışlardır [34].

Kim ve diğerleri iki ve üç boyutlu açık, dikdörtgen şeklindeki süpersonik kavite akış simülasyonlarını Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemleri ile $k - \omega$ türbülans modeli kullanarak gerçekleştirmişlerdir [43].

$k - \omega$ türbülans modeli

Süpersonik kavite akışı probleminde türbülans modellemesi en önemli problemlerden bir tanesidir. Kavite probleminde ortaya çıkan gürültü seviyelerinin esas kaynağı basınç seviyelerinde oluşan çalkalanma ve sürekli değişimlerdir. Bu problemin incelenmesi,

anlaşılması ve çözülmesi için korunum denklemlerine uygulanacak olan türbülans modeli seçimi elzemdir.

İkili denklem modellerinden birisi olan $k - \omega$ türbülans modelinde Kolmogorov'a göre k birim kütledeki türbülanslı kinetik enerjiyi ifade ederken, ω ise birim türbülanslı kinetik enerjideki yitim olarak ifade edilir. k ve ω için denklemler sırasıyla 3.19 ve 3.20 denklemlerinde gösterilmiştir.

$$\frac{\partial(\bar{\rho}k)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}u_i k)}{\partial x_i} = \bar{\rho}\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \bar{\rho}kw + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \sigma^* \mu_t \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}w)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}u_i w)}{\partial x_i} = \alpha \frac{w}{k} \bar{\rho}\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \bar{\rho}w^2 + \sigma_d \frac{\bar{\rho}}{w} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial w}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \sigma \frac{\bar{\rho}k}{w} \frac{\partial w}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.20)$$

$k - \omega$ denklemlerindeki model sabitleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

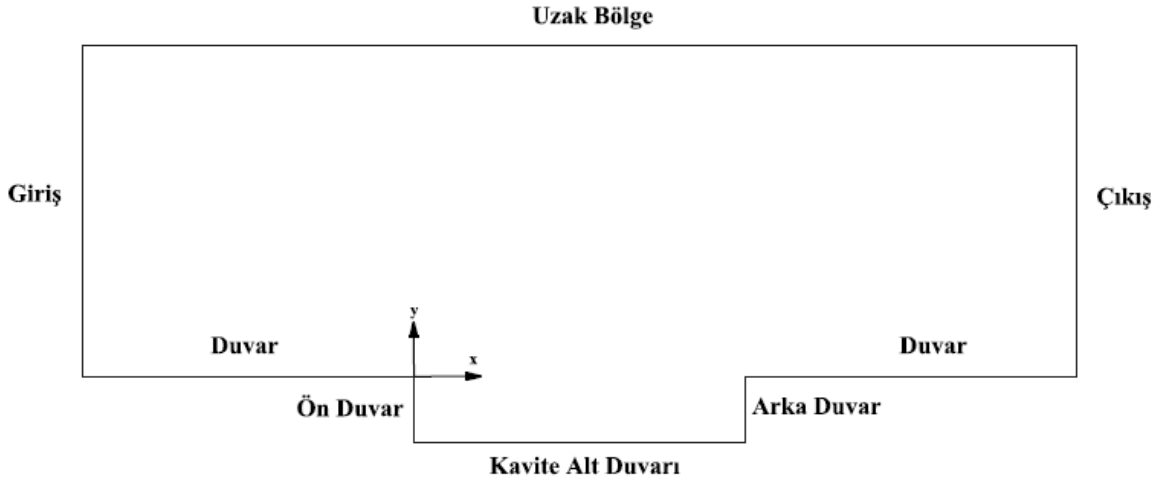
Çizelge 3.1. $k - \omega$ türbülans model sabitleri

Model Sabiti	Sayısal Değer
α	0,52
β	0,0708
β^*	0,09
σ	0,5
σ^*	0,6

Mevcut denklemlerin hesaplanması ve detaylı bilgiler Wilcox'un Turbulence Modelling for CFD [38] kaynağında bulunabilir.

3.4. Sınır Şartları

OpenFOAM açık kaynak kodlu HAD çözücüsü çok sayıda sınır koşuluna sahiptir. Fiziksel problemi doğru olarak modelleyebilmek için doğru sınır şartlarının seçilmesi elzemdir. Çalışmada kullanılacak sınır şartları Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Fiziksel problemin sınır şartları

Giriş Sınır Şartı

Çalışma kapsamında akışkan olarak hava kullanılmıştır. Giriş sınır şartı olarak serbest akımın giriş hızı uygulanmıştır. Akışın tam gelişmiş olduğu kabulü yapılmıştır. Böylece giriş sınır şartları aşağıdaki şekilde uygulanmıştır:

$$U = u_{serbest\ akış} ; V = 0 ; W = 0 ; T = T_{serbest\ akış} ; k = 7,39 ; \omega = 58700 \quad (3.21)$$

Duvar Sınır Şartı

Akış hızı duvar bölgelerinde kaymazlık koşulu geçerli olduğundan sıfır olarak tanımlanır. Basınç değişimleri sıfır olup sabit sıcaklık sınır şartı kullanılmıştır.

$$U = 0 ; V = 0 ; \text{ ve } W = 0 ; T_w = T_o \quad (3.22)$$

Çıkış Sınır Şartı

Çıkış sınır koşulunda ideal gazlar için hız ve sıcaklık değerlerinin gradyanları sıfır olarak kabul edilmiştir. Ayrıca basınç atmosferik hava basıncına eşittir. Uzak bölge olarak gösterilen sınıra da çıkış sınır şartı özellikleri uygulanmıştır.

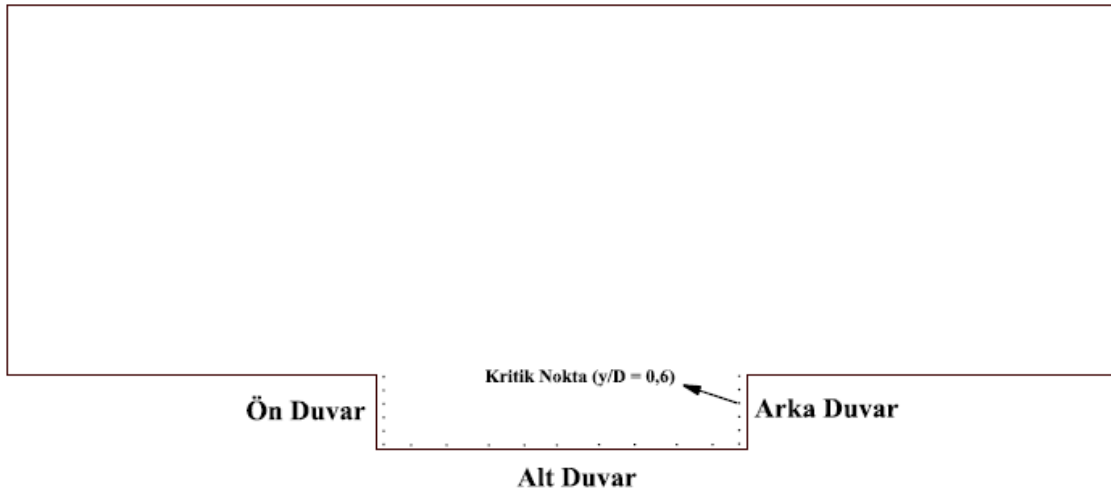
$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0; \frac{\partial V}{\partial y} = 0; P = P_o; \frac{\partial k}{\partial x} = 0; \frac{\partial k}{\partial y} = 0; \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0; \frac{\partial \omega}{\partial y} = 0 \quad (3.23)$$

3.5. Ard İşleme Yöntemleri

Sayısal çalışmalardan çıkan sonuçların değerlendirilebilmesi ve kıyaslama yapılabilmesi için HAD simülasyonları çıktılarına ard işleme yöntemleri uygulanmıştır. Bu amaçla MATLAB programı ve açık kaynak kodlu son işlemci programı olan Paraview programı ile TECPLOT programı [47] tez çalışmasında kullanılmıştır.

Sonuçlar değerlendirilirken referans alınan birincil deney çalışmasındaki alt duvar verileri (ses basınç seviyeleri ve basınç katsayıları cinsinden) doğrulama çalışmalarında kullanılmıştır. Ardından kavitenin ön ve arka duvarları için sonuçlar sayısal olarak sunulmuştur.

Kavite bölgesindeki alt duvar doğrultusunu $y/D = 0$ olarak kabul edilirse arka duvardaki $y/D = 0,6$ noktası en yüksek basınç değerlerinin görüldüğü kritik nokta olarak referans çalışmada belirtilmiştir [14]. Bu nedenle yapılan tez çalışması boyunca bu noktanın kritik nokta olduğu vurgulanmış olup, bu noktadan elde edilen zamana bağlı basınç değerleri sunulmuştur. Şekil 3.3’de kritik noktanın konumu gösterilmiştir. Ek olarak bu noktadan elde edilen basınç değerlerine FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) uygulanarak akışı domine eden baskın modlar ve bu modlara karşılık gelen frekans değerleri sunulmuştur. Elde edilmiş olan bu frekans değerleri Rossiter’in ampirik formülasyonundan elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır.



Şekil 3.3. Kavite bölgesi kritik nokta konumu

Basınç Katsayısı Hesaplanması

Sayısal sonuçların literatürdeki deneysel sonuçlar kullanılarak doğrulanması çalışmasında statik basınç katsayılarının (C_p) konuma göre değerleri hesaplanmıştır. Statik basınç katsayılarının hesaplanması denklem 3.24’de sunulmuştur [14].

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{0.7 p_\infty M_\infty^2} \quad (3.24)$$

Ses Basınç Seviyesi Hesaplanması

Ses basınç seviyeleri belirli bir zaman aralığında belirli noktalardaki basınç değerlerinin eşitlik 3.25’deki logaritmik formülüyle hesaplanmaktadır. Eşitlikte P_{rms} belirli zaman aralığında ölçülen çalkantılı basınç değerlerinin kareleri toplamının karekökü olup; P_{ref} ise referans basınç değeridir. P_{ref} 2×10^{-5} Pa büyüklüğündedir.

$$SPL = 20 \log \left(\frac{P_{rms}}{P_{ref}} \right) \quad (3.25)$$

Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT)

FFT zaman alanında oluşan karışık sinyaller içeren veri topluluğunu, frekans alanına geçirerek hangi frekansta ne şiddette bir titreşim olduğunu gösteren sayısal bir yöntemdir.

Sayısal sonuçlardaki basınç salınımlarının baskın frekanslarını ve bu frekansların büyüklüklerini hesaplamak için FFT analizleri yapılmıştır. OpenFOAM yazılımından elde edilen basınç değerleri MATLAB Programı [46] ile yazılmış kod yardımıyla FFT yöntemi kullanılarak güç-frekans alanına dönüştürülmüştür. Verilerin dönüşümü eşitlik 3.26 kullanılarak yapılmaktadır. FFT sonucunda çıkan frekansların büyüklükleri Rossiter'in yarı ampirik formülü ile kıyaslanmıştır.

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_N W_N^{-kn} \quad (3.26)$$

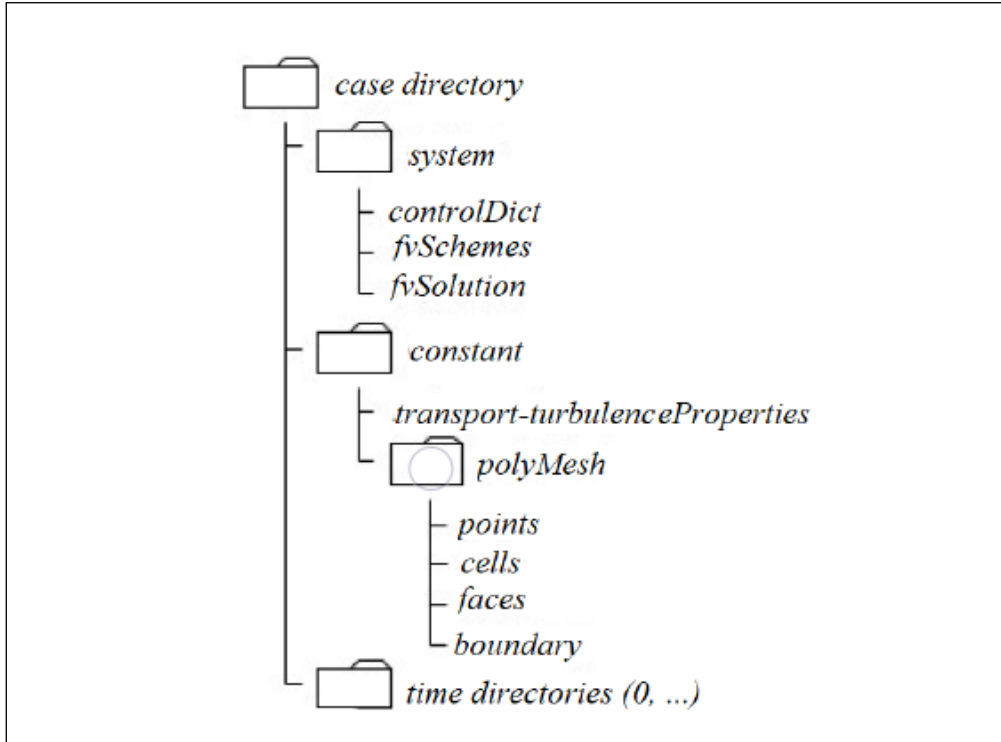


4. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ VE OPENFOAM YAZILIMI

Mühendislik problemlerinin çözülmesi için analitik, sayısal ve deneysel olmak üzere üç çeşit yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler tek başlarına kullanıldığı gibi birlikte de kullanılabilir. Bu çalışmada açık kaynak kodlu sayısal akışkanlar dinamiği çözücüsü olan OpenFOAM programı kullanılmıştır. OpenFOAM; açık kaynak kodlu bir program olması özelliğiyle ticari kodlara olan bağımlılığın azaltılması amacıyla sıkça mühendislik programlarında kullanılmaktadır. Programın genel tanıtımı ve çalışma prensibi bu bölümde anlatılacaktır.

4.1. OpenFOAM Yazılımı

OpenFOAM yazılımı; C++ dilinde yazılmış, HAD problemlerini sonlu hacimler yöntemi kullanarak sayısal çözen açık kaynak kodlu bir programdır. Program genel olarak üç adet klasörden meydana gelmektedir. Bunlar; “0”, “constant” ve “system” klasörleridir. Sayısal simülasyonu gerçekleştirecek tüm bilgiler (ağ yapısı, sınır koşulları, ayrıklaştırma şemaları, çözüm parametreleri vb.) bu üç klasörün içerisinde yer almaktadır.



Şekil 4.1. OpenFOAM dosya yapısı [39]

“0” dosyasının içerisinde fiziksel problemi çözmek için gerekli olan giriş ve sınır koşulları bulunmaktadır. Bu koşullar hız, basınç, sıcaklık, türbülans kinetik enerjisi vb. parametreler için tanımlanır. OpenFOAM’un içerisindeki bazı sınır koşulları şöyle tanımlanabilir:

- ZeroGradient: Neumann tipi sınır koşuldur. Girilen değişkenin sınıra olan dik gradyeninin sıfır olduğunu belirtir.
- FixedValue: Dirichlet tipi sınır koşuldur. Girilen değişken sınıra sabit olarak atanır. Bu sabit değer skaler veya vektörel olabilir.
- NoSlip: Kaymama sınır koşuludur. Duvar olarak belirlenen yerlerde hızın sıfır olduğunu belirtir.

“constant” dosyasının içerisinde fiziksel probleme ait ağ yapısı ve problemin fiziksel özelliklerini belirten bilgiler bulunur. Problemin ağ yapısı bilgileri “constant” dosyasının altında yer alan “polyMesh” dosyasında bulunurken, problemin fiziksel özellikleri yine “constant” dosyasının altındaki “thermophysicalProperties” ve “turbulenceProperties” alt klasörlerinde bulunur.

“system” dosyası içerisinde temel olarak çözücü ayarları, ayrıklaştırma şemaları ve çözüm yöntemini içeren bilgiler bulunur. Problemin çözücü ayarları ile ilgili olan bilgiler (zaman adımı, iterasyon sayısı, veri kayıt sıklığı vb.) “system” dosyasının altında yer alan “controlDict” dosyasında bulunur. Diferansiyel denklemlerin ayrıklaştırma metotlarını içeren dosya “fvSchemes” dosyasıdır. “fvSolution” dosyasında ise çözülen denklemlerin metodları, çözüm matrisleri, toleranslar ve diğer algoritmalar yer alır.

4.1.1. Sonlu hacimler yöntemi

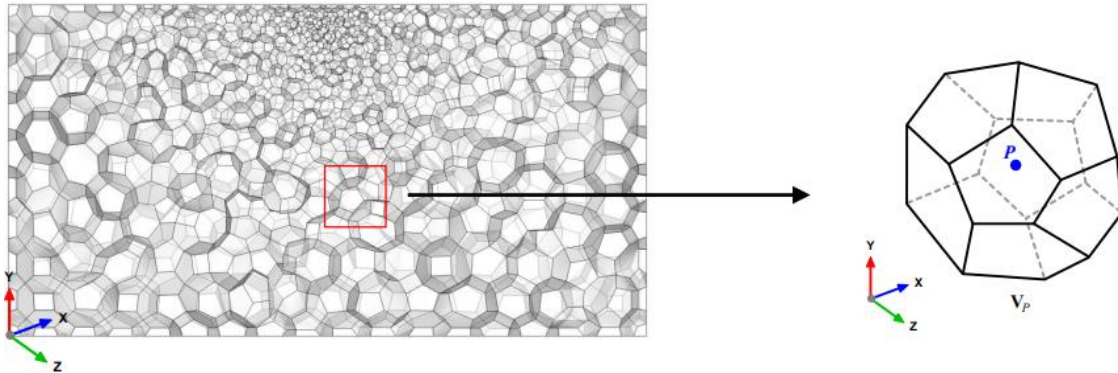
Sonlu hacimler yöntemi kısmi diferansiyel denklemleri cebirsel denklemlere dönüştürebilen sayısal bir yöntemdir. OpenFOAM programı sonlu hacimler yöntemini kullanan bir çözücüdür. Bu yöntemde akış alanı sonlu kontrol hacimleri olarak adlandırılan hücrelere ayrılır. Ayrıklaştırma işleminden sonra her bir kısmi diferansiyel denklem cebirsel denkleme dönüştürülür. Elde edilen cebirsel denklem seti her bir kontrol hacmi (hücre) için doğrusal sistem çözücüleri tarafından çözülerek bulunması gereken akış özelliklerinin değerleri hesaplanır [40].

4.1.2. Sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırma

Sonlu hacimler yöntemini kullanarak OpenFOAM programı genel bir taşınım denklemini aşağıdaki şekilde ayrıklaştırmaktadır [41].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho U\phi) = \nabla \cdot (\rho \Gamma_{\phi} \nabla \phi) + S_{\phi} \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1 genel taşınım (transport) denklemi olup; ilk terim zamana bağlı terim, ikinci terim konvektif terim, üçüncü terim difüzyon terimi ve son terim ise kaynak terimi göstermektedir. Denklemdaki “ ϕ ” herhangi bir akış özelliğini gösterip çözülmesi gereken bilinmeyendir. Fiziksel problemin çözüm alanı sonlu sayıda kontrol hacmine bölünür. Oluşturulan bu kontrol hacimleri herhangi bir şekilden oluşabilir.



Şekil 4.2. Herhangi bir kontrol hacmi [40]

Şekil 4.2’de kontrol hacmi V_P ile gösterilmiş olup, kontrol hacminin kütle merkezi P noktasındadır.

Eşitlik 4.1’deki terimler her bir kontrol hacmi için integral şeklinde Eşitlik 4.2 olarak yazılabilir:

$$\int_{V_P} \frac{\partial \rho\phi}{\partial t} dV + \int_{V_P} \nabla \cdot (\rho U\phi) dV = \int_{V_P} \nabla \cdot (\rho \Gamma_{\phi} \nabla \phi) dV + \int_{V_P} S_{\phi} dV \quad (4.2)$$

Konvektif ve difüzyon terimlere Diverjans Teoremi (Gauss Teoremi) uygulanarak kontrol hacim integrali yüzey integrallerine dönüştürülür.

$$\int_{V_p} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint_{\partial V_p} dS \cdot (\rho U \phi) = \oint_{\partial V_p} dS \cdot (\rho \Gamma_\phi \nabla \phi) + \int_{V_p} S_\phi dV \quad (4.3)$$

Konvektif Terimin Ayırıklaştırılması

$$\int_{V_p} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint_{\partial V_p} dS \cdot (\rho U \phi) = \sum_f S_f \cdot (\rho U \phi)_f \quad (4.4)$$

Difüzyon Teriminin Ayırıklaştırılması

$$\int_{V_p} \nabla \cdot (\rho \Gamma_\phi \nabla \phi) dV = \oint_{\partial V_p} dS \cdot (\rho \Gamma_\phi \nabla \phi) = \sum_f S_f \cdot (\rho \Gamma_\phi \nabla \phi)_f \quad (4.5)$$

Kaynak Terimin Ayırıklaştırılması

$$\int_{V_p} S_\phi dV = S_C V_P + S_P V_P \phi_P \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.6'da S_P kaynak terimin lineer olmayan kısmı olup, S_C ise sabit kısımdır. Gerekli uzaysal ayırıklaştırmalar yapıldıktan sonra zamanda ayırıklaştırma eşitlik 4.7.'de gösterilmiştir.

Zamanda Ayırıklaştırma

Zamansal türevin ayırıklaştırılması Euler veya Crank-Nicolson gibi kapalı ayırıklaştırma şemaları kullanarak gerçekleştirilir. Elde edilen yarı ayırık taşınım denklemi eşitlik 4.7'de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
& \int_t^{t+\Delta t} \left(\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} \right) V_P dt + \int_t^{t+\Delta t} \sum_f S_f \cdot (\rho U \phi)_f dt \\
& = \int_t^{t+\Delta t} \sum_f S_f \cdot (\rho \Gamma_\phi \nabla \phi)_f dt + \int_t^{t+\Delta t} S_C V_P + S_P V_P \phi_P dt
\end{aligned} \tag{4.7}$$



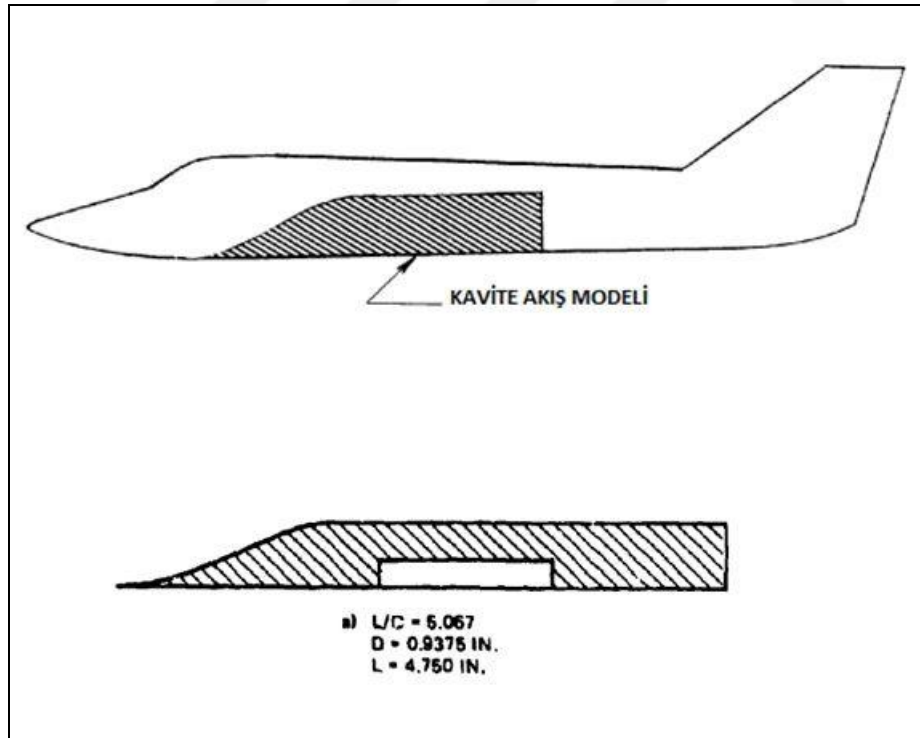


5. REFERANS DENEYSEL ÇALIŞMALARIN DOĞRULANMASI VE LİTERATÜRLE KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde OpenFOAM yazılımı ile gerçekleştirilen sayısal çalışma ve yaklaşımlarının, referans olarak alınan deneysel çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılması ve doğrulanması yapılmıştır. Referans çalışmalar olarak iki adet deneysel çalışma seçilmiştir. Birinci çalışma olarak Kaufman ve Clark'ın [14] 1,5 Mach rejiminde L/D oranı 5,07 olan açık kavite geometrisi seçilmiş olup, ikinci çalışma olarak Xiansheng vd.'nin [42] 1,8 Mach rejiminde L/D oranı 6 olan açık kavite geometrisi kullanılmıştır.

5.1. Birincil Referans Deneysel Çalışmanın Doğrulanması

İlk referans çalışma olarak Şekil 5.1'de gösterilen Kaufman ve Clark'ın [14] deneysel çalışması seçilmiştir. Yapılan çalışma 1,5 Mach süpersonik rejimdeki rüzgâr tüneline dikdörtgen şeklindeki kavite geometrisi için gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.1. Kaufman ve Clark'ın [14] deneysel çalışma modeli

Gerçekleştirilen sayısal çalışmadaki akış özellikleri Kaufman ve Clark'ın [14] yapmış oldukları deneysel çalışma ile aynı şekilde seçilmiştir. Kavite tipi olarak açık kavite seçilmiş olup, kavite uzunluk derinlik oranı (L/D) 5,07 alınmıştır. Kavite uzunluğu 0,12065 m olup, kavite derinliği ise 0,0635 m'dir.

Çizelge 5.1. Kaufman ve Clark'ın [14] deneysel çalışma koşulları

Toplam Basınç	66,4 kPa
Toplam Sıcaklık	218 K
Mach Sayısı	1,5
Reynolds Sayısı	$1,09 \times 10^6$
Kavite Uzunluğu	0,12065 m
Kavite Derinliği	0,0238 m

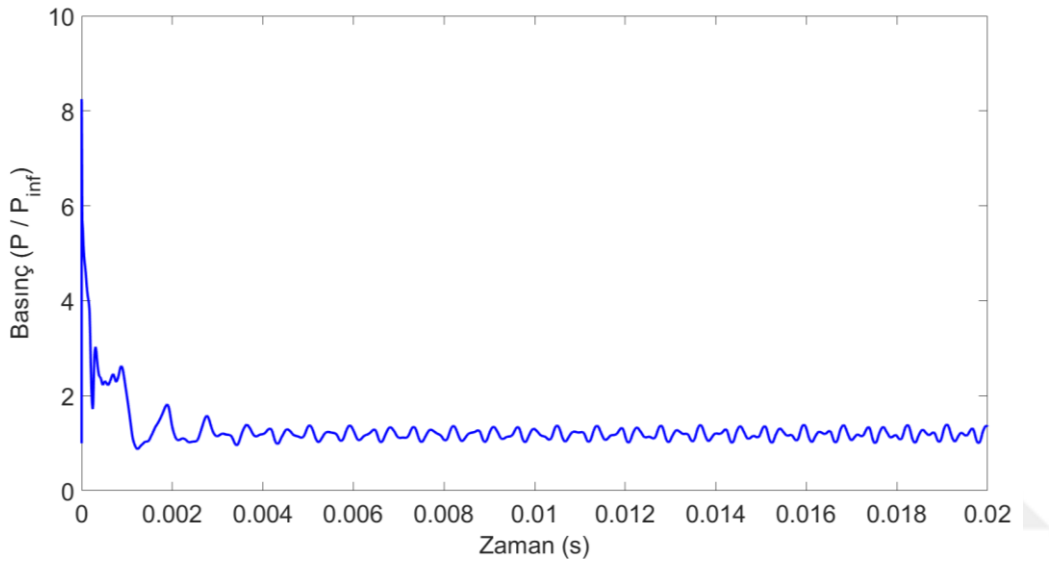
Sayısal çalışmada kullanılan OpenFOAM yazılımı, yapısal (structured) ağlar için oldukça güvenilir ve gürbüz sonuçlar vermektedir. Yazılımda kartezyen koordinatlar kullanılmaktadır. Yazılımda korunum denklemleri sonlu hacimler metoduna dayalı bir sayısal yöntem ile çözülmektedir. Oluşturulan kontrol hacimleri dikdörtgen paralel yüzölçümlüdür. OpenFOAM yazılımı yüzey bazlı (face-based) algoritma kullanmaktadır. Tüm fiziksel parametreler düğümler yerine hücre merkezinde toplanmaktadır. Kullanılan kontrol hacmi yaklaşımına göre bir önceki bölümde anlatıldığı gibi korunum denklemleri cebirsel denklemlere dönüştürülerek, iteratif çözülmektedir. Yaldır [44] tarafından yapılan çalışmada ayırıklaştırma yöntemlerinin kavite akışına etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan ayırıklaştırma yöntemleri Çizelge 5.2'de gösterilmiştir. Uzaysal türevler kapalı (implicit) ikinci dereceden sonlu fark operatörleri ile ikinci mertebe doğrulukla elde edilmektedir. Zamansal türevler ise kapalı (implicit) birinci mertebe doğrulukla Euler tekniği ile elde edilmektedir. Konvektif akılar için ikinci dereceden sonlu fark operatörleri kullanılırken, türbülans parametrelerinde upwind yaklaşımı kullanılmıştır. Difüzyon terimleri için merkezi farklar yöntemi kullanılmaktadır. Çözüm algoritması olarak PIMPLE algoritması kullanılmıştır. PIMPLE algoritması PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator) ile SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algoritmalarının birleşimidir. PIMPLE, PISO ve SIMPLE algoritmalarının hepsi iteratif çözücülerdir ve her bir çözüm adımında momentum korunumunu sağlamak için hıza yönelik bir düzeltme yaparak kütle korunumunu sağlamak için basınç denklemi

çözmektedir. PIMPLE ve PISO algoritması zamana bağlı problemlerde kullanılırken, SIMPLE algoritması zamandan bağımsız problemler için kullanılır.

Çizelge 5.2. Kullanılan ayırıklaştırma şemaları

		Yöntem	Açıklama
ddtSchemes		Euler	1. Dereceden zaman ayırıklaştırması
gradSchemes		Gauss Linear	2. Dereceden gradyan ayırıklaştırması
divSchemes	U	Gauss Linear	2. Dereceden akış ayırıklaştırması
	e	Gauss Linear	2. Dereceden enerji ayırıklaştırması
	p	Gauss Linear	2. Dereceden basınç ayırıklaştırması
	k	Gauss Upwind	1. Dereceden türbülans ayırıklaştırması
	w	Gauss Upwind	1. Dereceden türbülans ayırıklaştırması
laplacian Schemes		Gauss Linear Corrected	2. Dereceden ayırıklaştırma
Interpolation Schemes	default	Linear	2. Dereceden ayırıklaştırma
	reconstruct (rho)	vanLeer	2. Dereceden ayırıklaştırma
	reconstruct (U)	vanLeerV	2. Dereceden ayırıklaştırma
	reconstruct (T)	vanLeer	2. Dereceden ayırıklaştırma
snGradSchemes	default	corrected	2. Dereceden ayırıklaştırma

Çözümlerde öncelikli olarak çözümün doğruluğu araştırılmıştır. Artık değerlerin süreklilik, momentum ve enerji denklemi için 10^{-3} oranından daha düşük olması durumunda çözümün yakınsadığı kabul edilmiştir. Ek olarak çözümün yakınsayıp yakınsamadığı zamana bağlı olarak fiziksel parametreler çizdirilerek gösterilmiştir. Şekil 5.2’de boyutsuzlaştırılmış basınç değerlerinin zamana göre grafiği sunulmuştur. Zamana bağlı tüm fiziksel parametreler akışın 0,01 ile 0,02 saniyeler arasında hesaplamalarda kullanılmıştır.



Şekil 5.2. Kavite arka duvar kritik noktasının basınç – zaman grafiği

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinde zamandan ve hücre sayısından bağımsızlaştırılmayan sonuçlar anlamlı ve güvenilir değildir. Bu yüzden öncelikli olarak hücre sayısından ve zamandan bağımsızlaştırma çalışmaları yapılarak analizlere başlanmalıdır. Böylelikle hücre sayısı ve zaman adımı hataları en aza indirgenerek simülasyonlara başlanmış olunur. Yapmış olduğumuz çalışmada zamandan ve hücre sayısından bağımsızlaştırma çalışmalarına ek olarak uzak alan bölgesinden bağımsızlaştırma çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Uzak alan olarak tanımladığımız serbest akış bölgesinin kavite bölgesi içerisine etkisinin olmaması gerekmektedir. Bu doğrultuda bu bölüm içerisinde aşağıdaki çalışmalar anlatılmaktadır:

- Hücre sayısı bağımsızlaştırma çalışması
- Zaman adımı bağımsızlaştırma çalışması
- Uzak alan bölgesi bağımsızlaştırma çalışması

5.1.1. Sayısal çalışmanın hücre sayısından bağımsızlaştırılması

Çözümün doğrulama çalışmasını gerçekleştirebilmek için ilk olarak oluşturulan sayısal modelin hücre sayısından bağımsızlaştırılması gerekmektedir. Çizelge 5.3’de sayısal çözümlerde kullanılan hücre sayıları ve dağılımları görülmektedir. Ağ yapılarındaki hücreler x ve y eksenleri yönünde düzenli şekilde artırılmıştır.

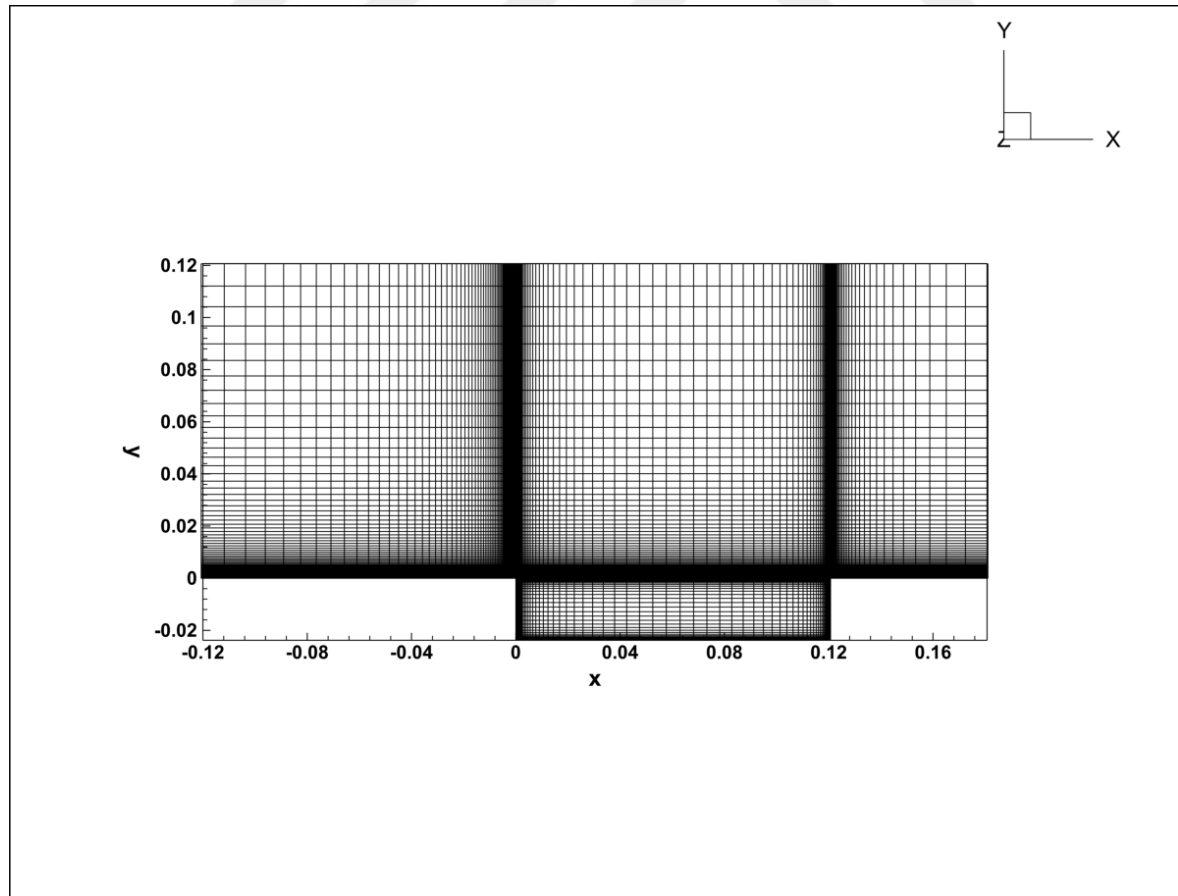
Çizelge 5.3. Ağ yapılarında kullanılan hücre sayıları

Ağ Yapısı	Kavite Giriş Yüksekliği $0 < y < 0,12065$	Kavite Giriş Uzunluğu $-0,12065 < x < 0$	Kavite Boyu $-0,0238 < y < 0$	Kavite Tabanı $0 < x < 0,12065$	Kavite Çıkışı $0,12065 < x < 0,183675$	Hücre Sayısı
1	75	75	80	100	40	24570
2	120	120	160	200	60	69040
3	150	150	200	300	75	137010
4	200	200	320	400	100	220500
5	300	300	400	500	150	364000

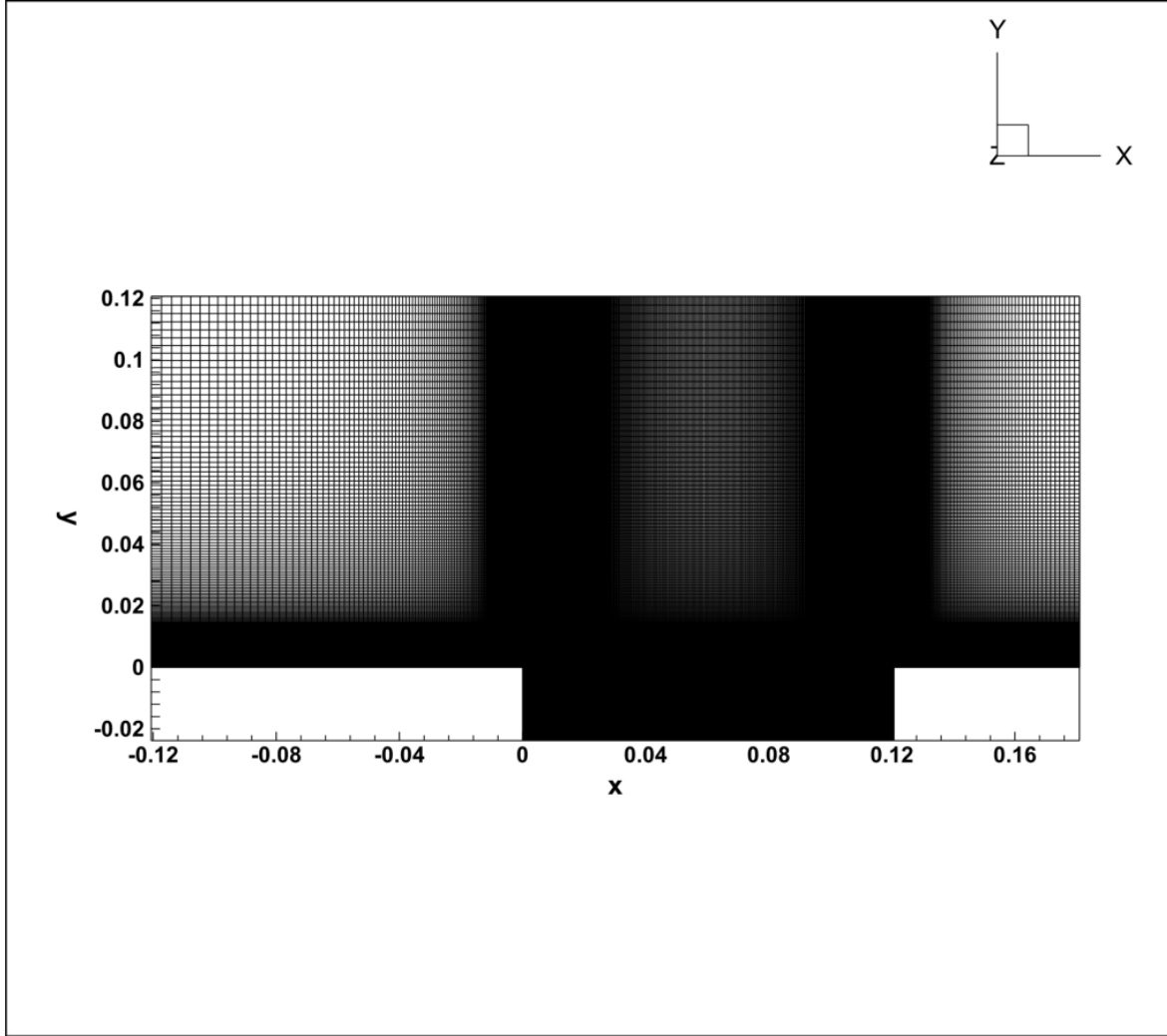
Gerçekleştirilen yapısal ağ yapısındaki hücrelerin kalitesi çözümü doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden ağ yapılarındaki hücrelerin boy/en oranları (aspect ratio) en fazla 100 olacak şekilde tutulmuştur. Kavite bölgesindeki hücrelerde is bu oran en fazla 20 olacak şekilde ayarlanmıştır. Duvara en yakın hücrenin çözümlenebilmesi için (viskoz alt tabaka bölgesi) y+ değerleri en fazla 5 olacak şekilde ayarlanmıştır. Çizelge 5.4’de sayısal çözümlerde kullanılan hücrelerin özellikleri sunulmuştur. Ek olarak en kaba ağ yapısı olan Ağ yapısı 1 ve en sık olan Ağ yapısı 5 konfigürasyonları da sırasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de sunulmuştur.

Çizelge 5.4. Ağ yapılarının özellikleri

Ağ Yapısı	Kavite Bölgesi Hücres Sayısı	Kavite Bölgesi Dışı Hücres Sayısı	İlk Hücres Yüksekliği	Hücres Büyüme Oranı	Boy/En Oranı (Kavite Bölgesi Dışı)	Boy/En Oranı (Kavite Bölgesi)	y+ (ortalama)
1	7920	16650	10^{-4}	1,1	80,58	29,31	5,12
2	31840	37200	10^{-4}	1,1	56,54	12,18	4,91
3	71760	65250	5×10^{-5}	1,1	101,62	19,92	2,81
4	119700	100800	5×10^{-5}	1,1	81,33	20	2,92
5	199600	164400	5×10^{-5}	1,1	67,21	19,85	2,21



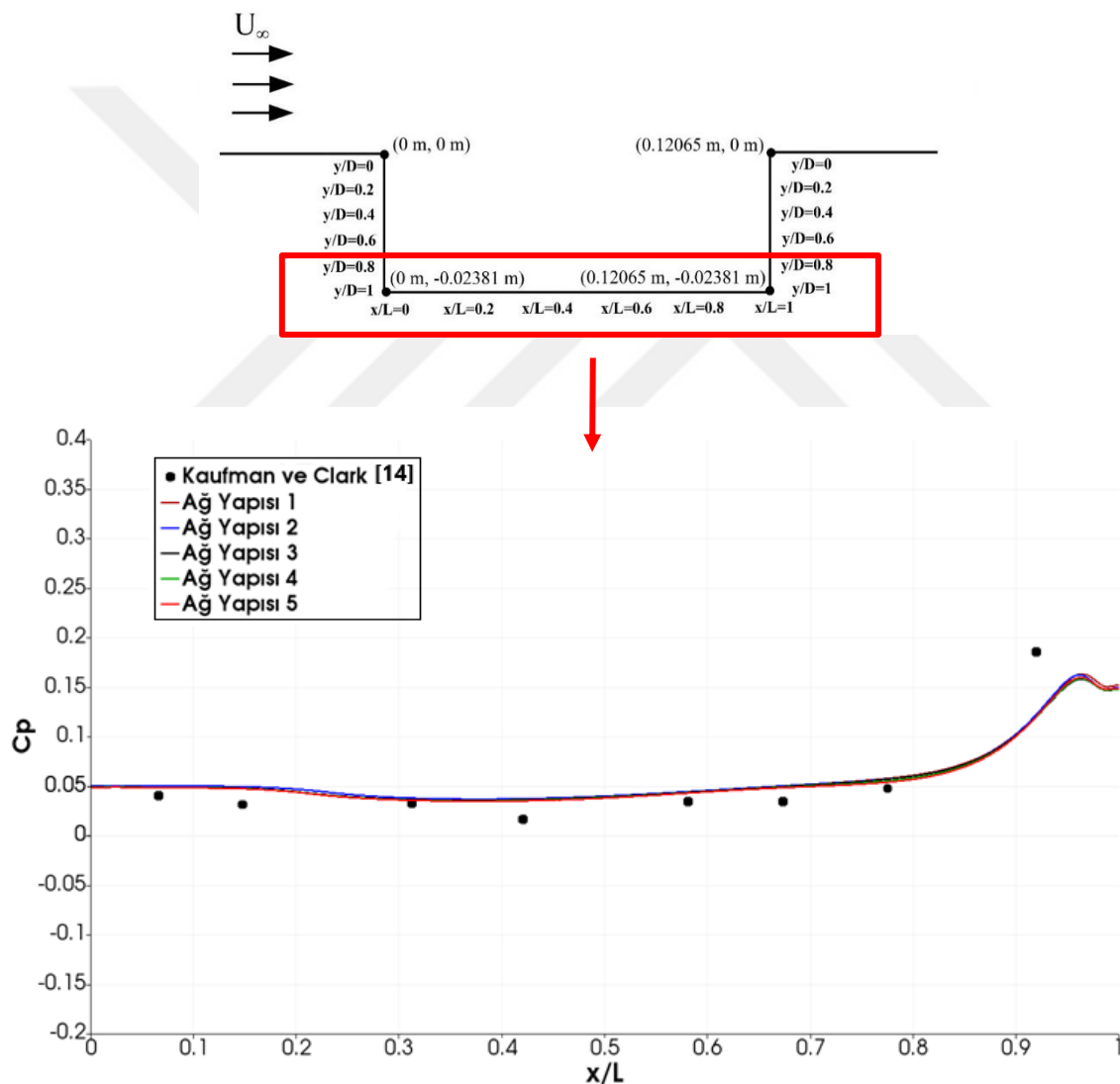
Şekil 5.3. Ağ yapısı 1



Şekil 5.4. Ağ yapısı 6

Sayısal çalışmalar sonucunda kavite bölgesinin ön, arka ve alt duvarlarındaki ses basınç seviyeleri hesaplanmıştır. Zamana bağlı basınç değerleri kullanılarak basınç katsayıları ve akışı domine eden frekansların değerleri bulunmuştur. Hesaplama yaparken kullanılan zamana bağlı basınç değerleri akış düzene oturduktan sonra alınan değerlerdir. Bu değerler 10 ve 20. Rossiter periyotları arasındadır. Ayrıca gerçekleştirilen çalışmalar 10^{-8} zaman adımı ile Çizelge 5.1’de verilen deneysel parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışma sonucunda elde edilen ses basınç seviyeleri ve basınç katsayıları deneysel çalışmada var olan alt duvar sonuçları ile kıyaslanmıştır. Ayrıca elde edilen sayısal frekans değerleri Rossiter’in yarı ampirik formülü ile bulunan frekans değerleri ile kıyaslanmıştır. Kıyaslama yapılan üç adet fiziksel parametre ağ yapısından bağımsız sonuçlar elde edilmesi için gereken ağ yapısının seçilmesine olanak sağlamıştır.

İki boyutlu ağ yapılarından elde edilen basınç katsayılarının karşılaştırmaları Şekil 5.5’de gösterilmiştir. Kavite alt duvarı boyunca genel olarak basınç katsayıları sabit kalmakta fakat kavite sonuna doğru artmaktadır. Bunun sebebi olarak kavite kesme tabakası ile arka duvar etkileşimi sonucunda kavite bölgesinde yoğunluklu girdap oluşumunun buradan başlaması yorumu yapılabilir. Bütün ağ yapılarında referans olarak seçilen deney çalışmasına benzer değerler elde edilmiştir. Bu benzerliğin sebebi basınç katsayılarının zamana bağlı ortalama değer ile hesaplanarak basınçtaki artış ve azalışların birbirlerini dengelemesidir.



Şekil 5.5. Ağ yapılarının kavite alt duvarında basınç katsayıları cinsinden karşılaştırılması

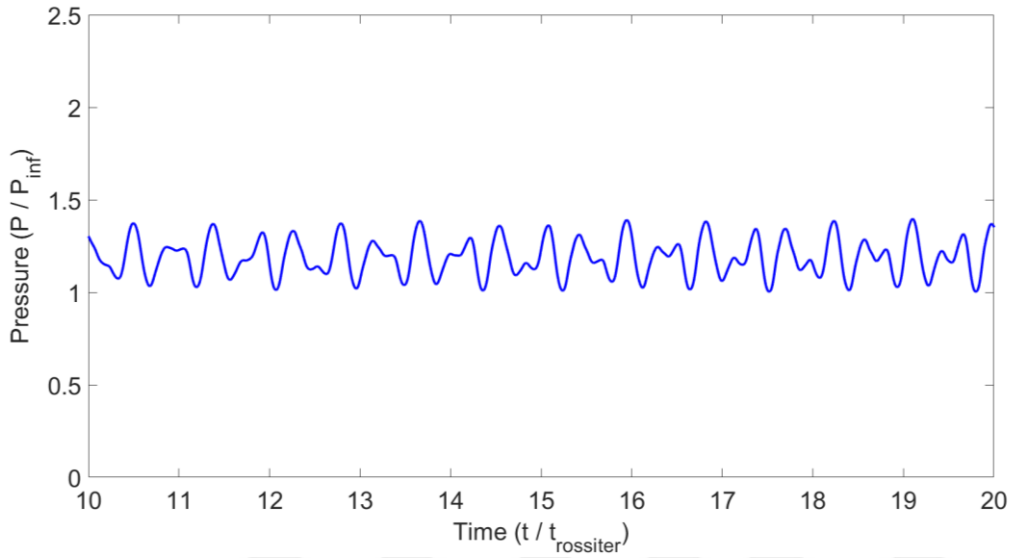
Sayısal çalışmalar sonucunda elde edilen basınç değerleri kullanılarak FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) sonucunda akışı domine eden frekanslar araştırılmıştır. Bu çalışma yapılırken

akışın nümerik etkilerinden arındığı zaman adımları hesaba katılmıştır. Şekil 5.2’de görüldüğü üzere simülasyon başladığında akış değerleri çalkantılıdır, akışın düzenli olarak osilasyona başlamış olduğu 10. ve 20. Rossiter periyotları arasındaki fiziksel parametrelerle hesaplamalar yapılmıştır (Şekil 5.6). Her bir ağ yapısı için ilk dört baskın modun frekans değeri Çizelge 5.5’de gösterilmiştir. Ağ Yapısı 1’de birinci mod yakalanamamıştır. Diğer ağ yapılarında tüm baskın modlar yakalanmıştır.

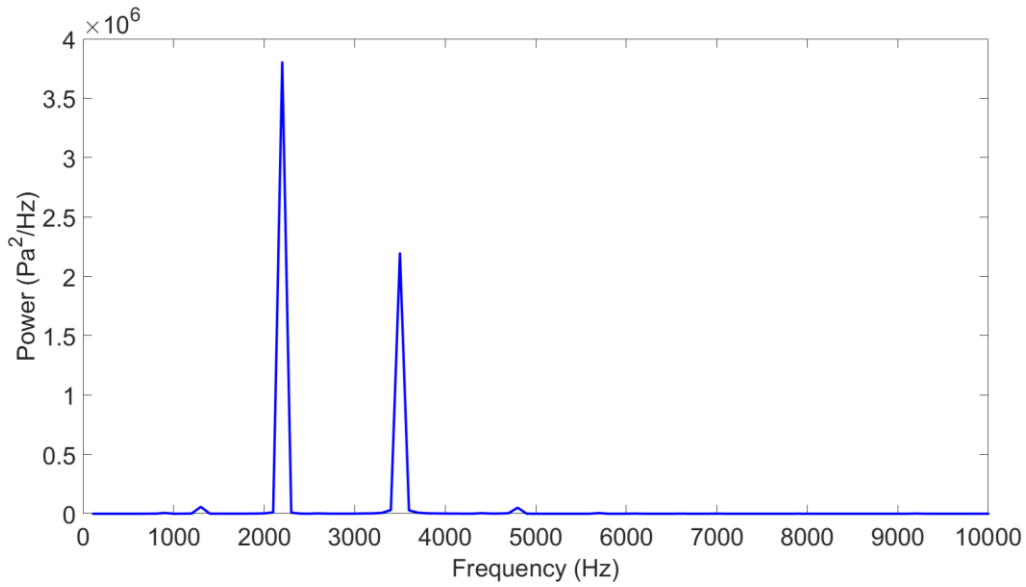
Çizelge 5.5. Ağ yapılarının baskın ilk dört frekans mod değerleri ve Rossiter Modu ile kıyaslaması

Ağ Yapısı	Frekans Modları	Rossiter Mod (Hz)	Sayısal Değerler (Hz)	Fark (%)
1	f1	1109,1	-	-
	f2	2218,3	2200	0,825
	f3	3327,2	3500	5,19
	f4	4537,1	4400	3,02
2	f1	1109,1	1300	17,21
	f2	2218,3	2200	0,825
	f3	3327,2	3500	5,19
	f4	4537,1	4800	5,79
3	f1	1109,1	1300	17,21
	f2	2218,3	2200	0,825
	f3	3327,2	3500	5,19
	f4	4537,1	4400	3,02
4	f1	1109,1	1300	17,21
	f2	2218,3	2200	0,825
	f3	3327,2	3500	5,19
	f4	4537,1	4800	5,79
5	f1	1109,1	1300	17,21
	f2	2218,3	2200	0,825
	f3	3327,2	3500	5,19
	f4	4537,1	4400	3,02

Ağ yapısı 3 için 10. ve 20. Rossiter periyotlarında boyutsuzlaştırılmış basınç değerleri gösterilmiştir. Şekil 5.6'da bu periyot aralığına denk gelen basınç dalgalanmalarının boyutsuzlaştırılmış zamana karşı osilasyon grafiği paylaşılmıştır. Ek olarak Şekil 5.7'de Ağ yapısı 3 için ilk dört baskın modun güç frekans grafiği sunulmuştur.

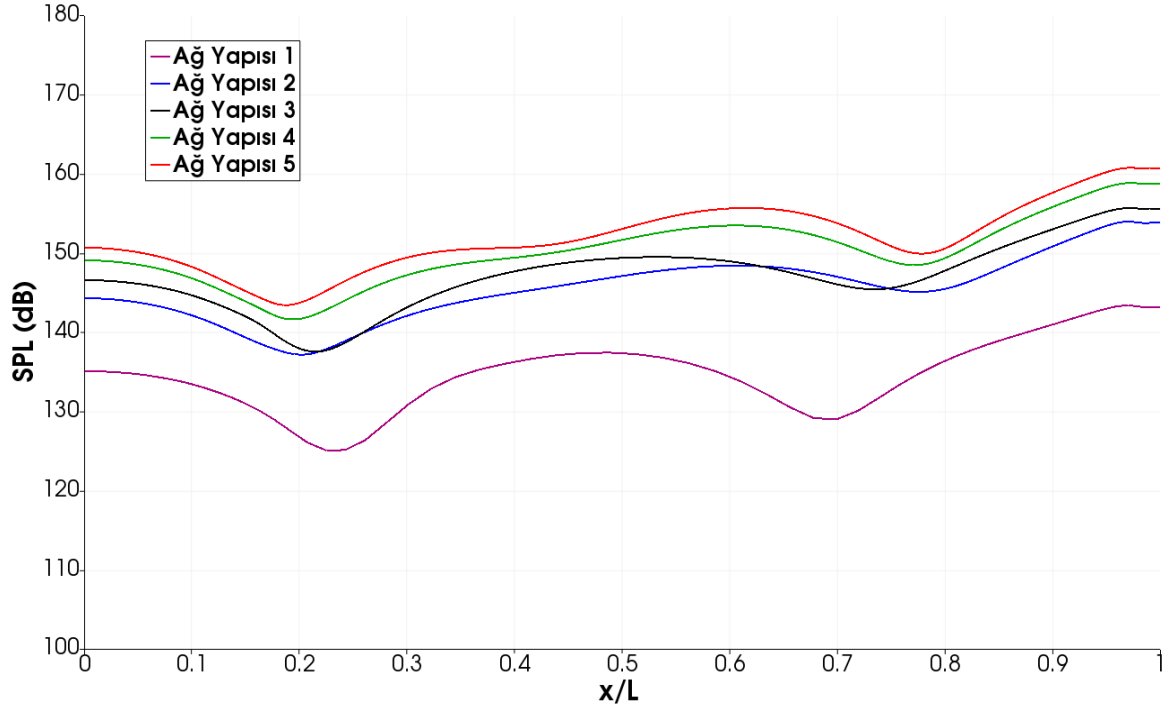


Şekil 5.6. Ağ yapısı 3 için basınç – zaman grafiği



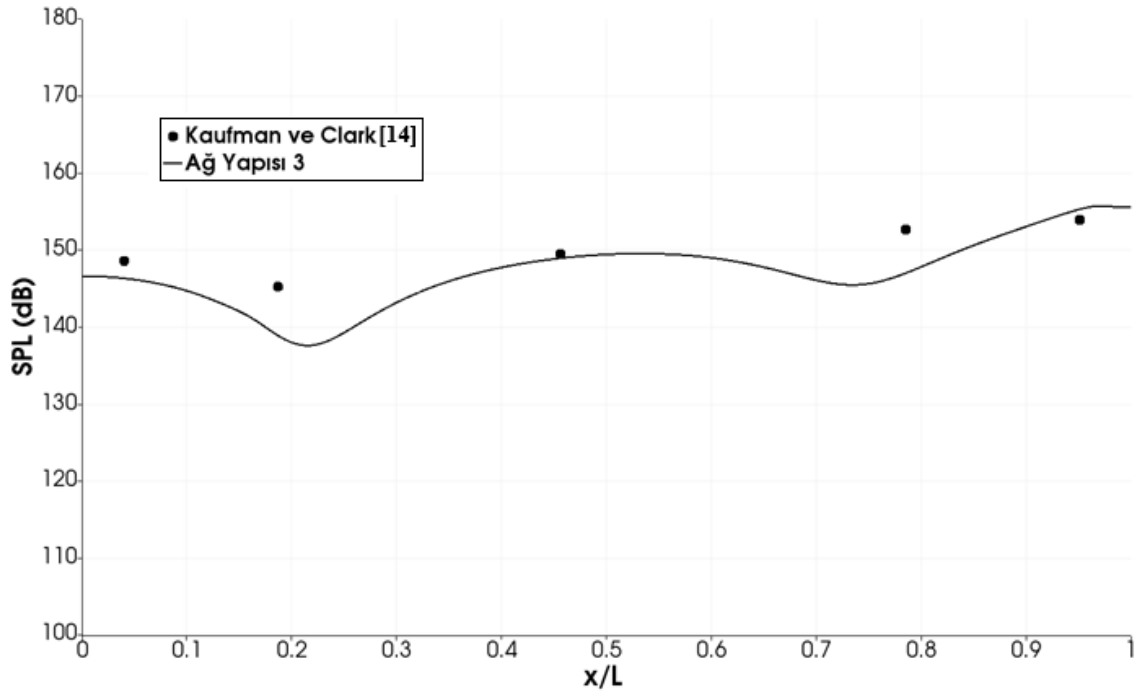
Şekil 5.7. Ağ yapısı 3 için güç – frekans grafiği

Sayısal çalışmayı doğrulama parametrelerinden en son ve en önemli parametre olan ses basınç seviyeleri tüm ağ yapıları için hesaplanmıştır. Tüm ağ yapıları için ses basınç seviyelerinin alt duvara göre karşılaştırmaları Şekil 5.8'de sunulmuştur.



Şekil 5.8. Ağ yapılarının kavite alt duvarında ses basınç seviyeleri cinsinden karşılaştırılması

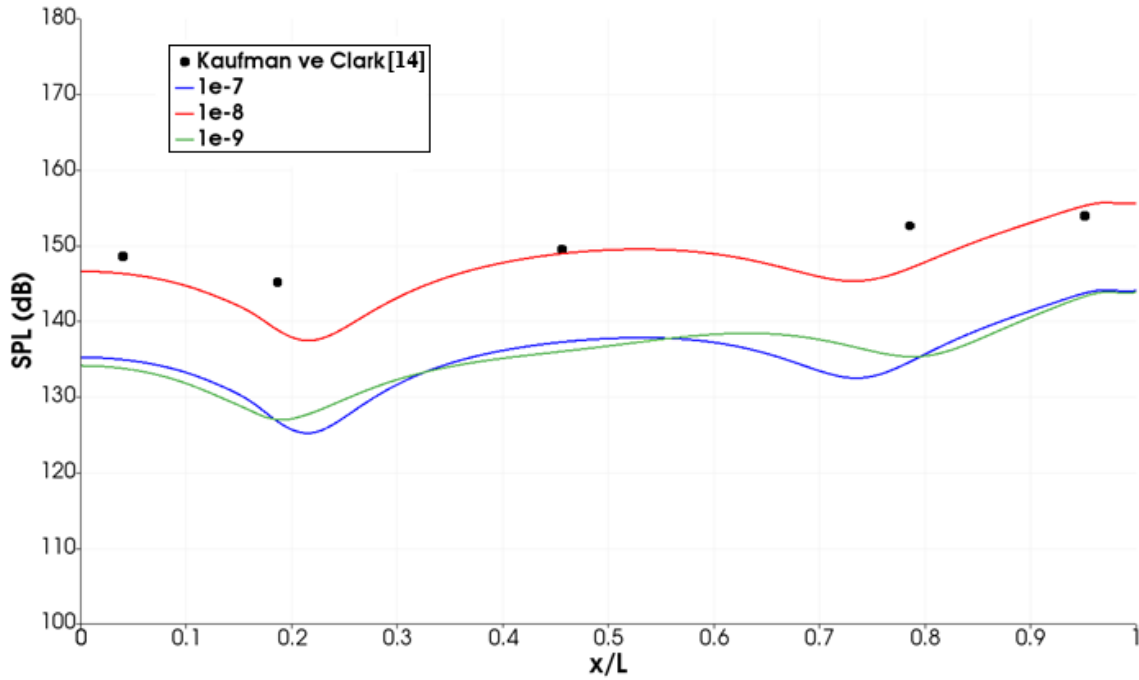
Şekil 5.8'deki ses basınç seviyelerinin alt duvar konumuna göre karşılaştırıldığı grafiğe göre Ağ yapısı 1 ve Ağ yapısı 2 deneysel çalışmaya yeterince yakın değildir. Ağ yapısı 3, 4 ve 5 deneysel çalışma ile tutarlıdır. Bilgisayar gücü ve hesaplama zamanı göz önüne alındığında optimum sayıda hücre sayısı ile sonuçların değişmediği ağ yapısı seçilmelidir. Ağ yapısı 3 bu kriteri uyan en uygun ağ yapısıdır. Bu tez çalışmasının parametrik sayısal çalışmalarında Ağ yapısı 3 kullanılacaktır. Şekil 5.9'da Ağ yapısı 3 ve referans deneysel çalışmanın alt duvar konumuna göre ses basınç seviyeleri cinsinden karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Ağ yapısı 3 ile deneysel çalışmanın kavite alt duvarı için ses basınç seviyeleri cinsinden karşılaştırılması

5.1.2. Sayısal çalışmanın zaman adımından bağımsızlaştırılması

Zamana bağlı analizlerde çözümün doğrulanması için ağ yapısı bağımsızlaştırma çalışmasına ek olarak zaman adımı bağımsızlaştırma çalışması da yapılması gereklidir. Bir önceki bölümde seçilmiş olan Ağ yapısı 3 ile $\Delta t = 10^{-7}$, $\Delta t = 10^{-8}$ ve $\Delta t = 10^{-9}$ zaman adımları ile analizler yürütülmüş olup Şekil 5.10'da sonuçlar alt duvar için ses basınç seviyeleri cinsinden paylaşılmıştır.



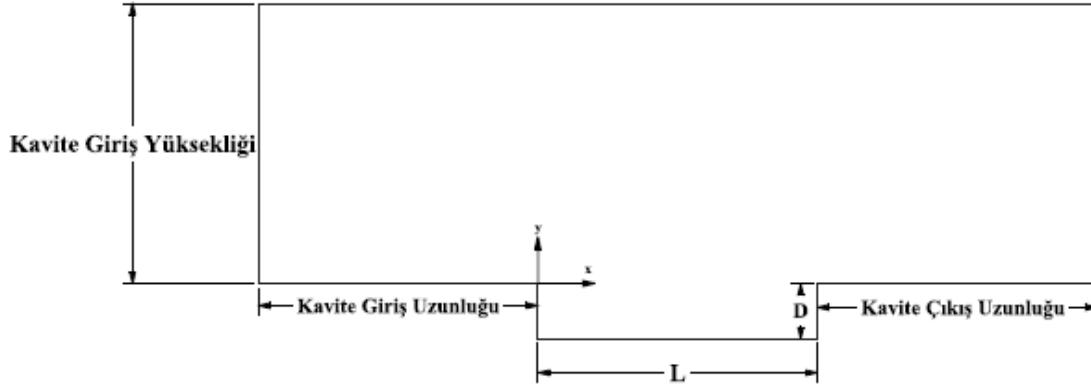
Şekil 5.10. Zaman adımı çalışmalarının kavite alt duvarında ses basınç seviyeleri cinsinden karşılaştırılması

Süpersonik kavite akış fiziği karmaşık ve zamana bağlı bir akıştır. Şekil 5.10 incelendiğinde 10^{-7} zaman adımı ile gerçekleştirilen çalışmalar akış fiziğini yakalayamamıştır. 10^{-8} zaman adımı deneysel çalışmayla en tutarlı çalışmadır. 10^{-9} zaman adımı ile gerçekleştirilen çalışmaların akış fiziğini daha iyi yakalaması umulurken aksine ses basınç seviyeleri daha farklı çıkmıştır. Bunun sebebi olarak zaman adımının çok küçülmesi simülasyondaki yuvarlama hatalarının artmasına yol açarak sayısal hataların artmasına sebep olmuştur. Böylece deneysel değerlerden sapmalar ortaya çıkmış olup bu kadar küçük zaman adımı kullanılmasının gereksiz olduğu görülmüştür. Tezin geri kalan kısmında 10^{-8} zaman adımı ile simülasyonlar gerçekleştirilecektir.

5.1.3. Sayısal çalışmanın uzak alan bölgesinden bağımsızlaştırılması

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarında sınır şartı olarak uzak alan bölgesinin kullanılması; sınır şartı tanımı gereği, akış alanında hesaplanan fiziksel parametrelerin uzak alan bölgesinden etkilenmemesi gerekmektedir. Ayrıca kavite giriş bölgesinde oluşan sınır tabakanın tam gelişmiş hale ulaşması sonuçların doğruluğuna etkileyen diğer parametrelerden birisidir. Kavite çıkış uzunluğunun da kavite bölgesini etkilemeyecek uzunlukta olması gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı Ağ yapısı 3 çalışması ile kavite

giriş yüksekliği, kavite giriş uzunluğu ve kavite çıkış uzunluğu parametreleri sistematik olarak değiştirilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.11’de sayısal model doğruluğunun sağlanması için akış bölgesinde incelenen parametreler gösterilmiştir.

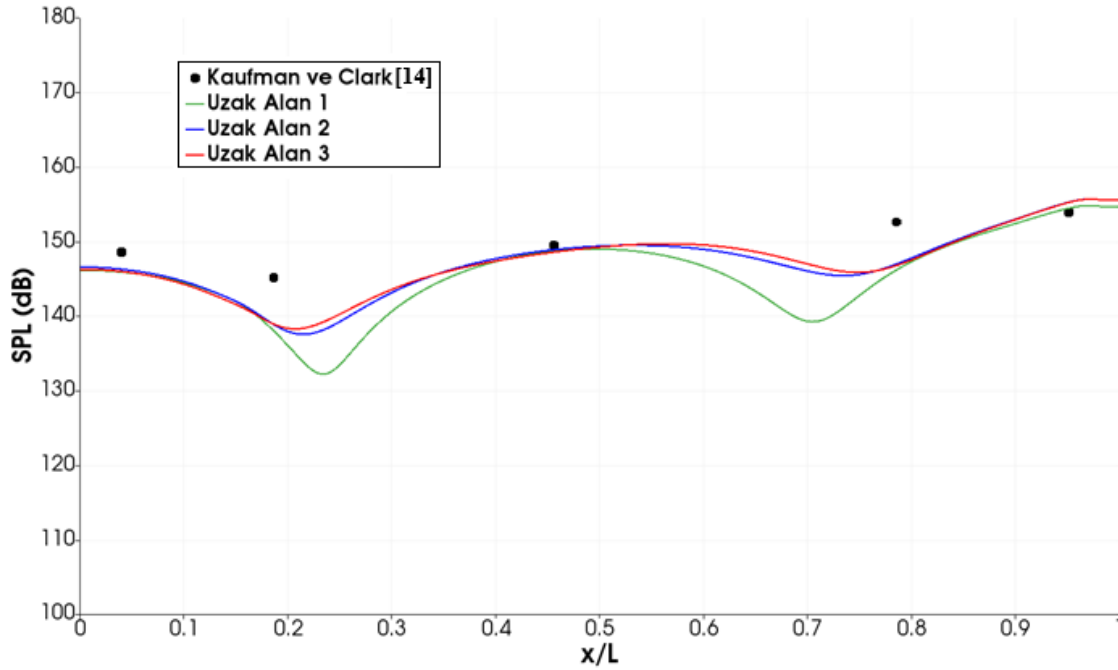


Şekil 5.11. Kavite bölgesi uzak alan bağımsızlaştırması parametreleri

İncelenen parametreler kavite bölgesi akış mekanizmasını etkileyen en önemli faktör olan kavite uzunluğu katları şeklinde sistematik olarak değiştirilmiştir. Yapılan çalışma elde edilecek sayısal modelin optimum sayıda hücre kullanılarak akışı doğru şekilde modelleyebilmek amacı taşımaktadır. Çizelge 5.6’da kavite bölgesi uzak alan bağımsızlaştırma konfigürasyonları özellikleri sunulmuştur.

Çizelge 5.6. Kavite bölgesi uzak alan bağımsızlaştırması konfigürasyon özellikleri

Konfigürasyon Numarası	Kavite Giriş Yüksekliği (m)	Kavite Giriş Uzunluğu (m)	Kavite Çıkış Uzunluğu (m)	Konfigürasyon Adı
1	0,060325 (0,5L)	0,060325 (0,5L)	0,0301625 (0,25L)	Uzak Alan 1
2	0,12065 (L)	0,12065 (L)	0,060325 (0,5L)	Uzak Alan 2
3	0,180975 (1,5L)	0,180975 (1,5L)	0,12065 (L)	Uzak Alan 3



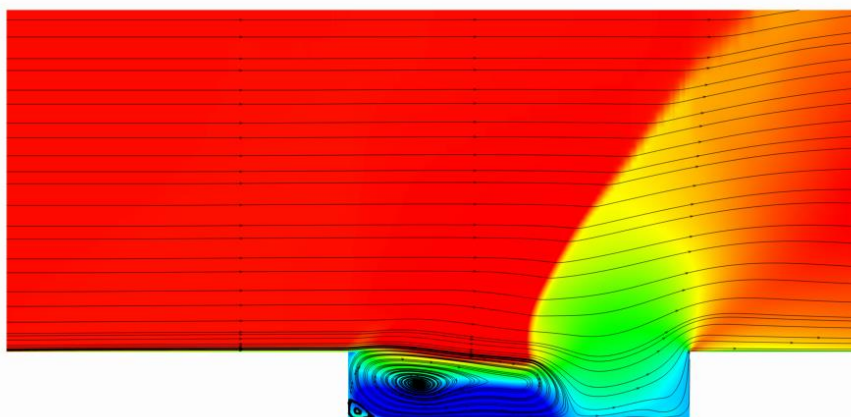
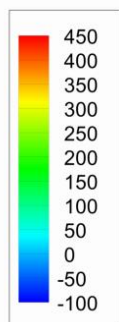
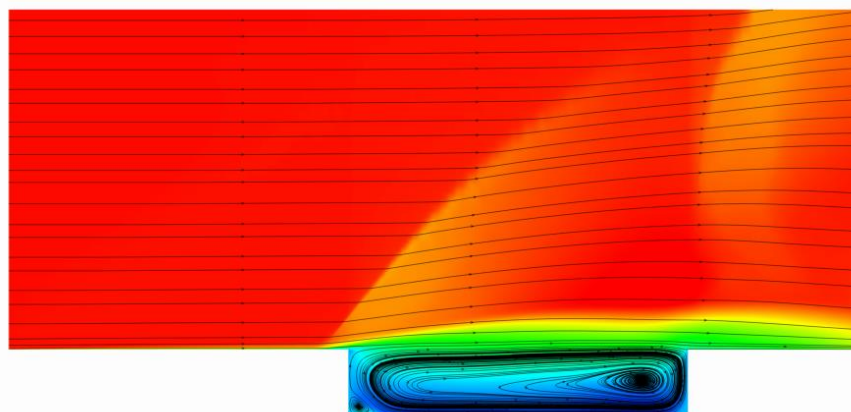
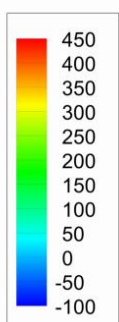
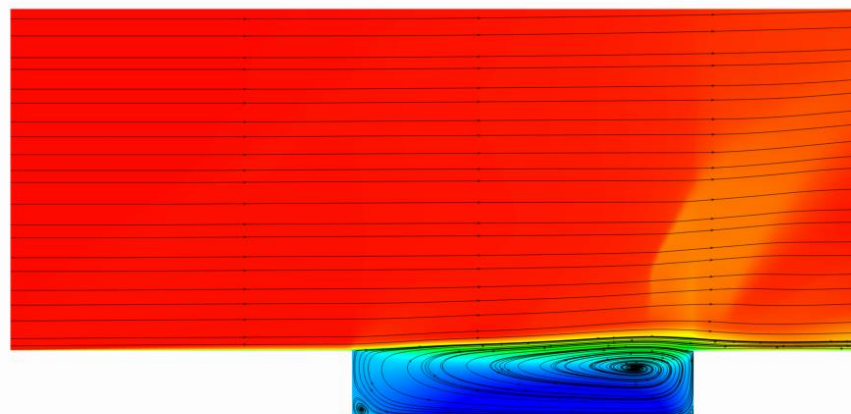
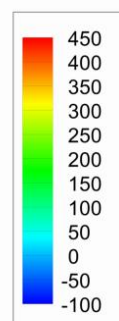
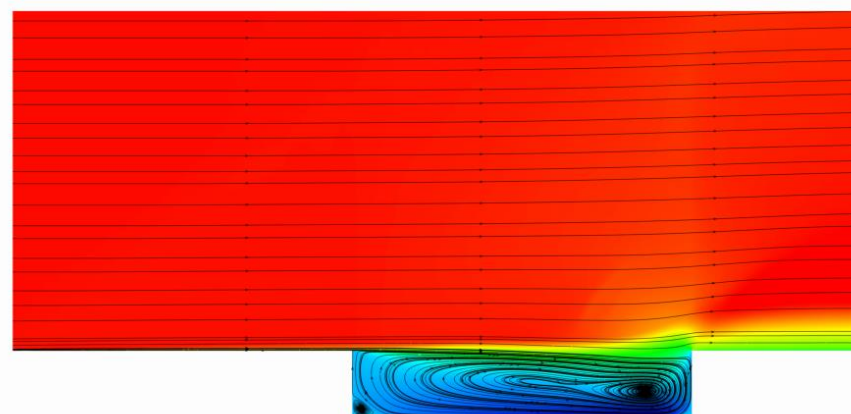
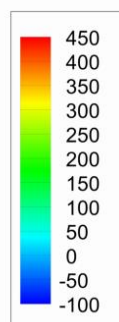
Şekil 5.12. Uzak alan bölgelerinin kavite alt duvarında ses basınç seviyesi cinsinden karşılaştırılması

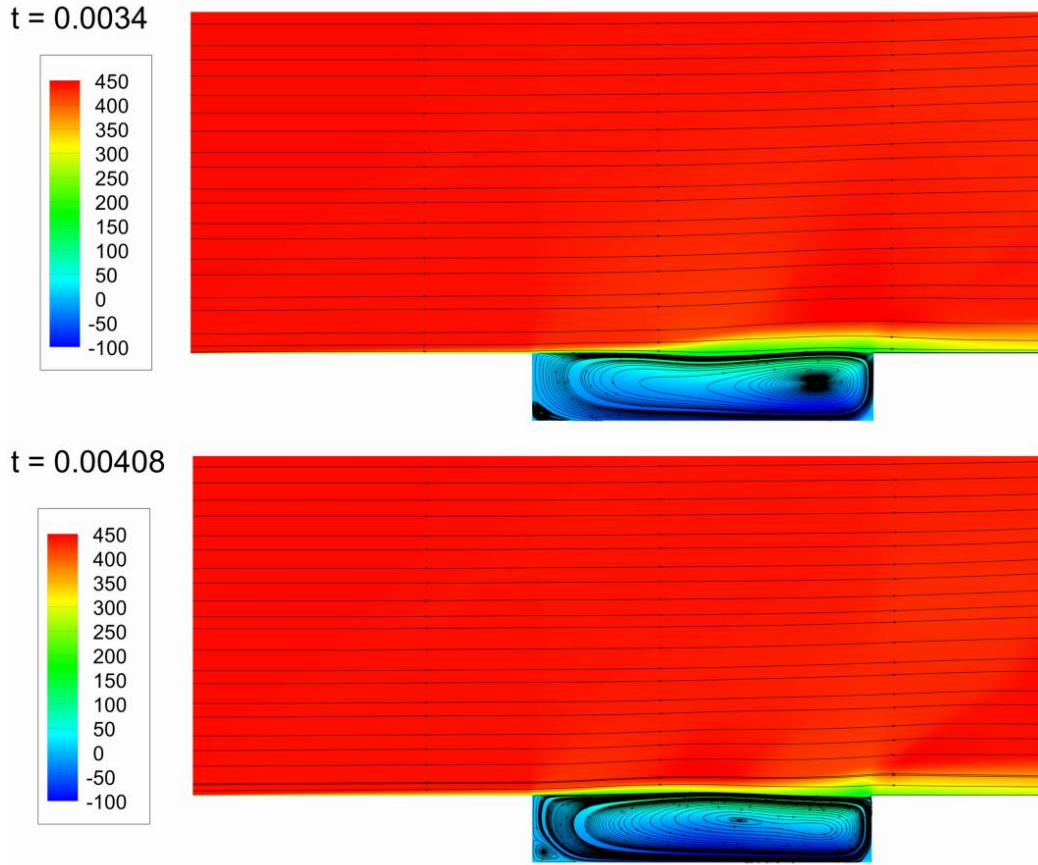
Şekil 5.12 incelendiğinde, Uzak alan 1 konfigürasyonunda kavite akış fiziğindeki genel yapı yakalanmış olsa da kavite alt duvarının ön ve arka bölgelerinde ses basınç seviyelerinde deney ile tutarsızlıklar bulunmaktadır. Özellikle kavite alt duvarının $x/L=0,24$ ve $x/L=0,7$ konumunda ses basınç seviyeleri deneyden farklı çıkmıştır. Uzak alan 2 konfigürasyonunda alt duvar ses basınç seviyelerinin tamamında trend deney sonuçları ile uyum içerisindedir. Uzak alan 3 konfigürasyonunda da akışın genel özellikleri ve alt duvardaki ses basınç seviyeleri deneyle uyum içerisindedir. Uzak alan 2 konfigürasyonu ile Uzak alan 3 konfigürasyonun alt duvar ses basınç seviyeleri sonuçlarında neredeyse fark yoktur. Deneylere iki konfigürasyondaki bu yakınlık gerçekleştirilmiş olan sayısal ağ çalışmasının uzak alan bölge büyüklüğünden bağımsız hale geldiğini göstermektedir. Sonuç olarak hesaplama zamanı ve bilgisayar yükü açısından bundan sonra yapılacak çalışmalarda Uzak alan 2 konfigürasyonu kullanılacaktır.

Literatürden seçilen deneysel çalışma kullanılarak sayısal çalışma ve yaklaşımlarının doğrulanması için gerçekleştirilen bağımsızlaştırma çalışmalarında kullanılacak nihai geometri Ağ yapısı 3 olup, 10^{-8} zaman adımı kullanılarak ve Uzak alan 2 konfigürasyonu kullanılarak gerçekleştirilecektir.

Süpersonik kavite akışı kendi kendini tekrar eden bir akış mekanizmasına sahiptir. Sürekli kendini tekrar eden bu yapıyı gösterebilmek için akıştaki 1. periyotluk zaman dilimi içerisinde oluşan mekanizma Şekil 5.13.'de vektörel hız dağılımları olarak sunulmuştur. Kavite girişinde serbest hava akışı ile gelen sınır tabaka kavite ön duvar üst köşesinde ayrılmakta, kavite üzerinde akmakta ve kavite arka duvar üst köşesinde tekrar birleşmektedir. Kavite arka duvar üst köşesinde kesme tabakasının duvar ile etkileşimi sonucunda kavite bölgesinin basınç değerleri serbest hava akışı basınç değerlerinin çok altında kalmaktadır ve kavite bölgesine kütle girişi olmaktadır. Bu kütle girişi kavite arka duvarında başlayan basınç dalgalarını kavite ön duvarına doğru ilerleterek, ön duvara çarpan basınç dalgaları kavite bölgesindeki basınç değerlerini artırmaktadır. Yükselen basınç değerleri sonucunda kavite bölgesinden kavite dışarısına doğru kütle çıkışı olmaktadır. Bu kavite mekanizması sürekli olarak kendini tekrar etmektedir. Kavite bölgesi içerisi ile dışarısında bu kendini tekrar eden yapılar kesme tabakasının dinamik yapısını oluşturmaktadır. Farklı zaman dilimlerinde kesme tabakasının kavite bölgesi içerisine girdiği ve farklı zaman dilimlerinde kavite dışarısına çıktığı Şekil 5.13'deki farklı zaman dilimlerinde gözlemlenmiştir. Stabil olmayan kesme tabakasının oluşturduğu salınımlar oluşan akustik dalgaların ve gürültünün ana kaynağıdır.

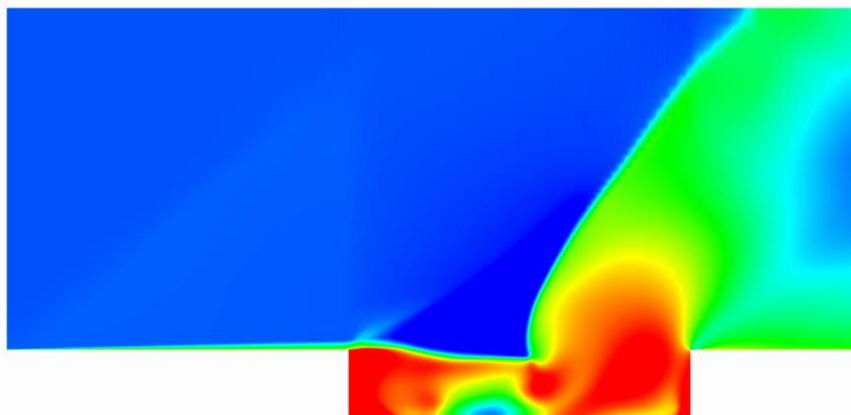
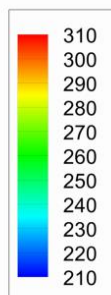
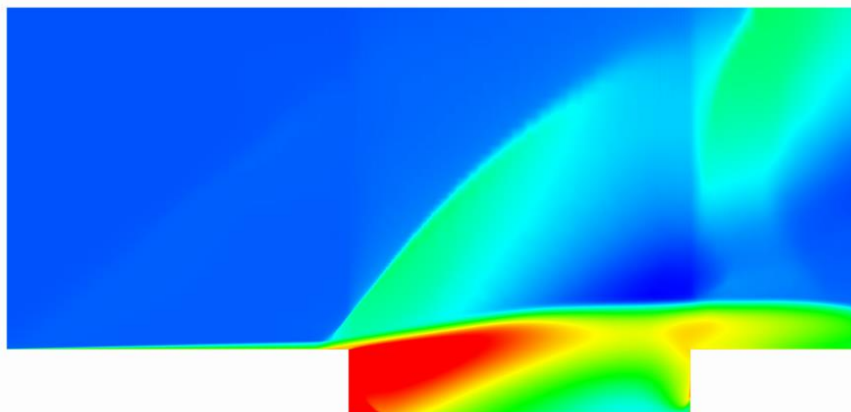
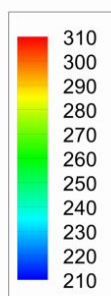
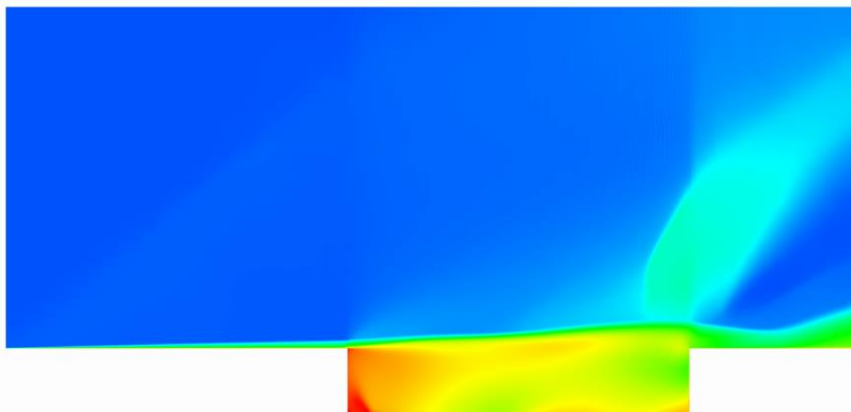
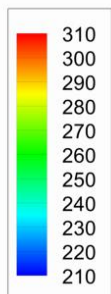
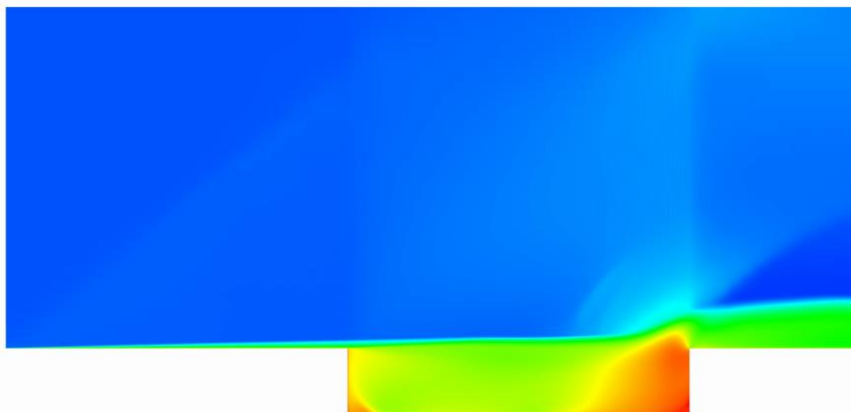
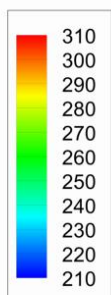
Şekil 5.13'deki zamana bağlı x yönündeki vektörel hız dağılımları incelendiği zaman kavite içerisinde oluşan girdap yapıları görülmektedir. Akışı domine eden iki adet girdap yapısından arka duvara yakın olanı büyük yapıya sahiptir. Diğer girdap yapısı ise kavite ön duvarının alt noktasında olan küçük yapıya sahiptir. Bu girdaplardan birisi çözülmeye başladığında diğeri oluşmaktadır. Ayrıca alt duvar üzerinde ve alt duvar ile arka duvarın birleştiği köşede ($t=0,00204$ anında görülen) küçük girdapçıkların da olduğu gözlemlenmiştir. Oluşan küçük ölçekli bu girdaplar yitime uğrayarak büyük ölçekli girdapların oluşumuna katkı sağlamıştır.

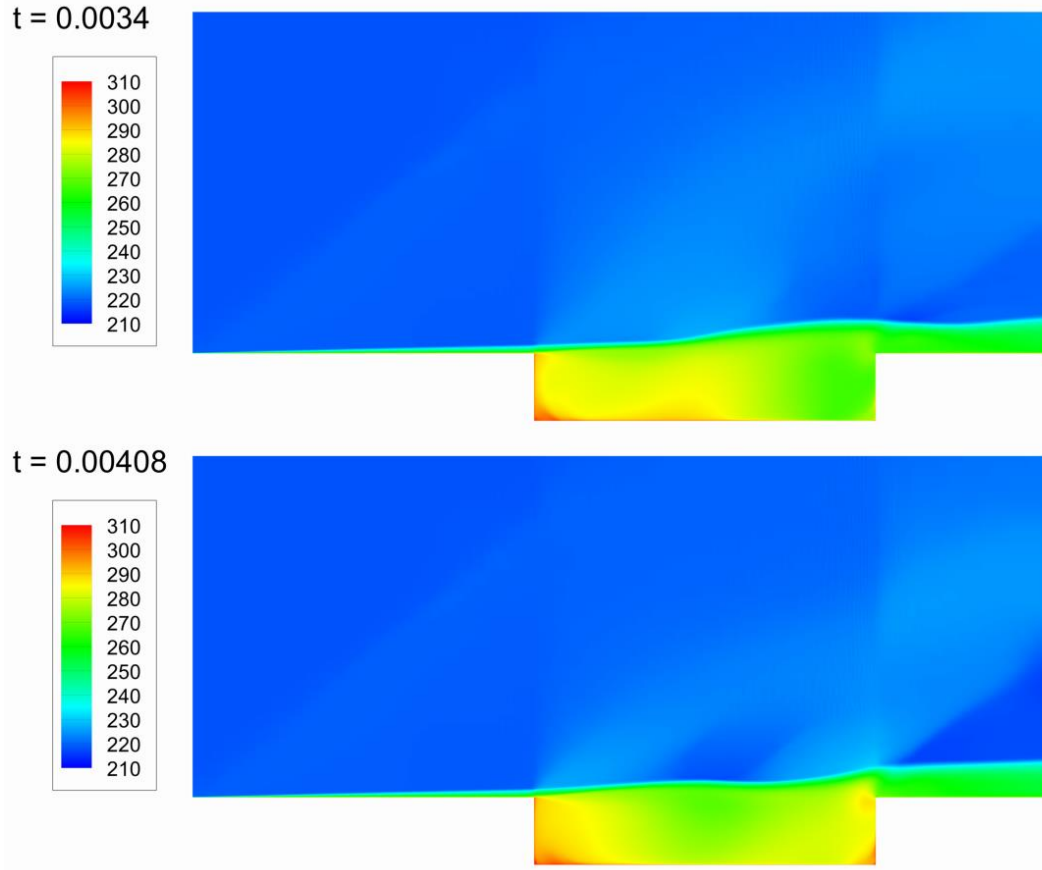
$t = 0.00068$  $t = 0.00136$  $t = 0.00204$  $t = 0.00272$ 



Şekil 5.13. Ağ yapısı 3 için zamana bağlı x yönündeki vektörel hız dağılımları

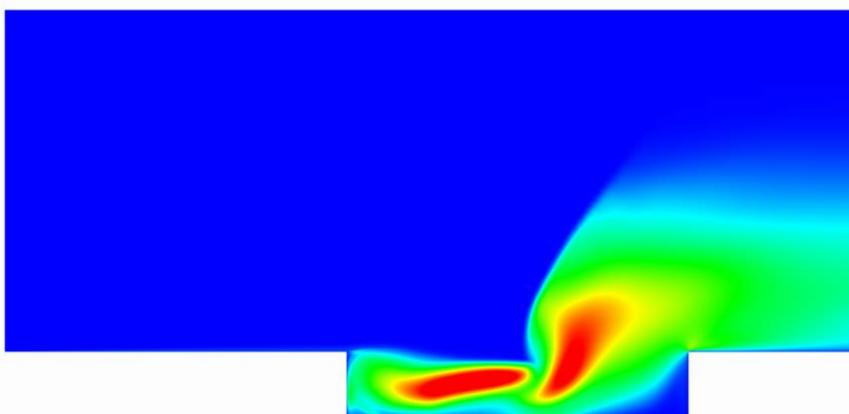
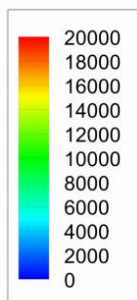
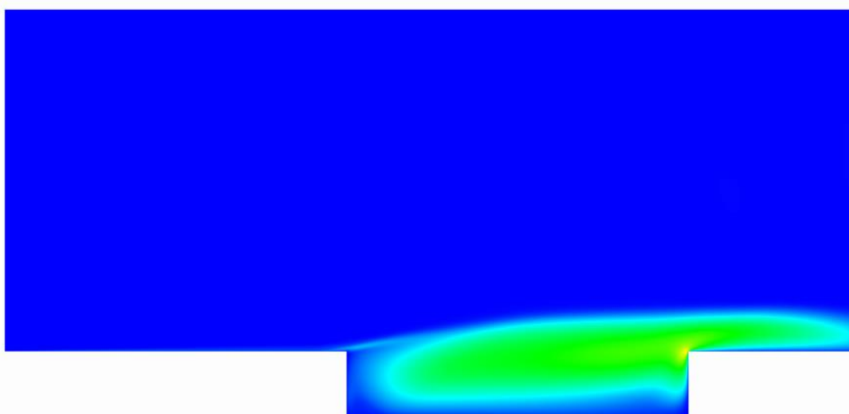
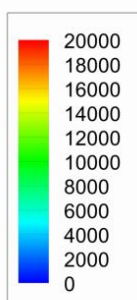
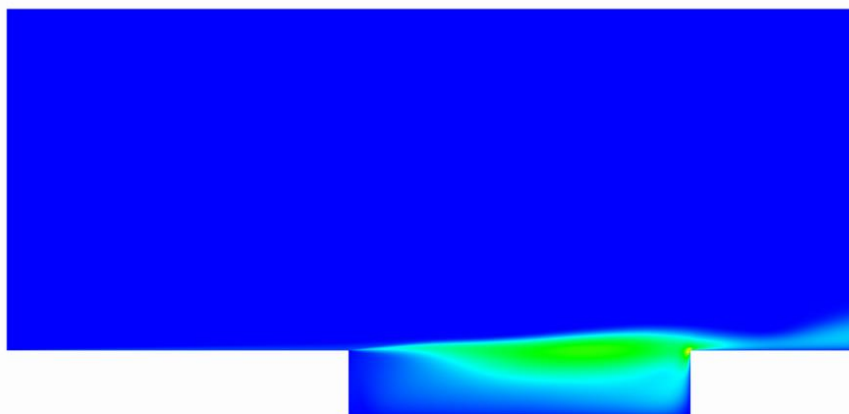
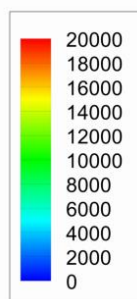
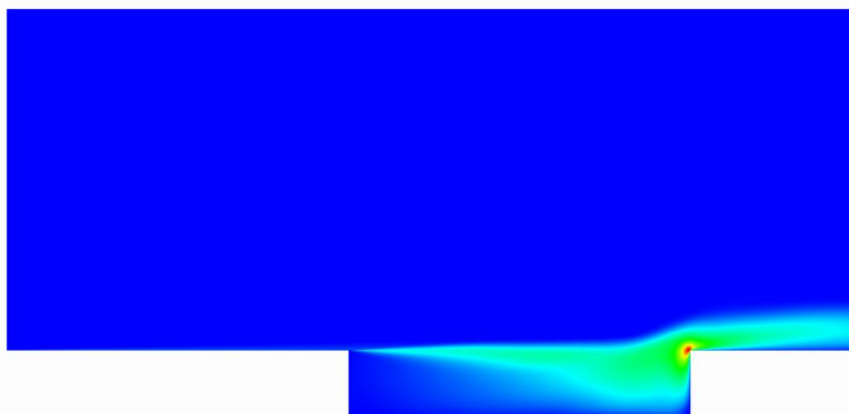
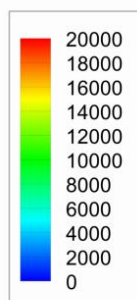
Ağ yapısı 3 için Şekil 5.14’de zamana bağlı sıcaklık konturları incelendiğinde kavite bölgesi duvarlarındaki sıcaklığın serbest akış bölgesine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Kavite arka duvar üst noktasında oluşan eğik şoktan sonra kavite bölgesi dışarısında sıcaklık değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Gözlemlenen sıcaklık düşüşü eğik şok oluşumunu doğrular niteliktedir. Ayrıca kavite bölgesi girişinde gelen akışın kavite ön duvar üst köşesinde ayrılması da zayıf bir eğik şok oluşumunu tetiklemiştir. $t=0,00408$ anında ayrılan akışta oluşan zayıf şok açık kavitelerin karakteristik olarak gösterdikleri zayıf şok biçimini doğrulamıştır.

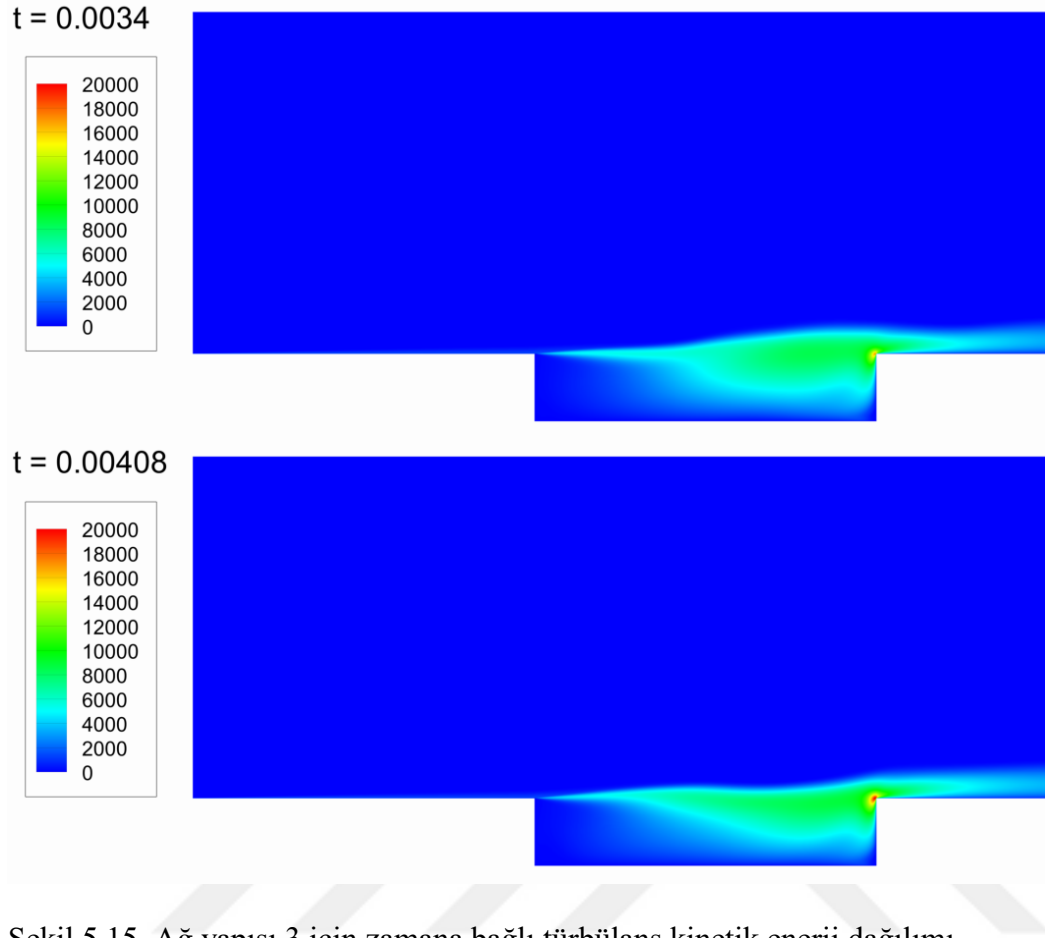
$t = 0.00068$  $t = 0.00136$  $t = 0.00204$  $t = 0.00272$ 



Şekil 5.14. Ağ yapısı 3 için zamana bağlı sıcaklık konturları

Ağ yapısı 3 için Şekil 5.15’de zamana bağlı türbülans kinetik enerjisi dağılımı incelendiğinde kavite arka duvarına doğru türbülans kinetik enerjisinin arttığı görülmektedir. Türbülanslı kinetik enerjinin fazla olduğu bölgeler türbülanstaki salınım teriminin baskın olduğu bölgelerdir. Bu bölgelerde basınç salınımları fazla olup gürültü seviyeleri de fazladır. Akıştaki gürültü seviyesi en fazla olan bölge kavite arka duvarının üst kısmıdır. Bu bölgenin en yüksek ses basınç seviyesine sahip olması türbülanslı kinetik enerjinin zamana bağlı dağılımından gözlemlenmiştir. Tüm kavite duvarları incelendiğine yine türbülanslı yapıların baskın olduğu bölge arka duvara yoğunlaşmıştır. Tezde arka duvar geometrisinin çeşitli parametrik konfigürasyonlarının incelenmesinin ana sebebi de bu türbülanslı yapıların yoğun olduğu bölgeyi yorumlayabilmek ve kontrol edebilmektir.

$t = 0.00068$  $t = 0.00136$  $t = 0.00204$  $t = 0.00272$ 



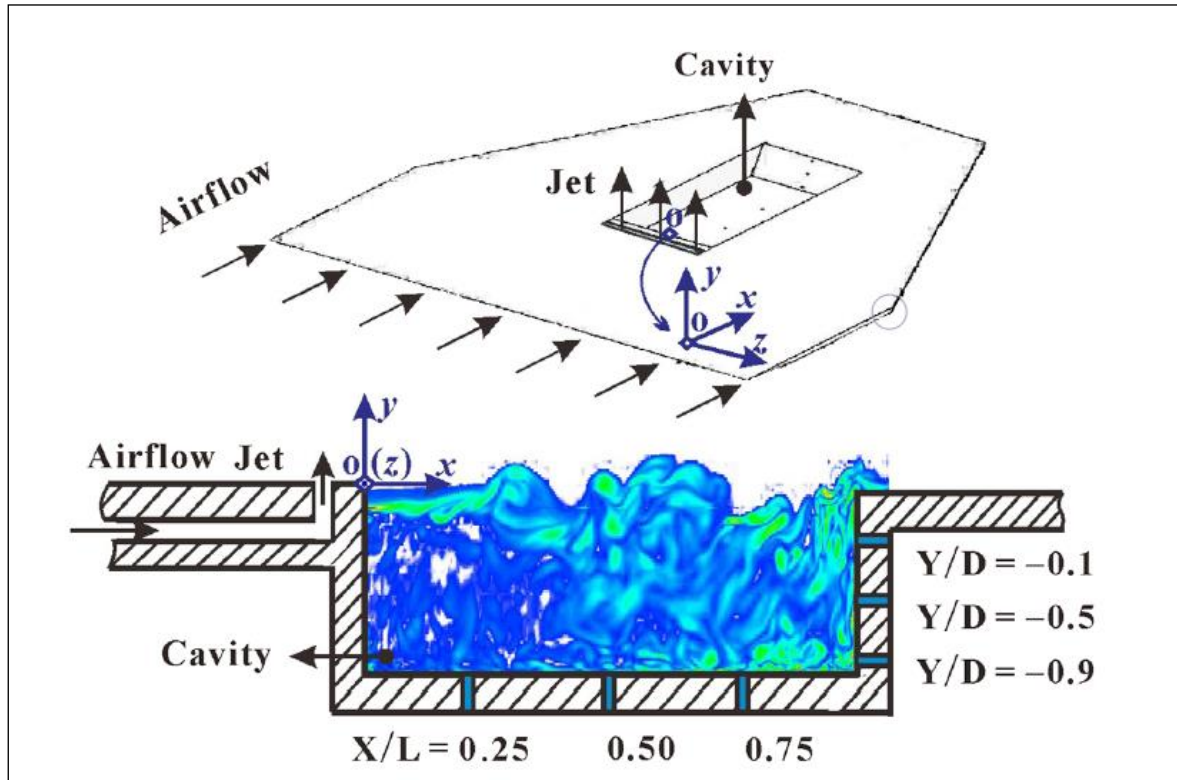
Şekil 5.15. Ağ yapısı 3 için zamana bağlı türbülans kinetik enerji dağılımı

5.1.4. HAD sonuçlarının birincil deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

Gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde parametrik çalışma için kullanılacak sayısal model; ağ yapısı, zaman adımı ve uzak alan bölgesinden bağımsız hale getirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde süpersonik kavite akışı genel yapısının iki boyutlu simülasyonlarla incelenebilir olduğu kanıtlanmıştır. Kavite akışında meydana gelen periyodik osilasyonlar ve kendini tekrar eden yapılar gözlemlenebilmiştir. Elde edilen sonuçlarda akışın baskın modlarının frekansları doğru tahmin edilmiştir. Görselleştirilen akış simülasyonlarındaki hız, sıcaklık ve türbülanslı kinetik enerji dağılımları, elde edilen çıktıları doğrular niteliktedir. Doğrulama çalışması Rossiter'in yarı empirik formülü, basınç katsayıları ve ses basınç seviyeleri cinsinden kıyaslanarak oluşturulan modelin ve yaklaşımların doğruluğu kanıtlanmıştır. Tezin parametrik sayısal çalışmalar bölümünde doğruluğu kanıtlanmış sayısal model ve yaklaşımları ile parametrik çalışmalar yürütülecektir.

5.2. İkincil Referans Deneysel Çalışmanın Doğrulanması

Doğrulama çalışmaları kapsamında ikinci referans deneysel çalışma olarak Şekil 5.16'da gösterilen Xiansheng vd.'nin [42] 1,8 Mach rejimindeki dikdörtgen kavite geometrisi kullanılmıştır. Referans deneysel çalışmada kavite ön duvarından hava üfleme yöntemi ile akış kontrolü sağlanmaya çalışılmaktadır. Hava üfleme yöntemi uygulanmayan temel kavite modeli tezde doğrulama çalışması olarak kullanılmıştır. Kavite alt duvarı için dört adet konumdan alınan temel kontrolsüz ses basınç seviyeleri doğrulama verileri olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 5.16. Xiansheng vd.'nin [42] deneysel çalışma modeli

Xiansheng vd.'nin [42] yapmış oldukları deneysel çalışmanın akış özellikleri Çizelge 5.7'de gösterilmiştir. Gerçekleştirilen doğrulama çalışmalarının akış özellikleri bu çizelge ile aynı şekilde seçilmiştir. Açık kavite özelliklerine sahip olan modelin L/D oranı 6, kavite uzunluğu 0,2 m olup, kavite derinliği ise 0,0333 m'dir.

Çizelge 5.7. Xiansheng vd.'nin [42] deneysel çalışma koşulları

Toplam Basınç	327,5 kPA
Toplam Sıcaklık	300 K
Mach Sayısı	1,8
Reynolds Sayısı	$4,4 \times 10^6$
Kavite Uzunluğu	0,2 m
Kavite Derinliği	0,0333 m

Çalışmalarda kullanılan tüm sayısal model ayarları bir önceki doğrulama çalışmasının nihai ayarları ile birebir aynı seçilmiştir. Seçilen zaman adımı ve uzak alan bölgesi boyutları yine bir önceki doğrulama çalışmasının nihai koşulları ile aynı olacak şekilde uygulanmıştır. Sayısal çalışmanın doğruluğu için hücre sayısından bağımsızlaştırma çalışmaları aşağıda gösterilmiştir.

5.2.1. Sayısal çalışmanın hücre sayısından bağımsızlaştırılması

Çözümlerin doğruluğunun ispatlanabilmesi için sayısal modelin hücre sayısından bağımsız hale getirilmesi gerekmektedir. Çizelge 5.8'de ağ yapılarında kullanılan hücre sayıları gösterilmiştir. Kavite bölgesi ve kavite bölgesi dışarısında hücre sayıları sistematik bir şekilde hem x hem de y yönünde artırılmıştır.

Çizelge 5.8. Ağ yapılarında kullanılan hücre sayıları

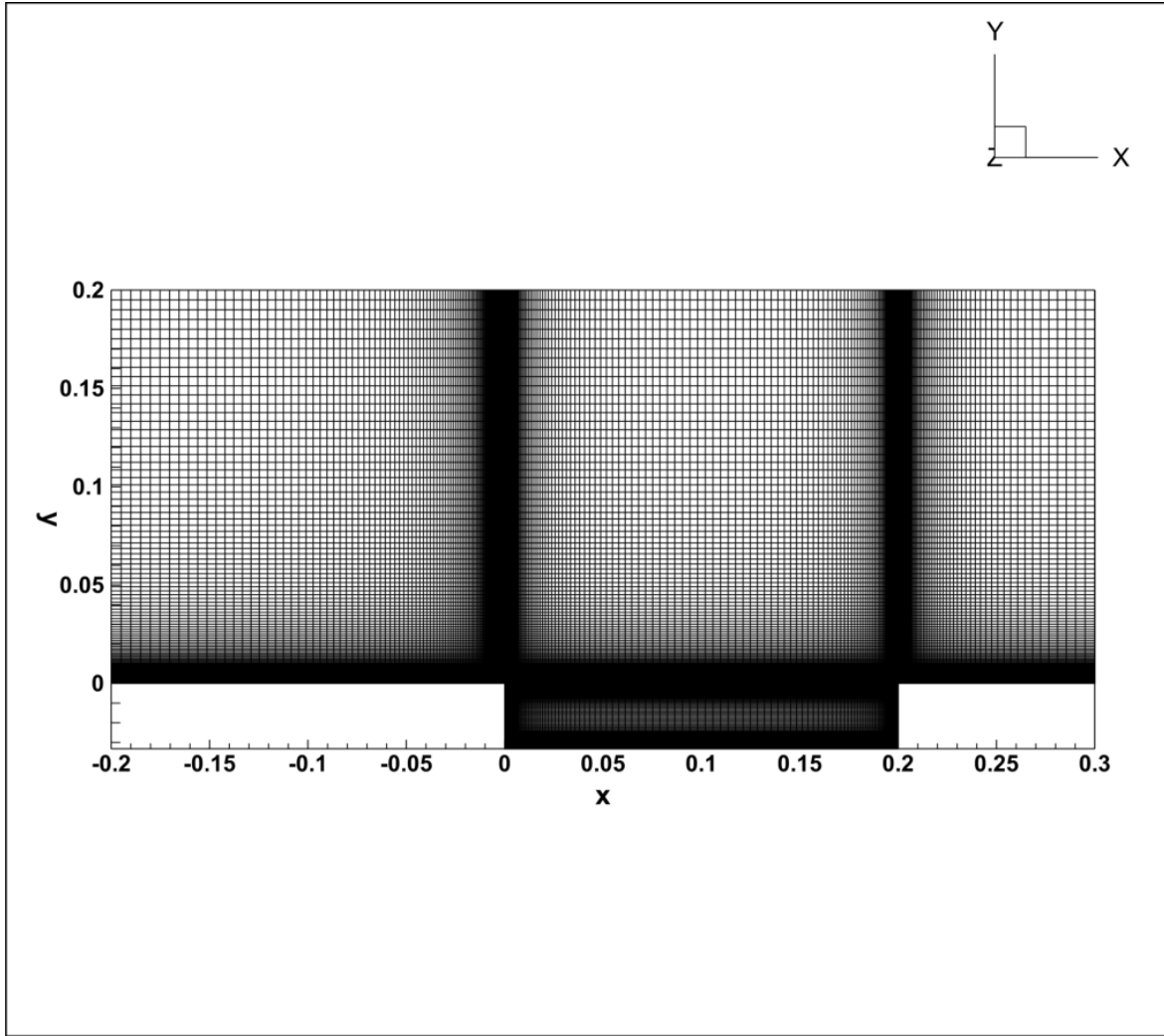
Ağ Yapısı	Kavite Giriş Yüksekliği $0 < y < 0,2$	Kavite Giriş Uzunluğu $-0,2 < x < 0$	Kavite Boyu $-0,0333 < y < 0$	Kavite Tabanı $0 < x < 0,2$	Kavite Çıkışı $0,2 < x < 0,3$	Hücre Sayısı
1	125	125	100	150	75	57779
2	150	150	125	200	100	91279
3	200	200	200	275	125	173329
4	300	250	200	500	200	382454
5	400	300	300	750	250	741454

Oluşturulan ağ yapılarında bir önceki doğrulama çalışmasında olduğu gibi yapısal (structured) ağ yapıları kullanılmıştır. Ağ yapılarındaki hücrelerin kaliteleri çözümün doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden ağ yapılarındaki hücrelerin boy/en oranları (aspect ratio) en fazla 100 olacak şekilde ayarlanmıştır. Duvara en yakın bölgedeki hücrelerde daha fazla gradyenler olacağı için viskoz alt tabakanın çözülmesi gerekmektedir. Bu yüzden duvara yakın hücrelerde tüm ağ yapıları için y^+ değerleri en fazla 5 olacak şekilde ayarlanmıştır. Çizelge 5.9'da yapısal ağlarda kullanılan hücrelerin özellikleri sunulmuştur.

Çizelge 5.9. Ağ yapılarının özellikleri

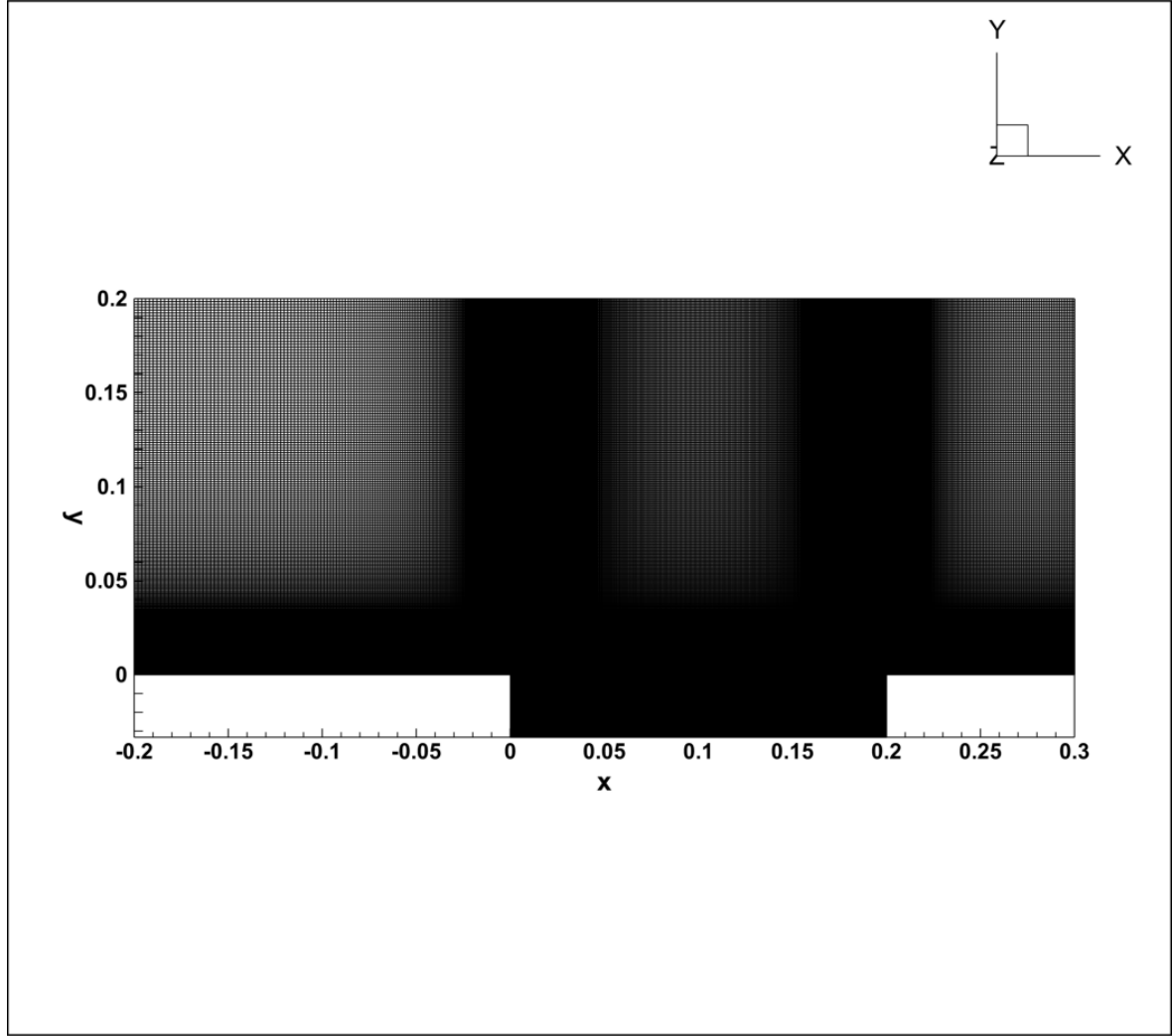
Ağ Yapısı	Kavite Bölgesi Hücre Sayısı	Kavite Bölgesi Dışı Hücre Sayısı	İlk Hücre Yüksekliği	Hücre Büyüme Oranı	Boy/En Oranı (Kavite Bölgesi Dışı)	Boy/En Oranı (Kavite Bölgesi)	y+ (ortalama)
1	14751	43028	5×10^{-5}	1,1	100	77,8	5,12
2	24676	66603	5×10^{-5}	1,1	100	54,82	4,97
3	54526	118803	2×10^{-5}	1,1	101,361	98,18	3,94
4	99301	283153	1×10^{-5}	1,1	91,981	84,5	1,06
5	223951	517503	1×10^{-5}	1,1	99,859	100	0,89

Sayısal ağdan bağımsızlaştırma çalışmaları için oluşturulan ağ yapılarının en az yoğun olduğu yapı; Ağ Yapısı 1 olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.17’de Ağ Yapısı 1’in hücre dağılımı gösterilmiştir.



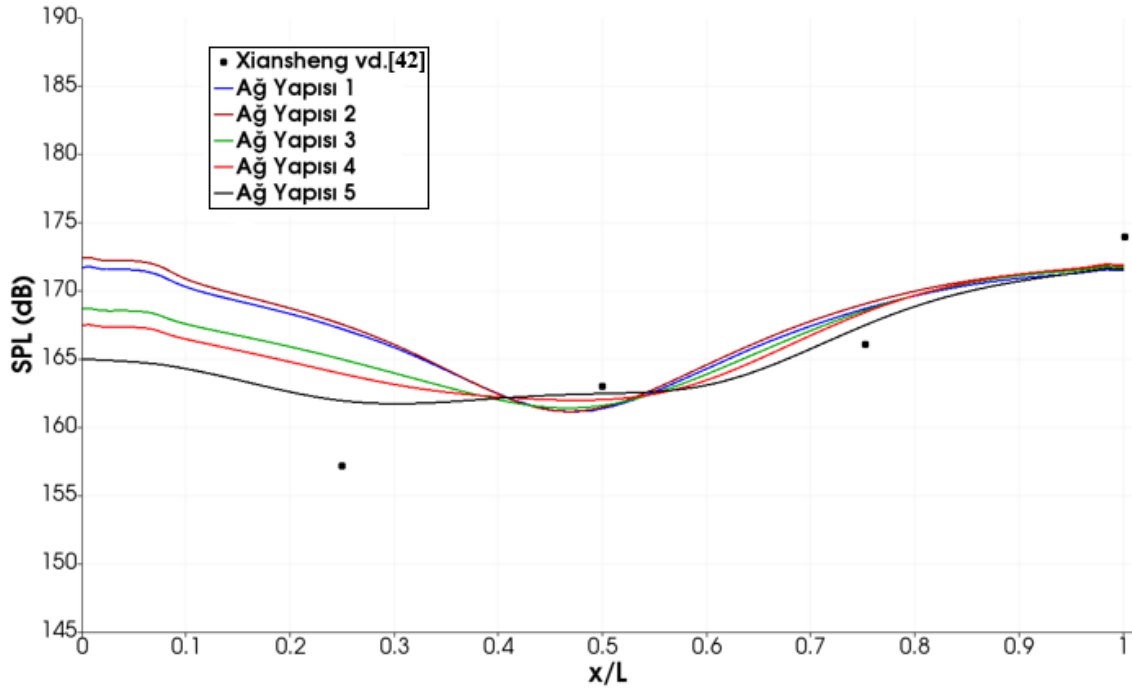
Şekil 5.17. Ağ yapısı 1

Sayısal ağdan çözüm sonuçlarını bağımsızlaştırmak için ağ yapılarının hücre sıklıklarının artırılması gerekmektedir. Böylece daha sık yapılar kullanılarak çözümler yapılmalı, çözümlerin belirli derecelerde değişmediği sonuçlar ile model doğrulaması yapılabilmektedir. Bu kapsamda oluşturulan en sık ağ yapısı, Ağ Yapısı 5 olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.18’de Ağ Yapısı 5’in hücre dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 5.18. Ağ yapısı 5

Gerçekleştirilen sayısal çalışmalar sonucunda kavite bölgesinin alt duvarındaki ses basınç seviyeleri hesaplanmıştır. Bir önceki doğrulama çalışmasında olduğu gibi hesaplamalar yapılırken kullanılan zamana bağlı çalkantılı basınç değerleri; akışın sayısal etkilerden arındığı bölgede alınan değerlerdir. Sayısal çalışmalar sonucunda elde edilen ses basınç seviyeleri kavite alt duvarı boyutsuzlaştırılarak Xiansheng vd. [42]'nin deneysel çalışması ile kıyaslanmıştır. Şekil 5.19'da tüm ağ yapıları ve referans deneysel çalışmanın alt duvar konumuna göre ses basınç seviyeleri cinsinden karşılaştırılması sunulmuştur.



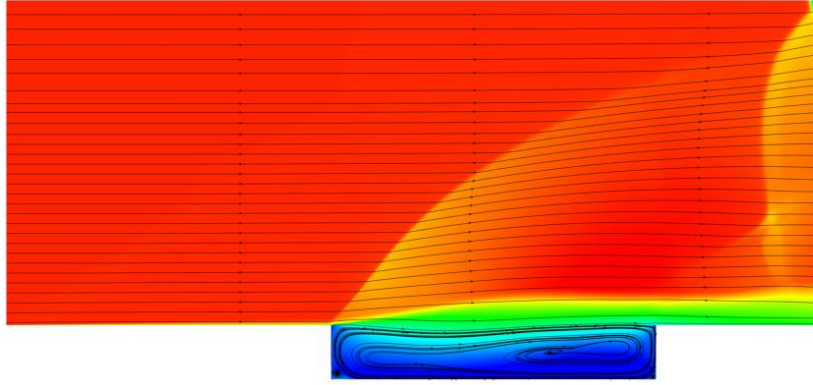
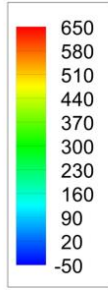
Şekil 5.19. Ağ yapılarının kavite alt duvarı için ses basınç seviyeleri cinsinden karşılaştırılması

Yapılan çalışmalarda referans deneysel çalışma ile en iyi örtüşen sayısal çalışma Ağ yapısı 5 olmuştur. Tüm ağ yapısı çalışmalarında kavite tabanındaki $x/L = 0,49$ $x/L=0,75$ ve $x/L=0,99$ konumlarında ses basınç seviyelerindeki değerler %3'ten daha az bir oranla deneyle uyushmaktadır. $x/L = 0,24$ konumu için ağ yapılarındaki ses basınç seviyeleri değerleri deney sonucundan bir miktar sapmaktadır. Bunun sebebi olarak akıştaki üç boyutlu etkilerin ihmal edilmesi gösterilebilir. Ağ yapısı 5 için $x/L = 0,24$ konumunda ses basınç seviyelerinde deney ile olan fark % 5'tir.

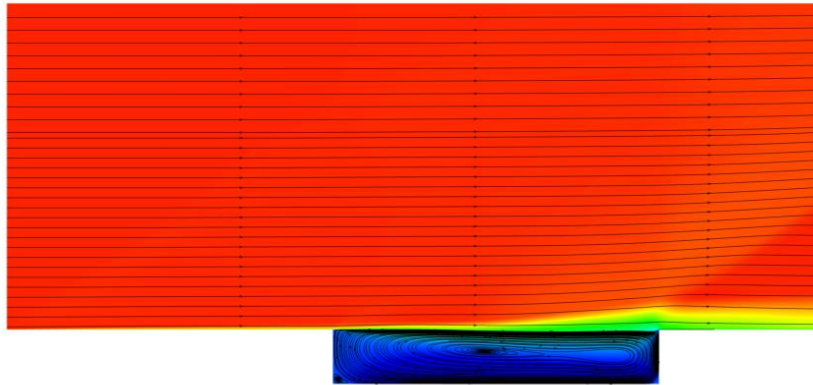
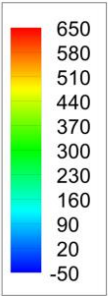
Ağ yapısı 5 için Şekil 5.20'de zamana bağlı x yönündeki vektörel hız dağılımları incelendiğinde kavite içerisinde oluşan girdap yapılarına rastlanmaktadır. Açık kavite akışını domine eden bir adet büyük ve bir adet ufak girdap yapısı kendini sürekli tekrar etmektedir.

Kavite bölgesi arka duvar çıkışında oluşan zayıf eğik şok oluşumu kendini belli etmektedir. Zamana bağlı olarak kavite bölgesi içerisinde ve dışarısında oluşan kesme tabakasının kararsız yapısı gözlemlenmiştir.

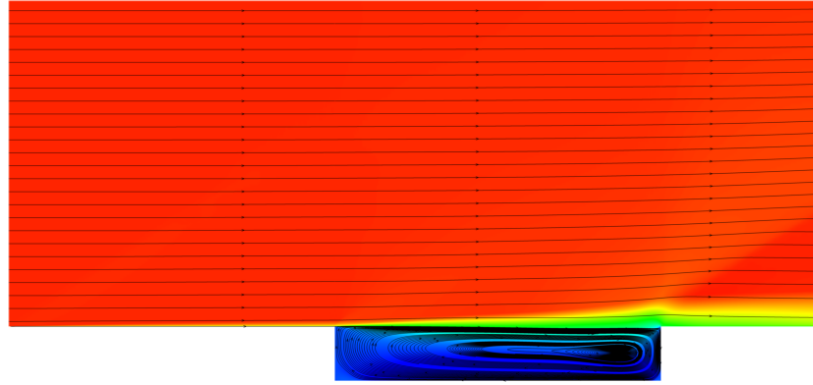
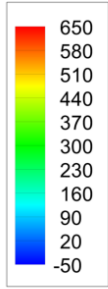
$t = 0.002$



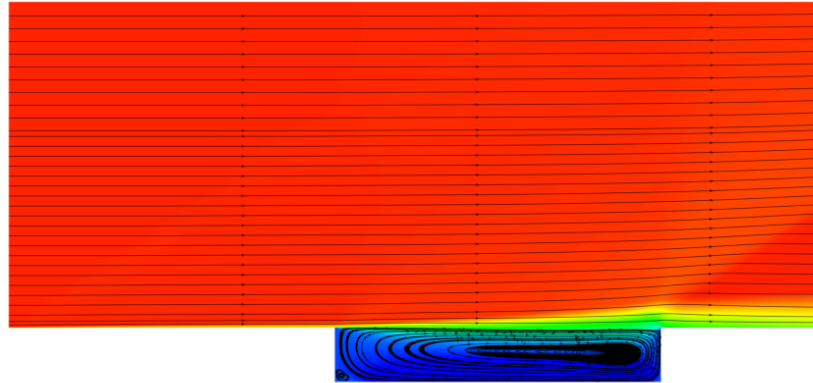
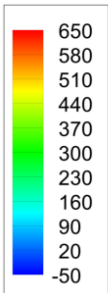
$t = 0.004$



$t = 0.006$



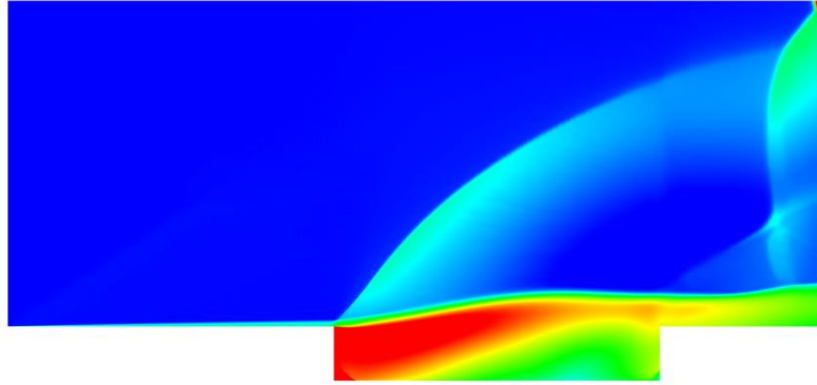
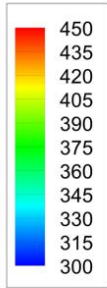
$t = 0.008$



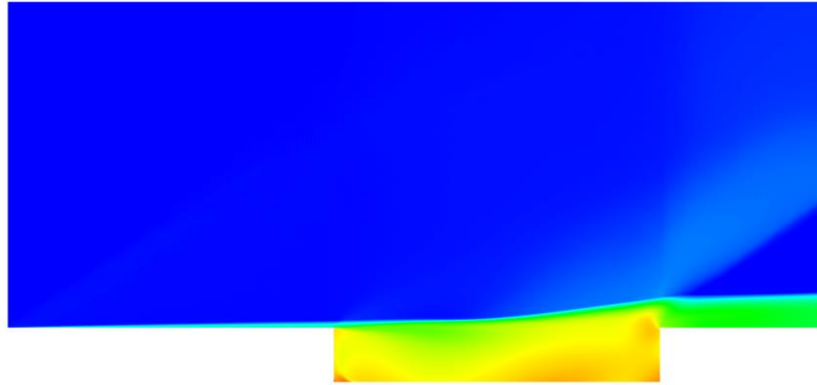
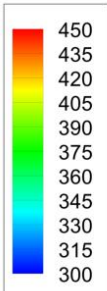
Şekil 5.20. Ağ Yapısı 5 için zamana bağlı x yönündeki vektörel hız dağılımları

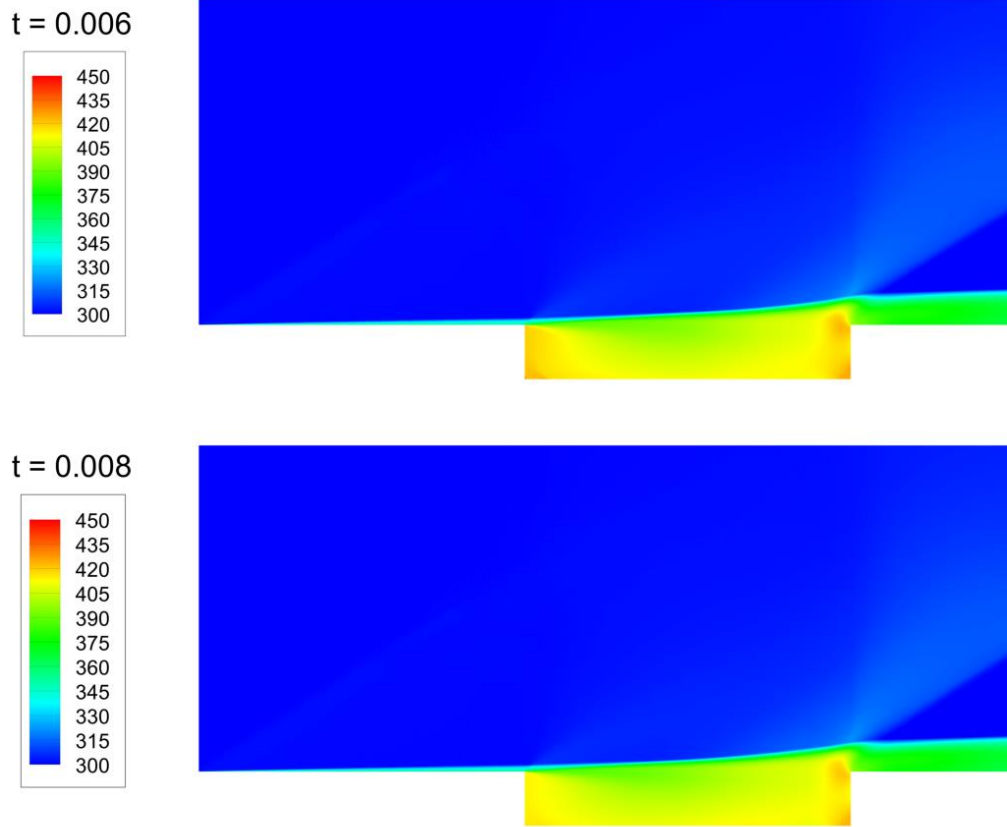
Ağ yapısı 5 için Şekil 5.21’de zamana bağlı sıcaklık konturları gösterilmiştir. Kavite bölgesi duvarlarındaki sıcaklık serbest akış bölgesine göre daha fazladır. Kavite arka duvar çıkışında oluşan eğik şok yapısı net bir şekilde belirgindir. Eğik şok yapısı oluşuktan sonra sıcaklığın bariz bir şekilde azalması şok oluşumunu doğrular niteliktedir. Ek olarak kavite girişinde ayrılan serbest akışın oluşturduğu zayıf şok oluşumu görülmüştür.

t = 0.002



t = 0.004

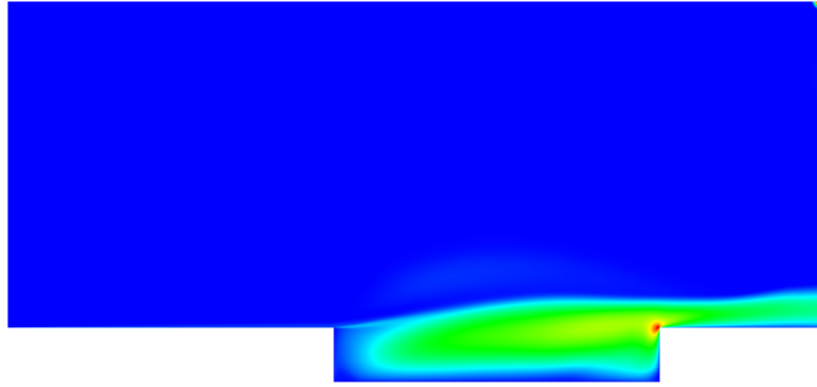
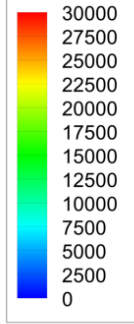




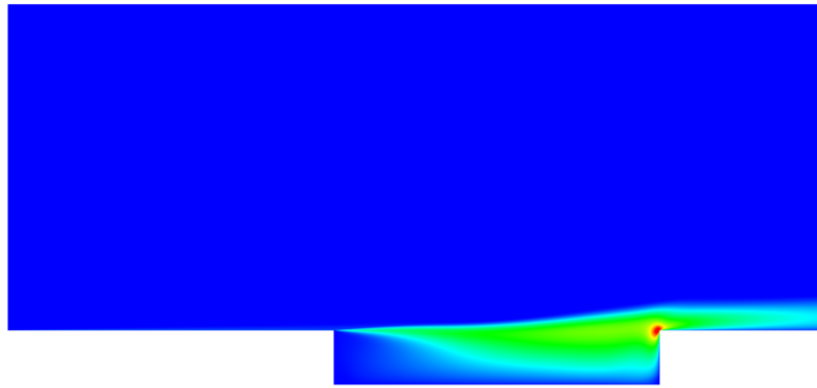
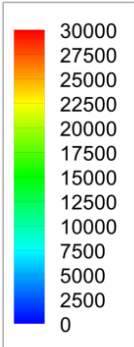
Şekil 5.21. Ağ yapısı 5 için zamana bağlı sıcaklık konturları

Ağ yapısı 5 için Şekil 5.22’de zamana bağlı türbülans kinetik enerji dağılımı incelendiğinde kavite arka duvarında türbülanslı kinetik enerji yoğunluğunun en fazla olduğu görülmektedir. Özellikle kavite arka duvarının üst köşesinde yoğunluk en fazladır. Bu bölge kesme tabakasının kavite arka duvarına ilk çarptığı yer olduğu için bu yoğunluğun fazla olması doğaldır. Çalkantılı yapıların bu bölgede fazla olması gürültü seviyelerinin en fazla bu bölgede olduğunu göstermektedir.

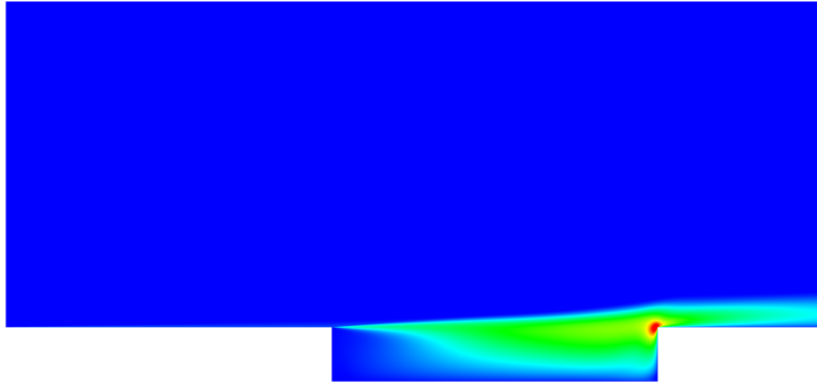
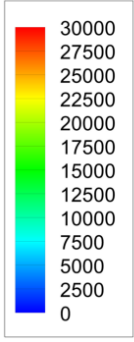
$t = 0.002$



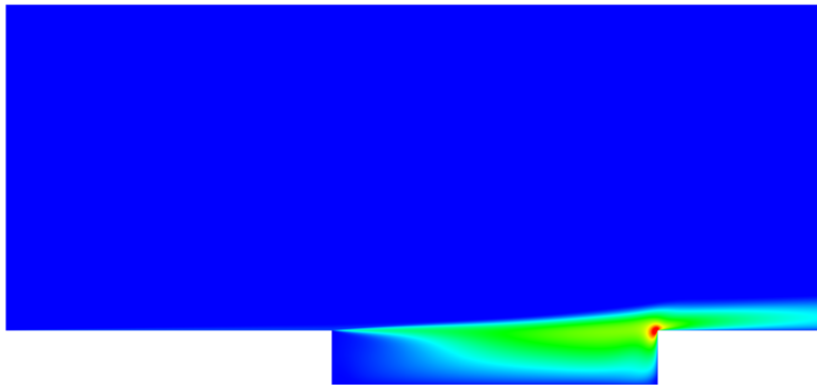
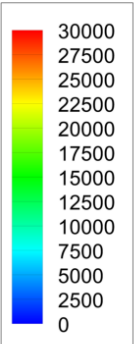
$t = 0.004$



$t = 0.006$



$t = 0.008$



Şekil 5.22. Ağ yapısı 5 zamana bağlı türbülans kinetik enerji dağılımı

5.2.2. HAD sonuçlarının ikincil deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

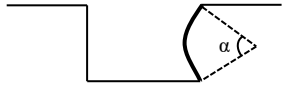
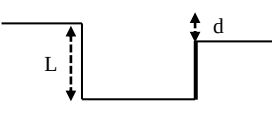
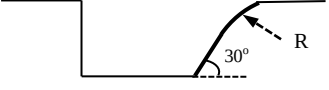
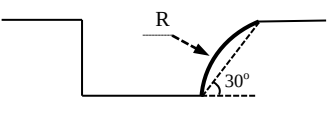
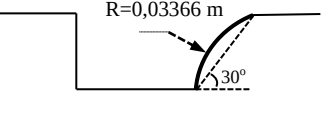
Gerçekleştirilen HAD simülasyonları sonucunda ikincil deneysel çalışma sonuçları kullanarak tez kapsamında kullanılacak HAD kodu ve yaklaşımları doğrulanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde 1,8 Mach rejimindeki süpersonik kavite akışında oluşan dominant girdap yapıları, bu girdap yapıları tarafından akışın kendi kendini besleyen geri besleme mekanizması görülmüştür. Akış görselleştirmeleri sonucunda incelenen vektörel hız dağılımları, sıcaklık ve türbülanslı kinetik enerji kontur dağılımları deneysel sonuçlar ile uyumludur. Kavite alt duvarında oluşan ses basınç seviyeleri ikincil deneysel çalışma sonuçları ile örtüşmektedir.

Bölüm 5'te ele alınan tüm doğrulama çalışmaları sonucunda parametrik çalışmalar için kullanılacak sayısal model ve yaklaşımlarının doğruluğu süpersonik kavite akışı için kanıtlanmıştır. Birinci validasyon çalışmasında kullanılan Kaufman ve Clark'ın [14] 1,5 Mach rejiminde dikdörtgen şeklindeki açık kavite modeli için tezin bundan sonraki kısmında parametrik çalışmalar yürütülecektir.

6. PARAMETRİK SAYISAL ÇALIŞMALAR

Literatürdeki deneysel çalışmalar kullanılarak tez kapsamında kullanılacak HAD kodu ve yaklaşımlarının doğrulanmasından sonra parametrik sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur. Bu kısımda OpenFOAM yazılımı ile gerçekleştirilen simülasyonların sonuçları gösterilmiştir. Farklı geometrik parametreler ve Mach sayıları göz önünde bulundurularak süpersonik kavite simülasyonları gerçekleştirilmiş olup, çıkan sonuçların kavite bölgesi duvarlarındaki ses basınç seviyelerine etkileri incelenmiştir. Çizelge 6.1’de çalışmada incelenen parametrik kavite modelleri ve arka duvarda değiştirilen parametreler gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Parametrik çalışma tablosu

Parametre Numarası	Model	İncelenen Parametre Değerleri
1		$\beta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$
2		$\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$
3		$d = 0.05L, 0.1L, 0.15L, 0.2L$
4		$R = 0.045 \text{ m}, 0.015 \text{ m}, 0.005 \text{ m}, 0.001 \text{ m}$
5		$R = 0.09196 \text{ m}, 0.0476 \text{ m}, 0.03366 \text{ m}$
6		Mach Sayısı = 1.4, 1.5, 1.6, 1.8

Tez kapsamında incelenen çalışmalardaki her bir parametre için elde edilen ses basınç seviyelerindeki değerler pasif kontrolsüz temel çalışmayı iyileştirebilmek için karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Çalışmalarda; enerji, kütle ve süreklilik denklemleri sağlanmış olup söz konusu değerler OpenFOAM yazılımının sonuç çıktılarından alınmıştır. Sonuç çıktılarından alınan değerler sonuçlar bölümünün altında gösterilmiştir.

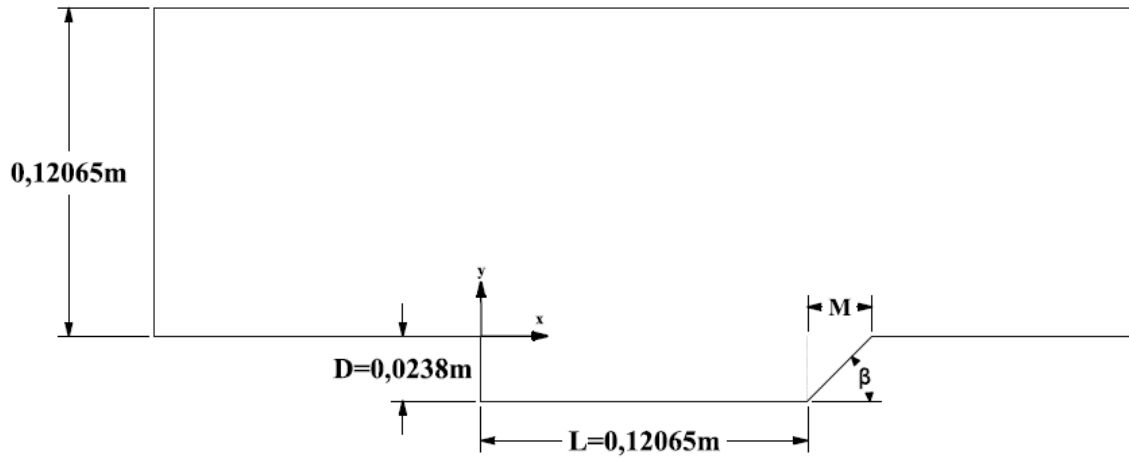
Parametrik çalışma kapsamında kavite bölgesinde akustik dalga oluşumuna ve gürültüye neden olan en etkili parametre olan arka duvar geometrisinin şekli değiştirilmiş olup, kavite arka duvar geometrisinin ses basınç seviyelerine etkileri incelenmiştir. Kavite arka duvar geometrisinin şekil değişiklikleri pasif kontrol yöntemleriyle gerçekleştirilmiş olup, kavite bölgesine dışarıdan herhangi bir müdahalede bulunulmamıştır. Bu şekil değişiklikleri temelde üç adet toplamda ise beş adet konu başlığı altında toplanabilir. Bunlar; kavite arka duvarına eğim verme çalışmaları, kavite arka duvarına eğrilik verme (hilal geometrisi) çalışmaları, kavite arka duvar boyunu kısaltma (offset verme) çalışmalarıdır. Temel parametrik çalışmalar yapıldıktan sonra, çalışmaların en iyi sonuç veren konfigürasyonu üzerine iki adet farklı parametrik çalışma yürütülmüştür. Tüm çalışmalar neticesinde belirlenen en iyi kavite konfigürasyonu için süpersonik rejimde farklı Mach rejimlerinde simülasyonlar yapılarak, Mach sayısının kavite akışına etkileri incelenmiş ve bunun daha sonraki çalışmalarda kullanılacak kavite geometrisi uygulamalarında yararlı hale getirilmesi planlanmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmalardaki akış koşulları Bölüm 5’de sunulan akış koşulları ve nihai olarak karar verilen sayısal çalışma modeli ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda kullanılmış olan ard işleme yöntemleri sonuçlar bölümünün altında paylaşılmıştır.

6.1. Kavite Arka Duvarına Eğim Verme Çalışmaları

Kavite arka duvarına eğim verme çalışmaları için uygulanan modelin şematik gösterimi Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Oluşturulan her bir eğim açısına uygun iki boyutlu kavite geometrileri oluşturulmuş olup, elde edilen ağ yapıları doğrulama çalışmalarında nihai olarak seçilen kontrolsüz temel ağ yapısının özellikleri korunarak oluşturulmuştur.

Oluşturulan modellerde kavite eğim oranı (E) boyutsuz sayısı tanımlanmış olup bu tanım kavite derinliğinin (D) kavite eğim uzunluğuna (M) oranı olarak gösterilmiştir. Kavite arka duvarına 30° 'lik açı verilen konfigürasyonun adı E30, 45° 'lik açı verilen konfigürasyonun adı E45, 60° 'lik açı verilen konfigürasyonun adı E60 ve 75° 'lik açı verilen konfigürasyonun adı E75 olarak tanımlanmıştır. Kavitenin karşılaştırma yapılan temel kontrolsüz çalışması ise TK olarak gösterilmiştir. Gelecek çalışmalarda boyutsuz E sayısı kullanılarak yeni kavite modelleri oluşturulup, kavite eğim oranının süpersonik kavite akışına etkisi incelenebilir.



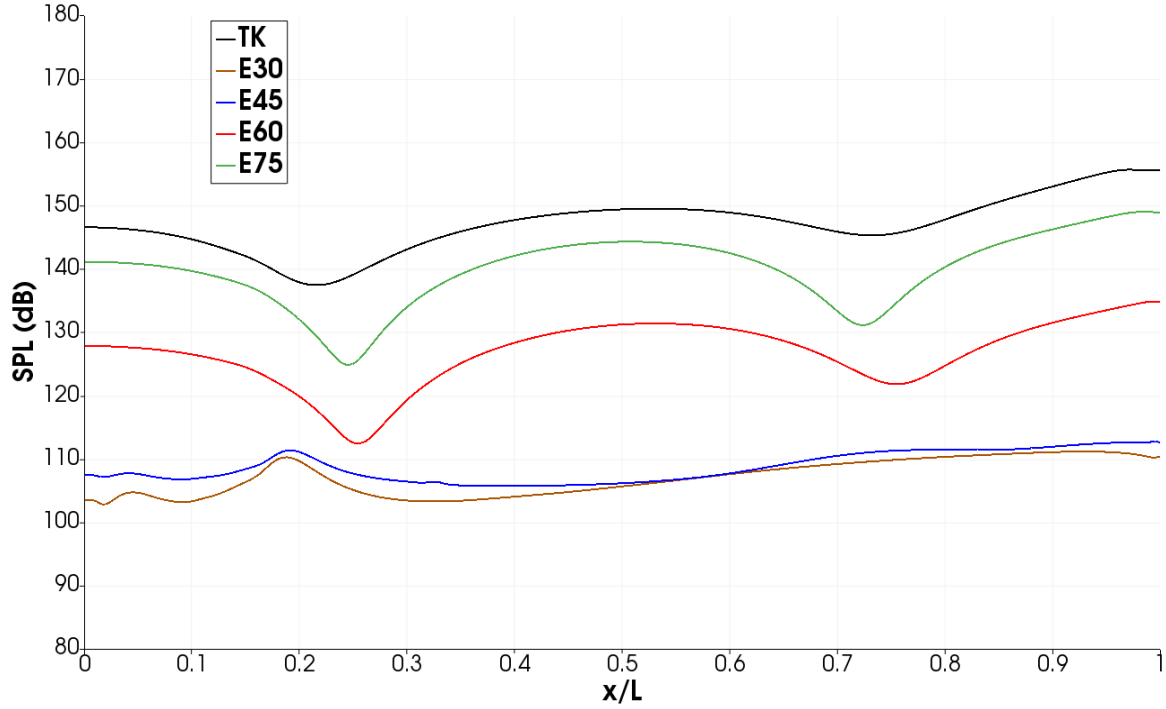
Şekil 6.1. Kavite arka duvar eğim çalışmalarının şematik gösterimi

Çizelge 6.2’de kavite arka duvar eğim açısı değiştirilen konfigürasyonların özellikleri sunulmuştur. Oluşturulan dört konfigürasyon için kavite arka duvarı eğim açısının kavite bölgesi duvarlarında oluşan ses basınç seviyelerine etkileri incelenmiştir. İnceleme yapılırken konfigürasyonların, kontrolsüz temel konfigürasyonla (TK) kıyaslaması ses basınç seviyeleri cinsinden yapılmıştır. Kontrolsüz temel çalışmanın kavite arka duvarı dik olduğu için kavite eğim açısı 90° olarak Çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. Kavite arka duvarına eğim verme çalışmaları konfigürasyon özellikleri

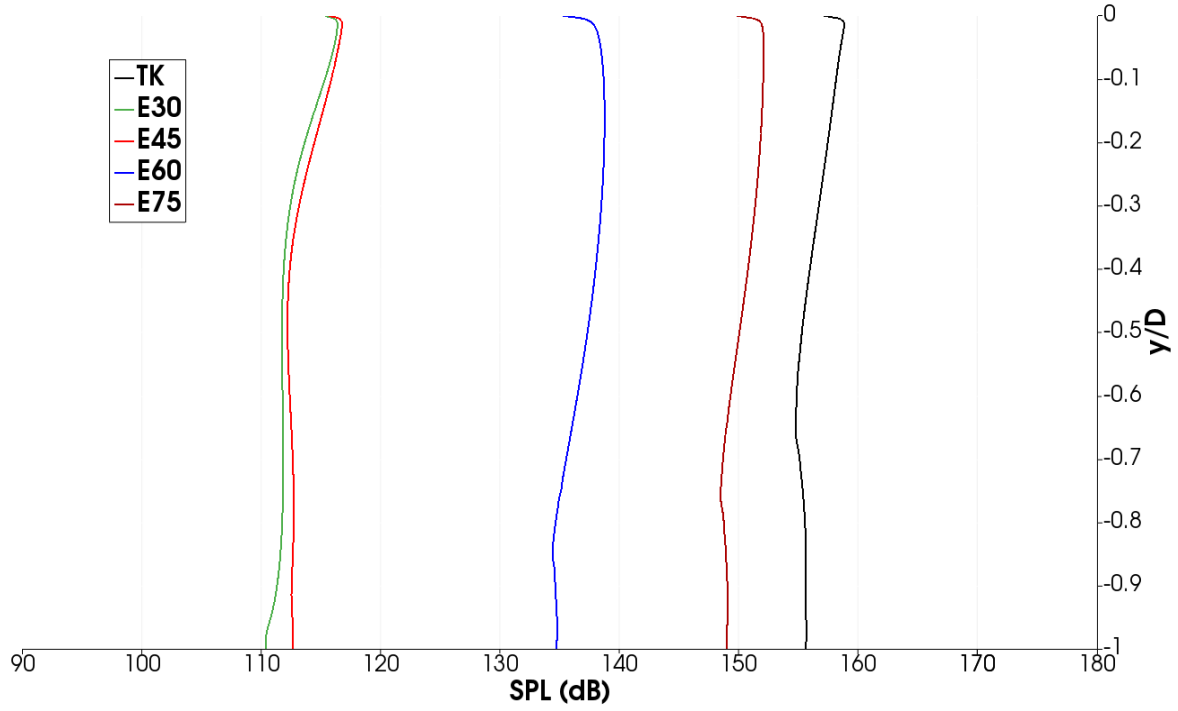
Konfigürasyon Numarası	Kavite Uzunluğu L (m)	Kavite Derinliği D (m)	Kavite Açısı β (°)	Kavite Eğim Uzunluğu M (m)	Kavite Eğim Oranı E=D/M	Konfigürasyon Adı
1	0,12065	0,0238	30	0,04122	0,58	E30
2	0,12065	0,0238	45	0,0238	1	E45
3	0,12065	0,0238	60	0,01374	1,73	E60
4	0,12065	0,0238	75	0,00638	3,73	E75
5	0,12065	0,0238	90	-	-	TK

Şekil 6.2’de kavite arka duvarına eğim verme çalışmaları sonucunda; kavite alt duvarında oluşan ses basınç seviyelerinin alt duvar konumuna göre dağılımı sunulmuştur. Kavite alt duvar konumu boyutsuzlaştırılarak Şekil 6.2’de çizdirilmiştir. Kavite arka duvarının eğim açısı azaldıkça alt duvar boyunca gözlemlenen ses basınç seviyelerinde düşüş görülmüştür. Kontrolsüz çalışma (TK) ile E75 ve E60 konfigürasyonlarının ses basınç seviyelerindeki dağılım benzer şekildedir. Fakat E45 ve E30 konfigürasyonlarındaki davranış bu üç konfigürasyondan farklıdır. Bunun nedeninin eğim açısı azaldıkça kavite boyunun uzaması; doğal olarak kesme tabakasının daha uzun bir zamanda arka duvar üst köşesine ulaşması ve akışın açık kavite özelliklerinden bir miktar sapabildiği yorumu yapılabilir. Gerçekleştirilen tüm kontrol çalışmalarında kontrolsüz duruma göre ses basınç seviyelerinde alt duvar için iyileştirmeler sağlanmıştır. Ses basınç seviyelerinin en düşük olarak gözlemlendiği konfigürasyon kavite arka duvarına 30°’lik açı verilen E30 konfigürasyonu olmuştur.



Şekil 6.2. Kavite arka duvarına eğim verme çalışmalarının alt duvar konumuna göre SPL grafiği

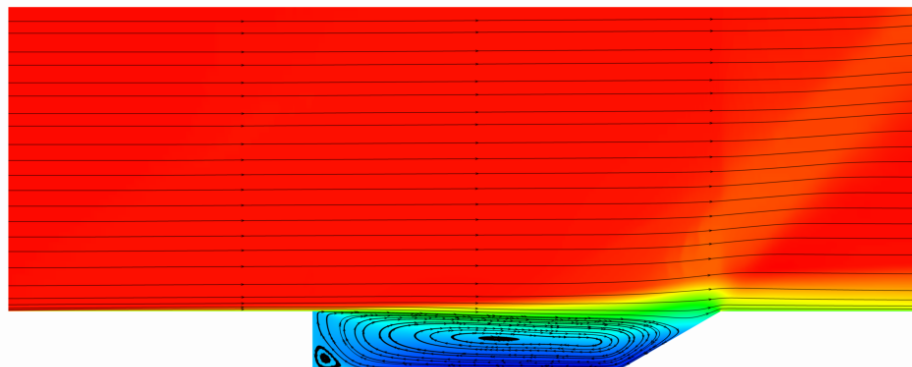
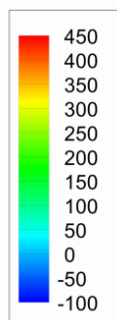
Şekil 6.3.'de kavite arka duvarı eğme çalışmaları sonucunda; kavite arka duvarında oluşan ses basınç seviyelerinin arka duvar konumuna göre dağılımları sunulmuştur. Kavite arka duvar konumu boyutsuzlaştırılarak Şekil 6.3'de çizdirilmiştir. Kavite arka duvarının eğim açısı azaldıkça kavite alt duvarında olduğu gibi kavite arka duvarındaki ses basınç seviyelerinde de azalmalar görülmüştür. Bunun sebebi olarak kesme tabakasının kavite arka duvarına kontrolsüz durumla kıyaslanarak dik olarak çarpmak yerine açılı olarak çarpması yorumu yapılabilir. Böylece kavite arka duvarında oluşan ses basınç seviyelerinde iyileştirmeler gerçekleştirilmiş olunur. Gerçekleştirilen tüm kontrol çalışmalarında kontrolsüz duruma göre kavite alt duvarındaki gürültü seviyeleri azalmıştır. Yine kavite alt duvar dağılımına benzer bir şekilde ses basınç seviyelerindeki en fazla düşüş kavite arka duvarına 30°'lik açı verilen E30 konfigürasyonunda gözlemlenmiştir. Ek olarak arka duvar E30 ve E45 konfigürasyonlarında elde edilen ses basınç seviye değerleri birbirlerine çok yakındır.



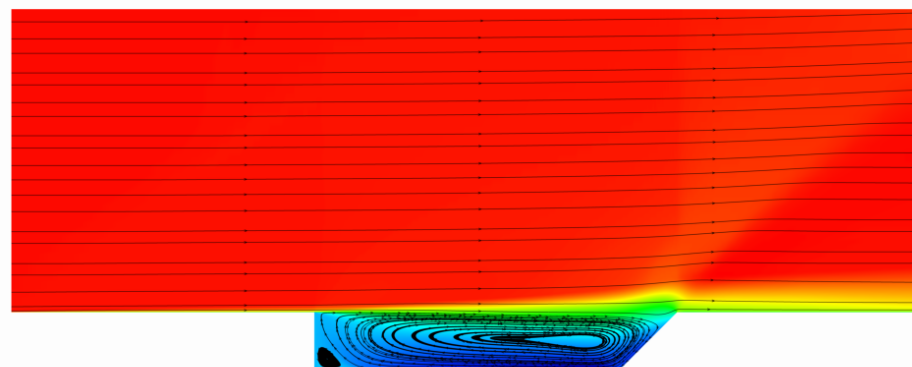
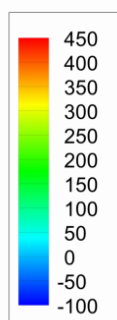
Şekil 6.3. Kavite arka duvarına eğim verme çalışmalarının arka duvar konumuna göre SPL grafiği

Şekil 6.4'de kavite arka duvarının farklı eğim açılarında x yönündeki vektörel hız dağılımları gösterilmiştir. Kavite arka duvar eğim açısı azaldıkça oluşan kesme tabakasının uzunluğu artmıştır. Ayrıca kavite arka duvar üst noktasında oluşan zayıf eğik şokun kalınlığı kavite arka duvar eğim açısı azaldıkça artmıştır. Kavite arka duvar kesme tabakası etkileşiminin kavite arka duvar eğim açısı azaldıkça daha yoğunlaştığı yorumu yapılabilir. Temel konfigürasyonda (TK) akışı domine eden büyük girdap yapısının içerisinde görülen iki büyük yapı kararsızlıklar ve düzensizlikler oluşturur. Kavite geometrisine eğim verilen parametrik çalışmalarda iki büyük yapının tek bir yapıya dönüştüğü görülmektedir. Kavite içerisindeki tek ve bütün halindeki dominant yapının kaviteyi daha düzenli hale getirdiği ve basınç dalgalanmalarının azalttığı yorumu ses basınç seviyeleri grafiğindeki iyileşmeler ile tutarlıdır.

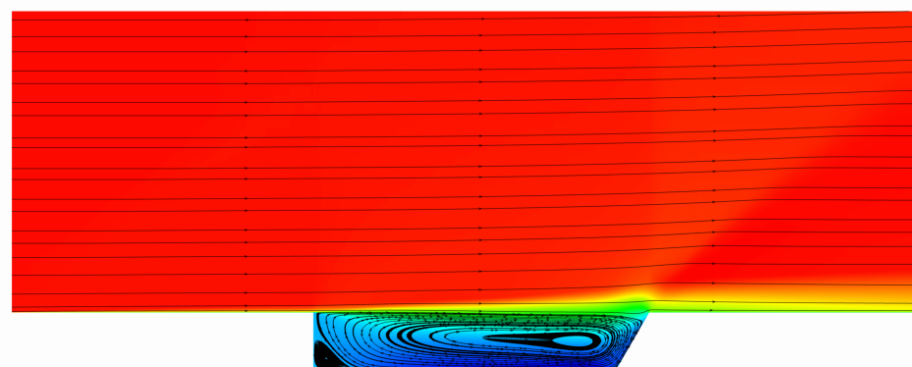
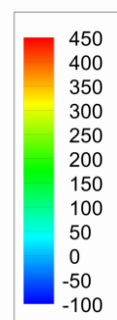
E30



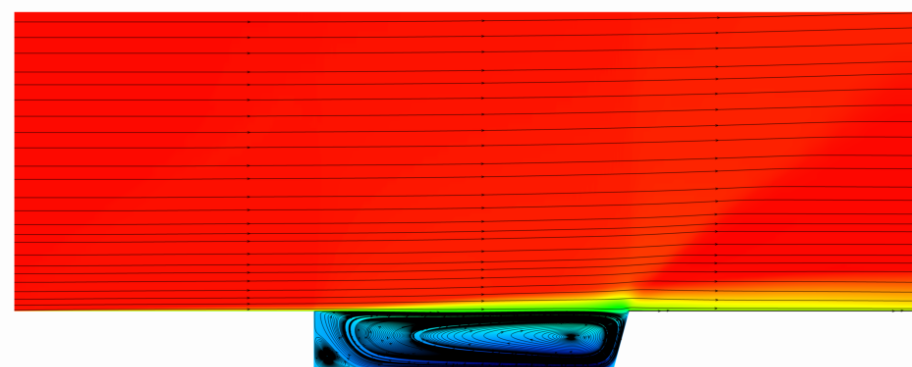
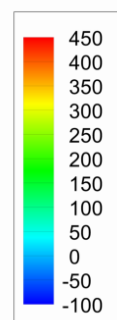
E45

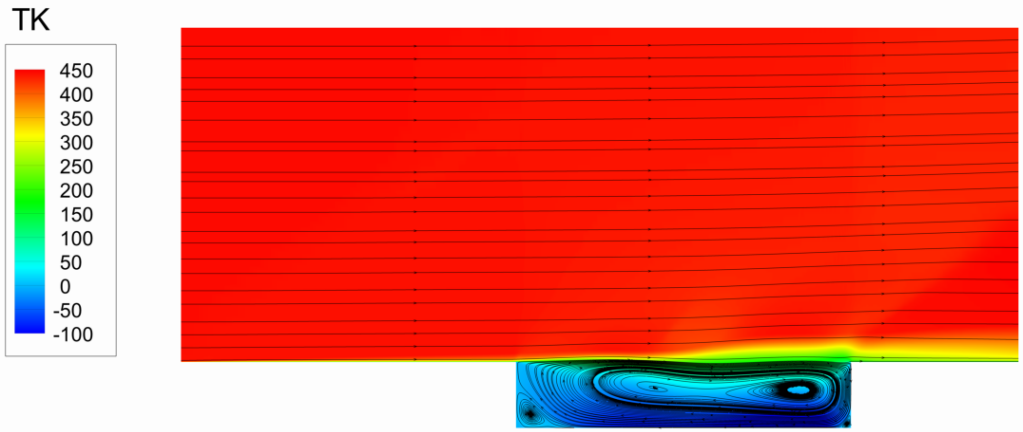


E60



E75

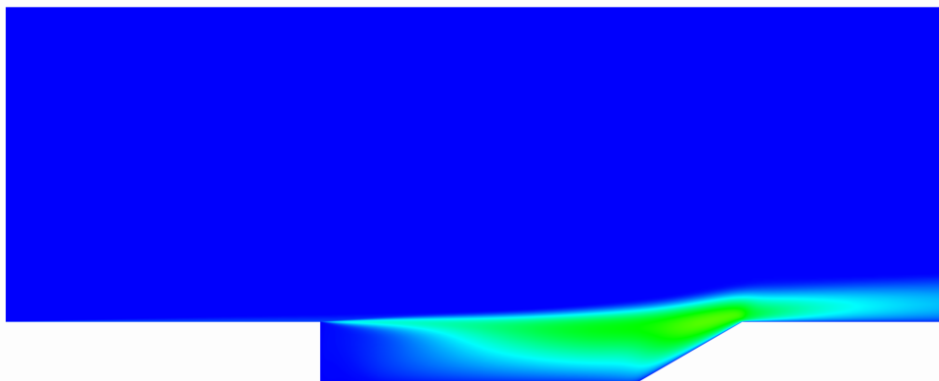
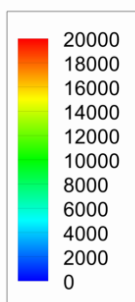




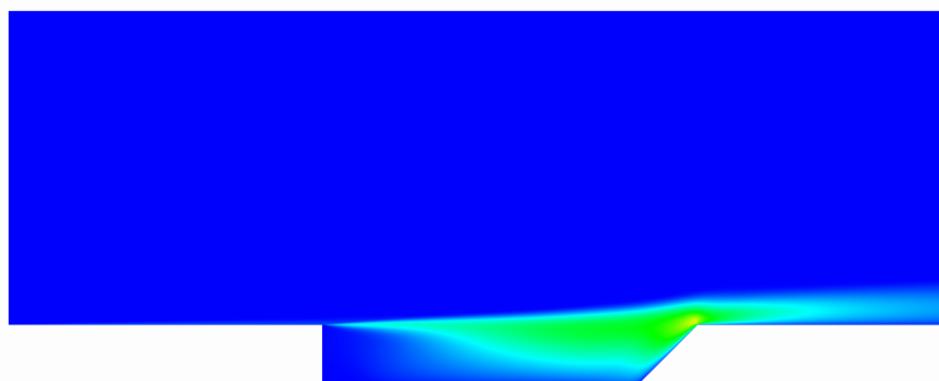
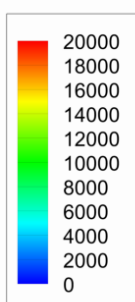
Şekil 6.4. Parametrik arka duvar eğim çalışmaları için x yönündeki vektörel hız dağılımları

Şekil 6.5’de kavite arka duvarının farklı eğim açılarındaki türbülans kinetik enerji konturları gösterilmiştir. Türbülans kinetik enerjinin salınım terimlerindeki artış veya azalış ses basınç seviyelerini etkileyen en önemli parametrelerdendir. 30°’lik açı verilen E30 konfigürasyonunda diğer konfigürasyonlarla kıyaslanarak yoğunluğu en az türbülans kinetik enerji dağılımı gözlemlenebilir. Bunun sonucu olarak hem kavite arka duvarı hem de kavite alt duvarı için ses basınç seviyelerindeki değerlerin düşük olması, elde edilen grafikleri doğrular niteliktedir.

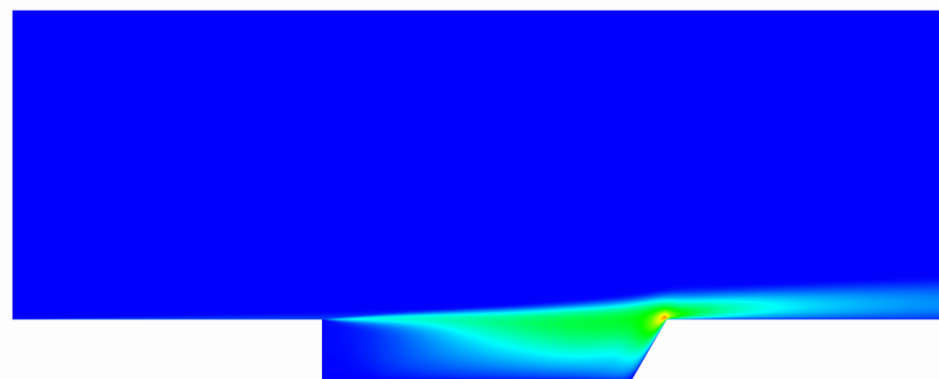
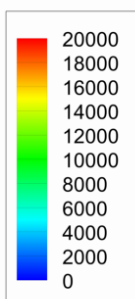
E30



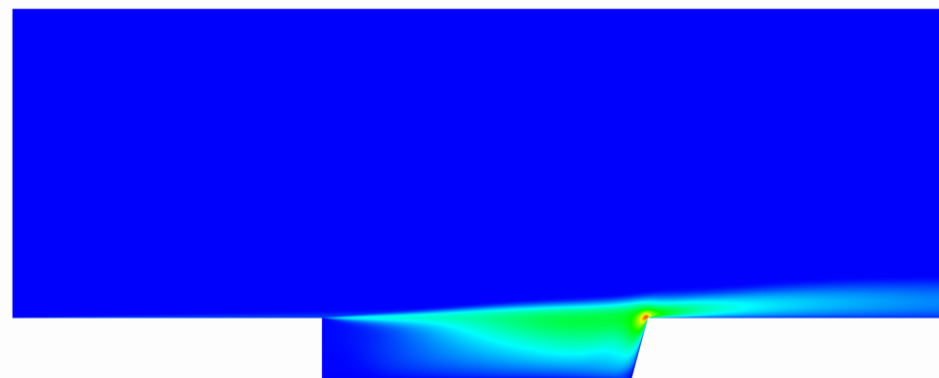
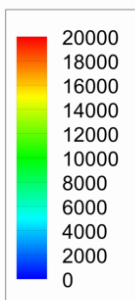
E45



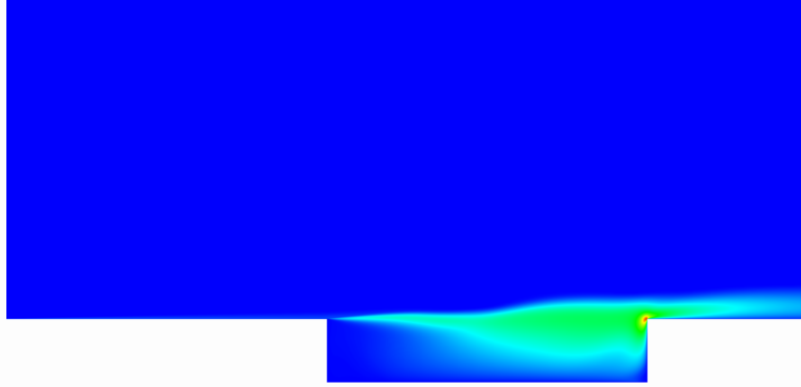
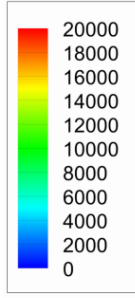
E60



E75

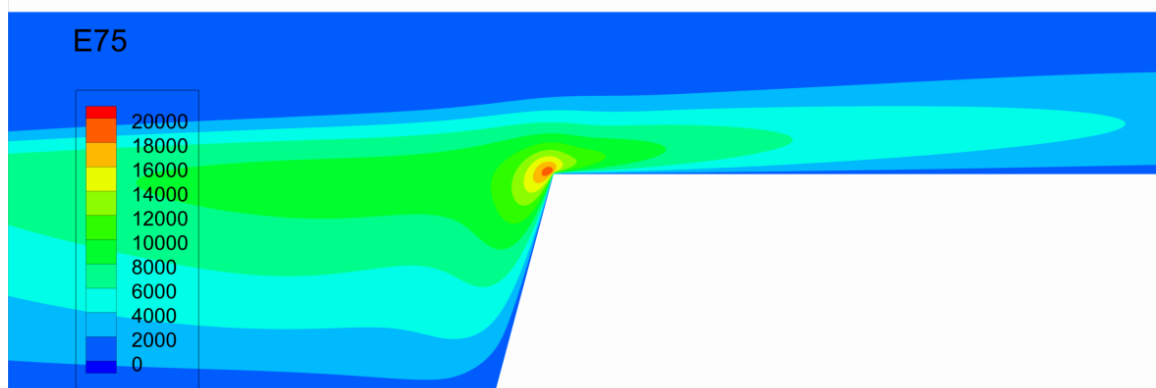
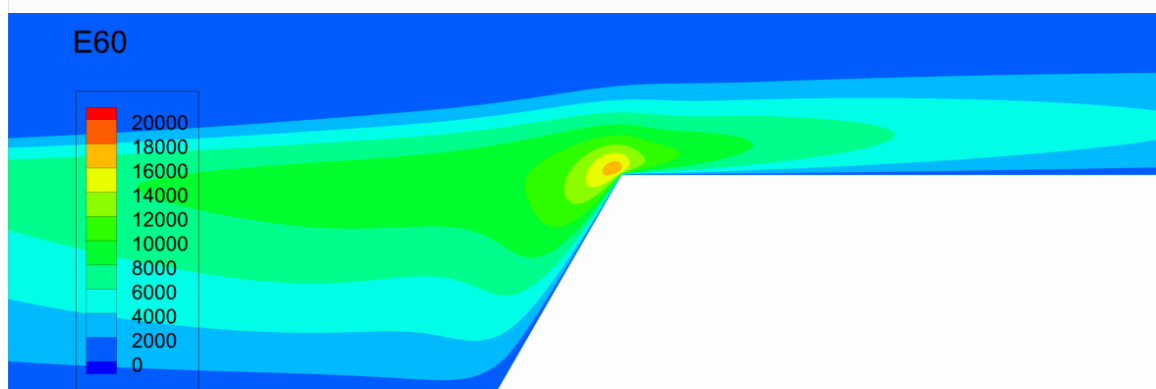
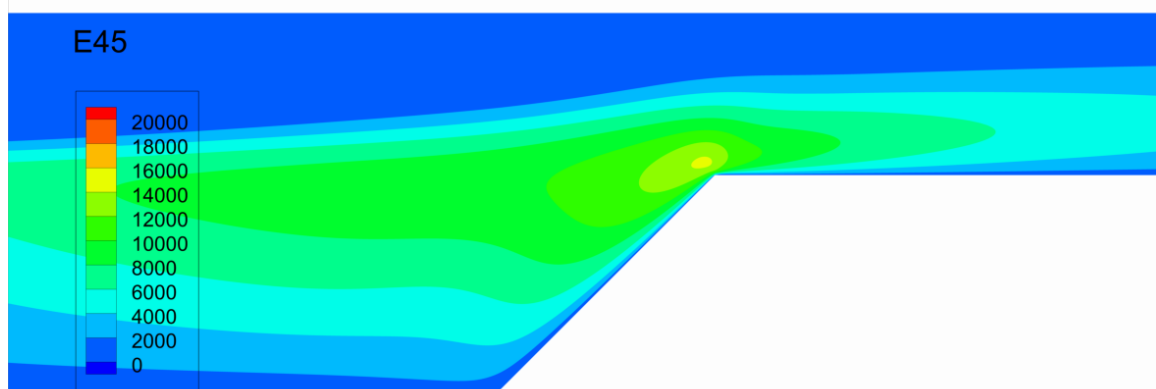
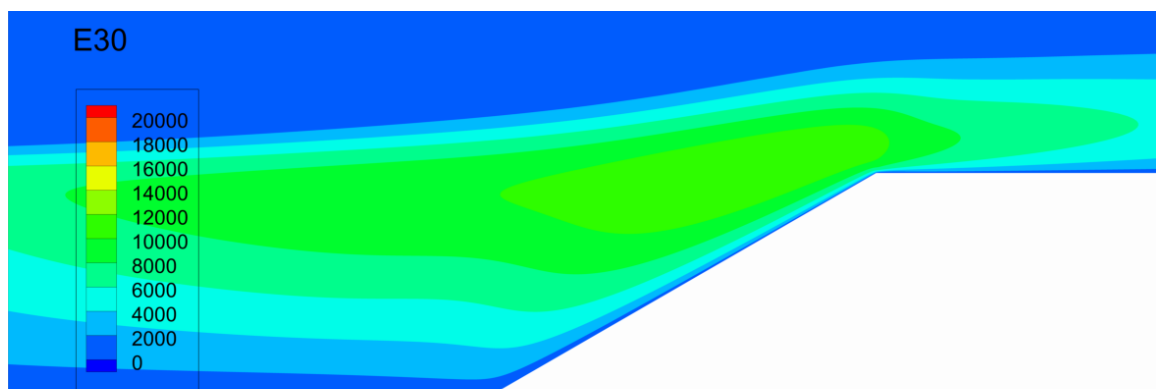


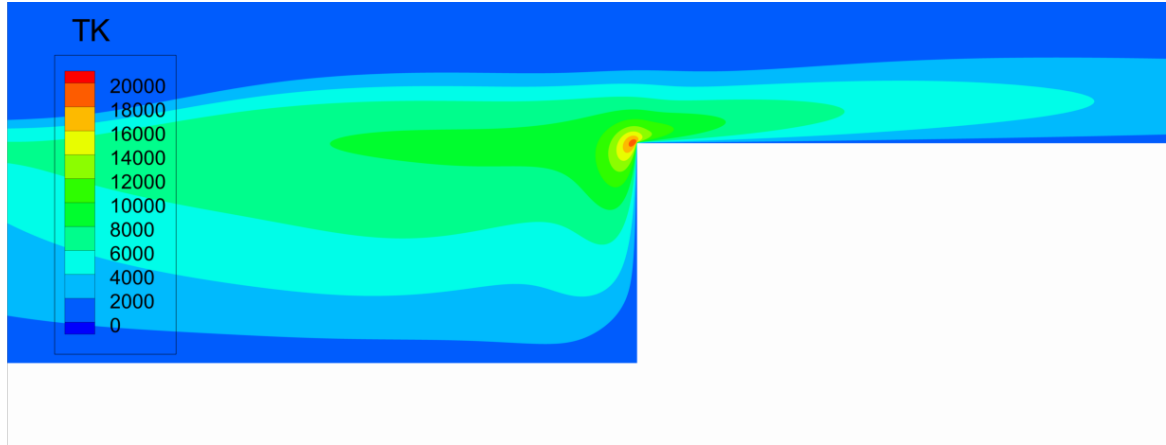
TK



Şekil 6.5. Parametrik arka duvar eğim çalışmaları için türbülans kinetik enerji konturları

Şekil 6.6'da kavite arka duvarının farklı eğim açılarındaki türbülans kinetik enerji konturları arka duvara yakınlaştırılarak gösterilmiştir. Kesme tabakasının ilk olarak çarpmış olduğu kritik bölge arka duvar üst köşesidir. Bu bölge için türbülans kinetik enerji dağılımları kavite arka duvarına verilen açı azaldıkça yani kavite arka duvarı daha çok eğildikçe azalmıştır. Kavite arka duvarının daha fazla eğilmesi kesme tabakasının arka duvara ulaşma zamanını artırarak enerjisinin bir miktar azalmasına yol açtığı yorumu yapılabilir.





Şekil 6.6. Parametrik arka duvar eğim çalışmaları için arka duvarda oluşan türbülans kinetik enerji konturları

Gerçekleştirilen parametrik kavite arka duvarını eğme çalışmaları sonucunda ses basınç seviyelerinde düşüş sağlayan en iyi konfigürasyon E30 konfigürasyonu olmuştur. Bu konfigürasyonun kontrolsüz temel konfigürasyon (TK) ile alt duvar konumu için belirli x/L değerlerinde ses basınç seviyeleri cinsinden kıyaslaması Çizelge 6.3’de gösterilmiştir. Kavite tabanı boyunca temel konfigürasyona göre ortalama 39,81 dB düşüş sağlanmıştır. Bu düşüş temel konfigürasyona göre % 26,91 oranında ses basınç seviyelerinde iyileşme anlamına gelmektedir.

Çizelge 6.3. Kavite arka duvar eğim çalışmaları sonucunda TK ile E30 konfigürasyonlarının kavite alt duvarı için SPL değerleri

Konfigürasyon Adı		Kavite Alt Duvar Konumu					
		$x/L = 0$	$x/L = 0,2$	$x/L = 0,4$	$x/L = 0,6$	$x/L = 0,8$	$x/L = 1$
TK		146,59	137,76	147,82	148,83	148,24	155,59
E30		103,54	109,42	104,22	107,85	110,47	110,49
	Fark	43,05	28,34	43,6	40,98	37,77	45,1
	Fark (%)	29,37	20,57	29,50	27,53	25,48	28,99

Çizelge 6.4’de kontrolsüz temel konfigürasyon (TK) ile E30 konfigürasyonunun arka duvar konumu için belirli y/D değerlerinde ses basınç seviyelerinde cinsinden karşılaştırılması gösterilmiştir. Kavite arka duvarına 30° ’lik eğim verilen E30 konfigürasyonunda kavite arka duvarı boyunca temel konfigürasyona göre ortalama ses basınç seviyelerinde 43,53 dB düşüş sağlanmıştır. Bu düşüş yaklaşık olarak % 27,9 oranında ses basınç seviyelerinde iyileşme sağlamıştır.

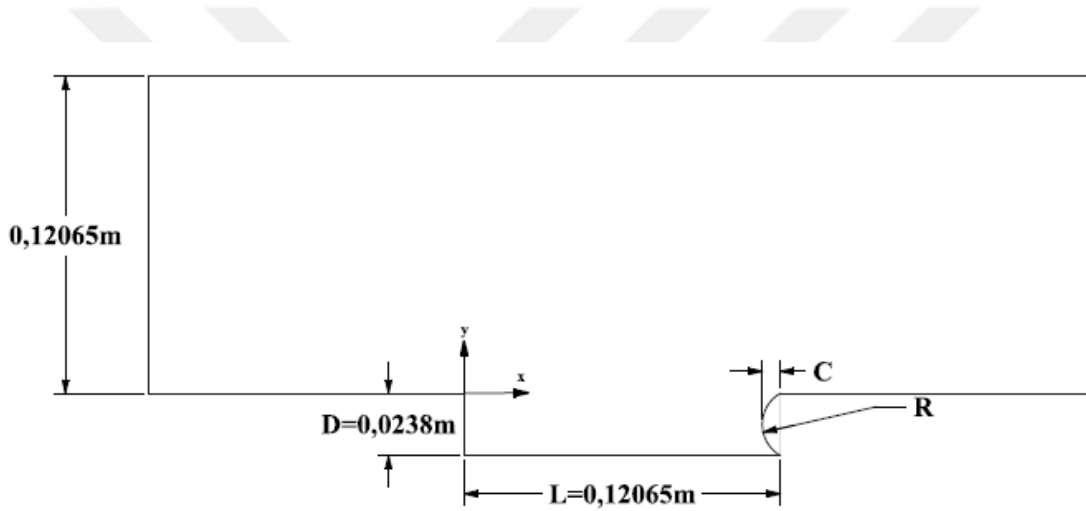
Çizelge 6.4. Kavite arka duvar eğim çalışmaları sonucunda TK ile E30 konfigürasyonlarının kavite arka duvarı için SPL değerleri

Konfigürasyon Adı		Kavite Arka Duvar Konumu					
		$y/D = 0$	$y/D = -0,2$	$y/D = -0,4$	$y/D = -0,6$	$y/D = -0,8$	$y/D = -1$
TK		157,09	157,39	155,88	154,80	155,50	155,59
E30		115,37	113,59	111,90	111,87	111,83	110,49
	Fark	41,72	43,8	43,98	42,93	43,67	45,1
	Fark (%)	26,56	27,83	28,21	27,73	28,08	28,99

6.2. Kavite Arka Duvarına Eğrilik Verme (Hilal Geometrisi) Çalışmaları

Kavite arka duvarına eğrilik verme çalışmaları üç nokta eğri oluşumu tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Kavite arka duvarının alt ve üst noktası sabit tutularak eğrinin oluşma açıları değiştirilmiştir. Meydana gelen üç nokta eğrisi hilal şekline benzediği için konfigürasyonun adına hilal geometrisi denilmiştir. Şekil 6.7’de oluşturulan modelin şematik gösterimi sunulmuştur. Oluşturulan her bir hilal geometrisine uygun iki boyutlu kavite geometrileri oluşturulmuş olup, elde edilen ağ yapıları doğrulama çalışmalarında nihai olarak seçilen kontrolsüz temel ağ yapısının özellikleri korunarak oluşturulmuştur.

Gerçekleştirilen modellerde kavite eğrilik oranı (K) boyutsuz sayısı tanımlanmış olup bu tanım kavite derinliğinin (D) kavite arka duvar eğrilik uzunluğuna (C) oranı olarak gösterilmiştir. Kavite arka duvarının 30° 'lik eğrilik oluşum açısı ile elde edilen konfigürasyonun adı C30, 45° 'lik eğrilik oluşum açısı ile elde edilen konfigürasyonun adı C45, 60° 'lik eğrilik oluşum açısı ile elde edilen konfigürasyonun adı C60, 75° 'lik eğrilik oluşum açısı ile elde edilen konfigürasyonun adı C75 ve 90° 'lik eğrilik oluşum açısı ile elde edilen konfigürasyonun adı C90 olarak çalışmada tanımlanmıştır. Kavitenin karşılaştırma yapılan temel kontrolsüz çalışması ise TK olarak gösterilmiştir. Gelecek çalışmalarda boyutsuz K sayısı kullanılarak yeni kavite modelleri oluşturulup, kavite arka duvar hilal geometrisi oluşum açılarının süpersonik kavite akışına etkisi incelenebilir.



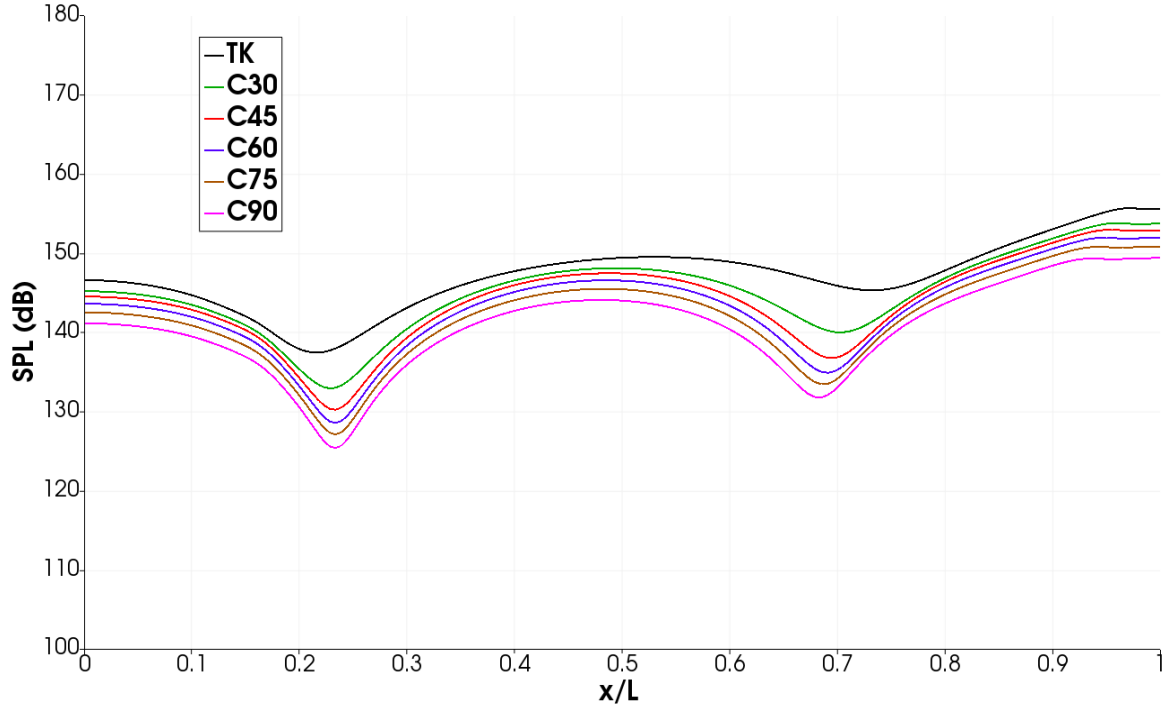
Şekil 6.7. Kavite arka duvarına eğrilik verme (hilal geometrisi) çalışmalarının şematik gösterimi

Çizelge 6.5’de kavite arka duvar hilal geometrisinin değişik konfigürasyonlardaki özellikleri sunulmuştur. Oluşturulan beş adet hilal şeklindeki konfigürasyon geometrisinin kavite bölgesi duvarlarında oluşturdıkları ses basınç seviyeleri incelenmiştir. İnceleme yapılırken kontrollü konfigürasyonların, kontrolsüz temel konfigürasyonla (TK) kıyaslaması ses basınç seviyeleri cinsinden sunulmuştur.

Çizelge 6.5. Kavite arka duvarına eğrilik verme (hilal geometrisi) konfigürasyon özellikleri

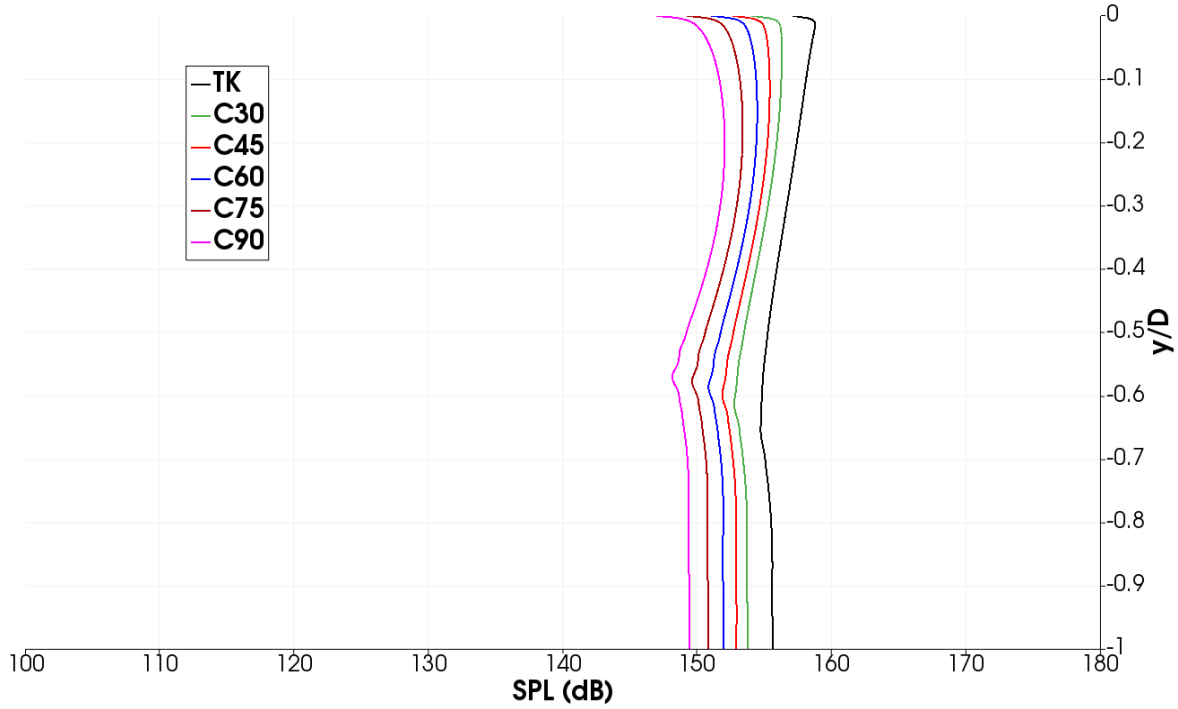
Konfig. Numarası	Kavite Uzunluğu	Kavite Derinliği	Kavite Arka Duvar Eğrilik Uzunluğu	Kavite Eğrilik Oluşum Yarıçapı	Kavite Eğrilik Oluşum Açısı	Kavite Eğrilik Oranı	Konfig. Adı
	L (m)	D (m)	C (m)	R (m)	(°)	K=D/C	
1	0,12065	0,0238	0,00157	0,04598	30	15,16	C30
2	0,12065	0,0238	0,00237	0,0311	45	10,04	C45
3	0,12065	0,0238	0,00319	0,0238	60	7,46	C60
4	0,12065	0,0238	0,00404	0,01955	75	5,89	C75
5	0,12065	0,0238	0,00493	0,01683	90	4,83	C90
6	0,12065	0,0238	-	-	-	-	TK

Şekil 6.8’de kavite arka duvar eğrilik çalışmalarında (hilal geometrisi) oluşan ses basınç seviyelerinin alt duvar konumuna göre dağılımı sunulmuştur. Kavite arka duvarının eğrilik oluşum açısı arttıkça alt duvar boyunca gözlemlenen ses basınç seviyelerinde düşüş görülmüştür. Oluşturulan tüm kontrollü modellerde, kontrolsüz modele göre ses basınç seviyelerinde düşüş gözlemlenmiştir. Ses basınç seviyelerinin en düşük olarak gözlemlendiği konfigürasyon kavite arka duvarı eğrilik oluşum açısının 90° olduğu C90 konfigürasyonu olmuştur.



Şekil 6.8. Kavite arka duvarına eğrilik verme (hilal geometrisi) çalışmalarının alt duvar konumuna göre SPL grafiği

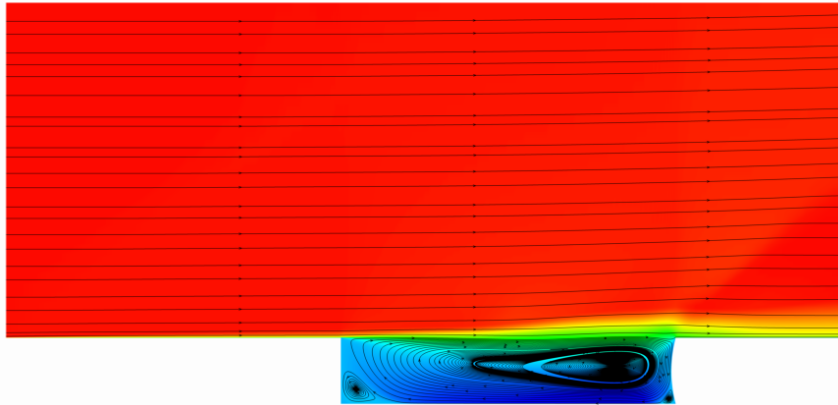
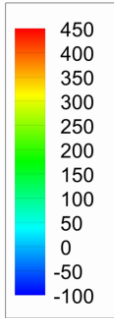
Şekil 6.9’da kavite arka duvarı eğrilik çalışmaları (hilal geometrisi) sonucunda kavite arka duvarında oluşan ses basınç seviyelerinin arka duvar konumuna göre dağılımları sunulmuştur. Kavite arka duvar konumu boyutsuzlaştırılarak Şekil 6.9’da çizdirilmiştir. Kavite arka duvarının eğim oluşum açısı arttıkça kavite arka duvarındaki ses basınç seviyelerinde azalmalar görülmüştür. Kavite alt duvar dağılımına benzer bir şekilde ses basınç seviyelerindeki en fazla düşüş kavite arka duvarı eğrilik oluşum açısı 90° olan C90 konfigürasyonunda gözlemlenmiştir.



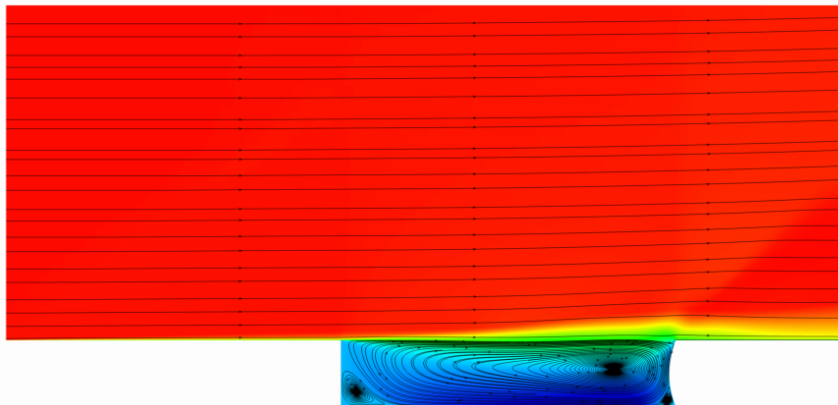
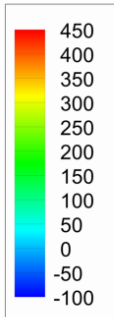
Şekil 6.9. Kavite arka duvar eğrilik verme (hilal geometrisi) çalışmalarının arka duvar konumuna göre SPL grafiği

Şekil 6.10'da kavite arka duvarının farklı hilal konfigürasyonlarında aynı zaman diliminde oluşan vektörel hız dağılımları gösterilmiştir. Kavite arka duvar eğrilik oluşum açısı arttıkça kavite bölgesinde oluşan tekli büyük yapı daha düzenli hale gelmiştir. Bunun sayesinde arka ve alt duvarda oluşan gürültü seviyeleri azalmıştır. Ayrıca kavite alt duvarı ile arka duvarının birleştiği bölgede meydana gelen küçük yapıdaki girdap daha belirgin hale gelmiştir. Bu girdabın daha belirgin şekilde olması dominant büyük yapının enerjisinin bir kısmını sönmüleyerek akıştaki osilasyonları azaltabilmiştir. Tüm arka duvar hilal geometri modellerinde kavite arka duvar üst köşesinden sonra kavite dışarısında zayıf şok oluşumu gözlemlenmiştir. Kavite bölgesi ile serbest akış bölgesi arasındaki bağlantıyı sağlayan ve gürültü oluşumundaki en önemli neden olan kesme tabakasının çalkantılı yapısı tüm kontrollü yapılarda gözlemlenmiştir. Ses basınç seviyelerinde en iyi iyileşmeyi sağlayan C90 konfigürasyonunda kavite bölgesi domine eden bir adet büyük yapı, bir adet kavite ön duvar altındaki küçük yapı ve kavite arka duvar alt köşesinde oluşan küçük yapı belirgin bir şekilde görülmektedir.

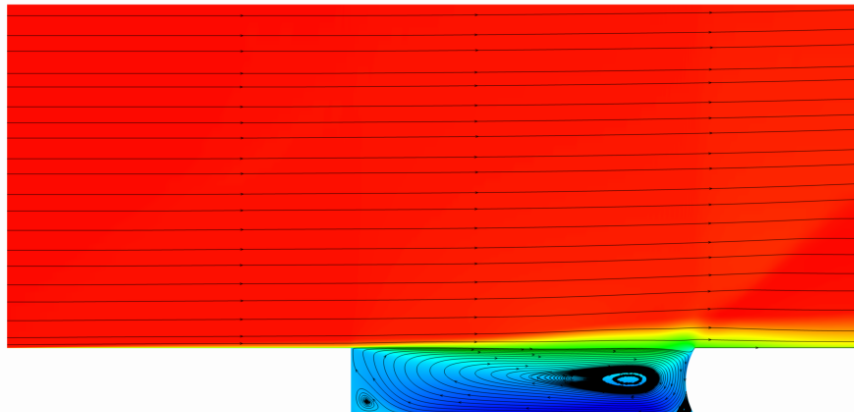
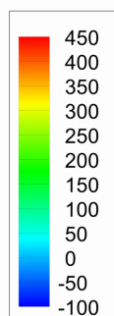
C30



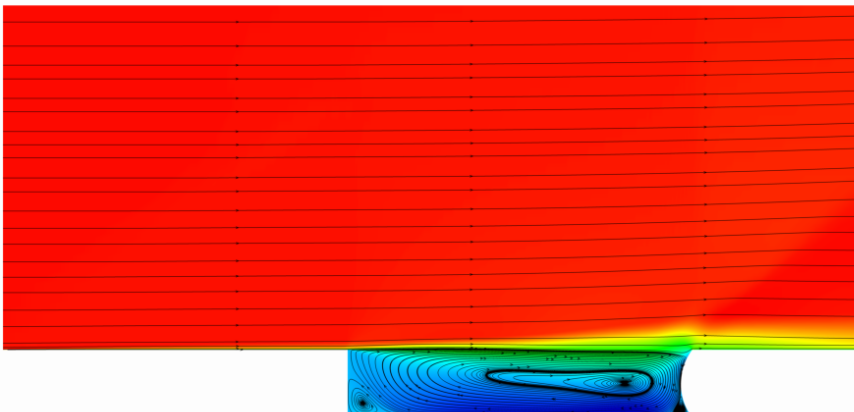
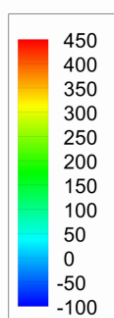
C45

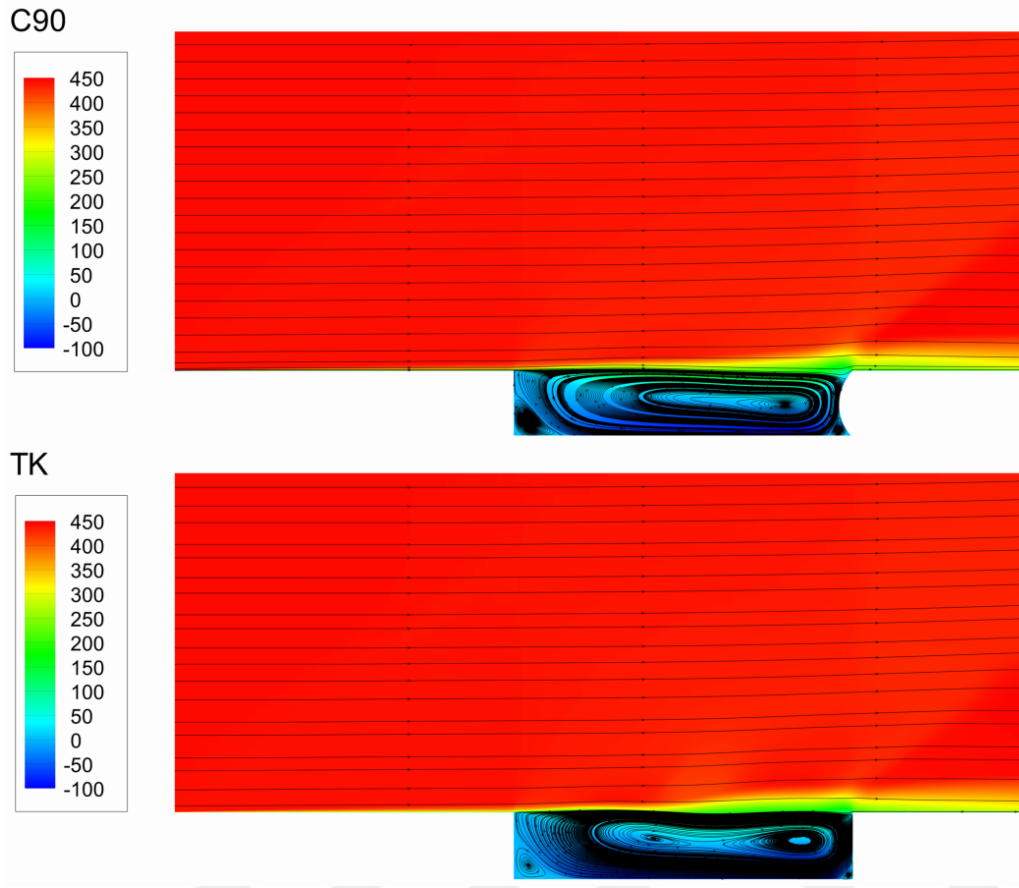


C60



C75

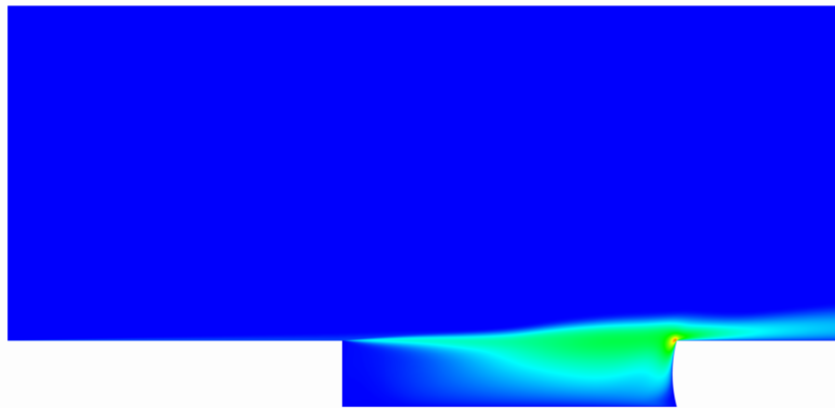
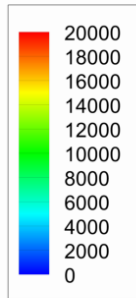




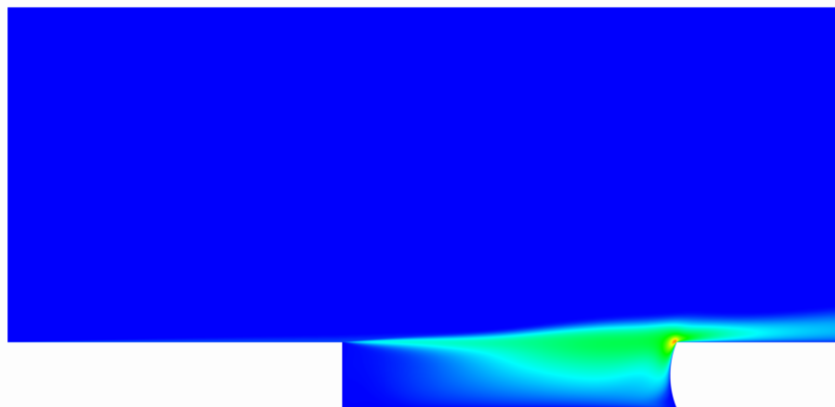
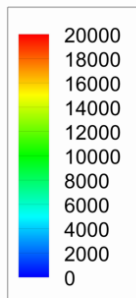
Şekil 6.10. Parametrik arka duvar hilal geometri çalışmaları için vektörel hız dağılımları

Şekil 6.11’de kavite arka duvarının farklı eğrilik oluşum açılarındaki aynı zaman diliminde türbülanslı kinetik enerji dağılımları gösterilmiştir. Kavite bölgesindeki türbülanslı kinetik enerji dağılımı en yoğun şekilde arka duvarda, özellikle arka duvar üst köşesine yaklaştıkça artmıştır. Kavite ön duvarında çalkantılı bir yapı görülmemiştir. Kavite alt duvarında ise kavite arka duvarına yaklaştıkça çalkantılı yapıların arttığı bunun da ses basınç seviyelerindeki arka duvara yaklaştıkça artan seviyeyi doğrular niteliktedir.

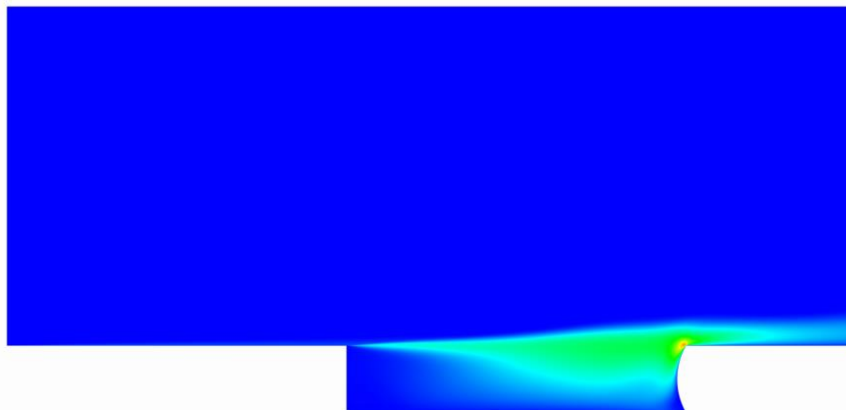
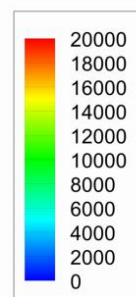
C30



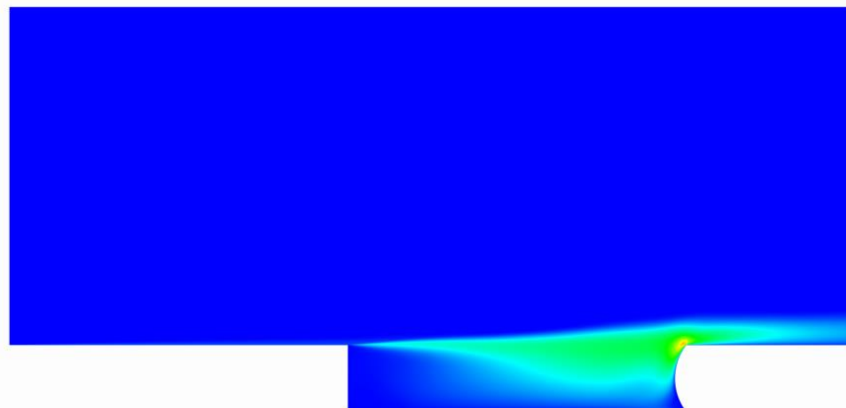
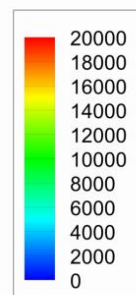
C45

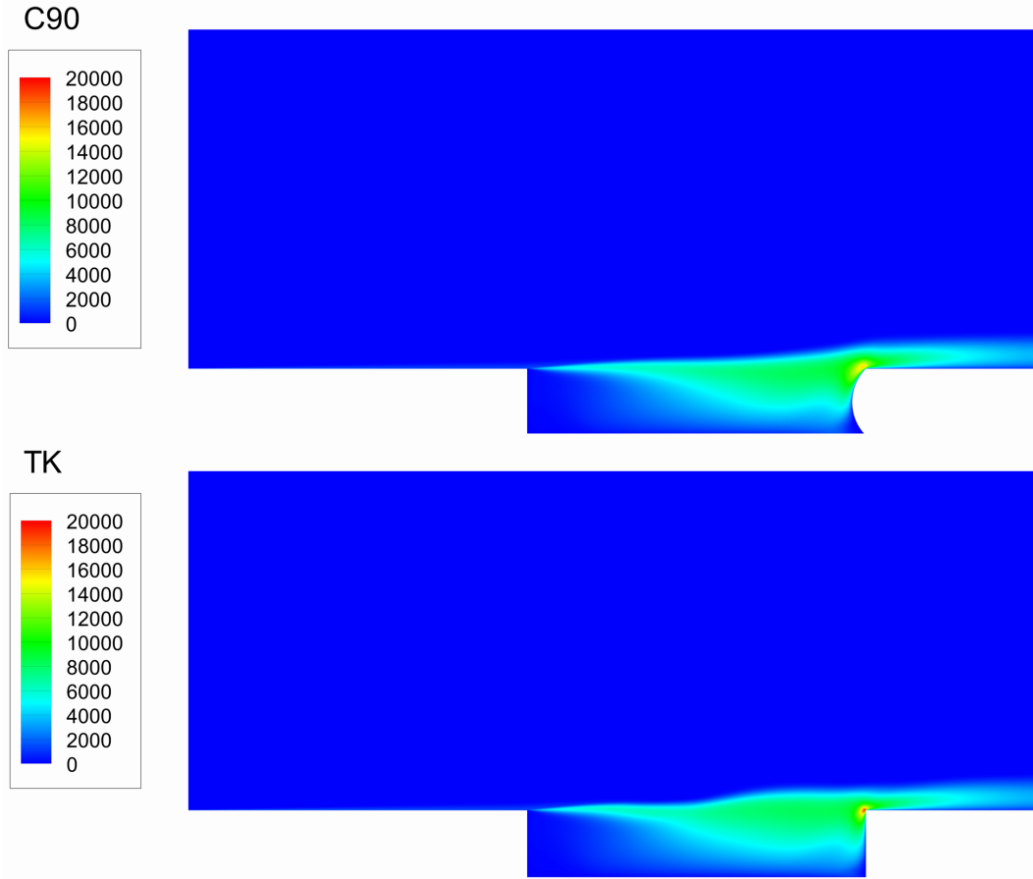


C60



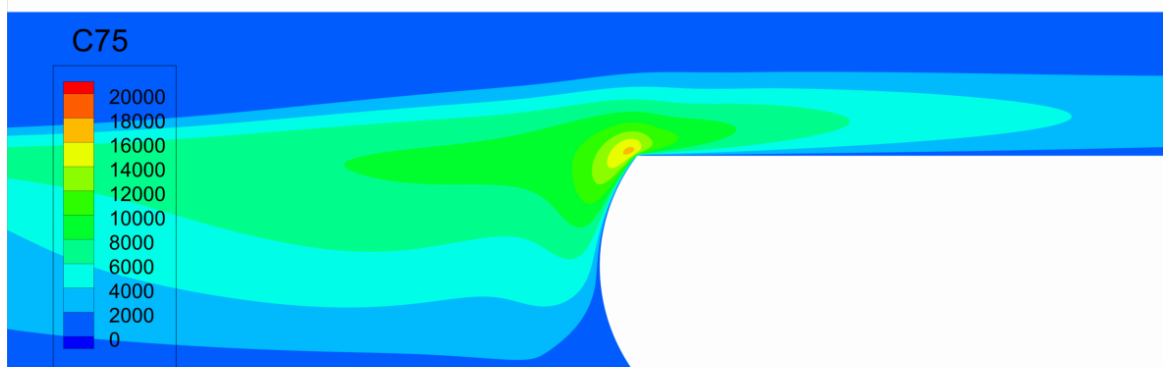
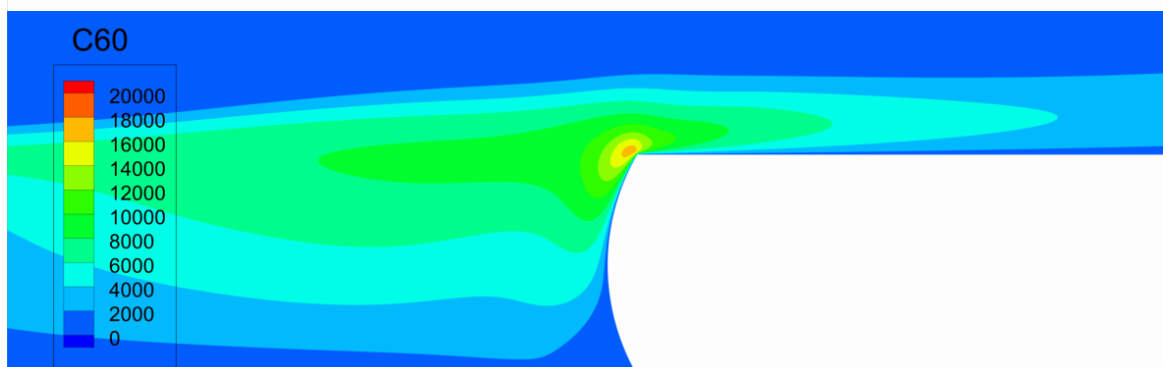
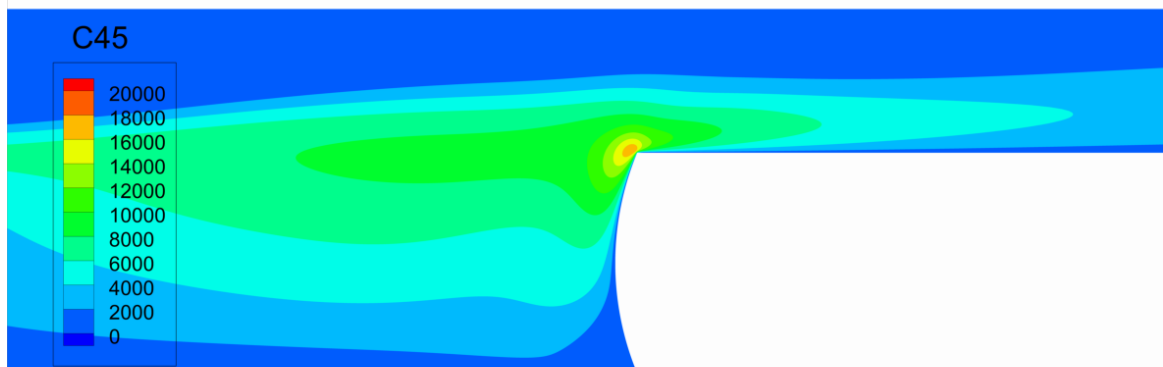
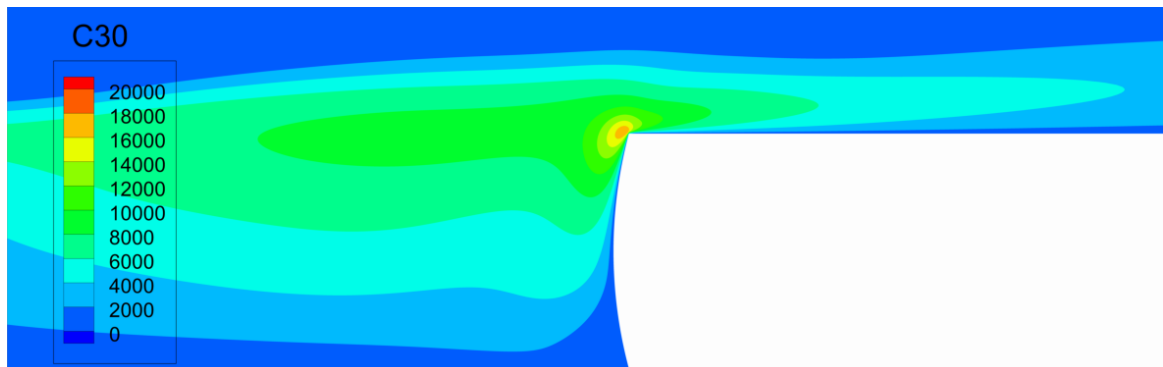
C75

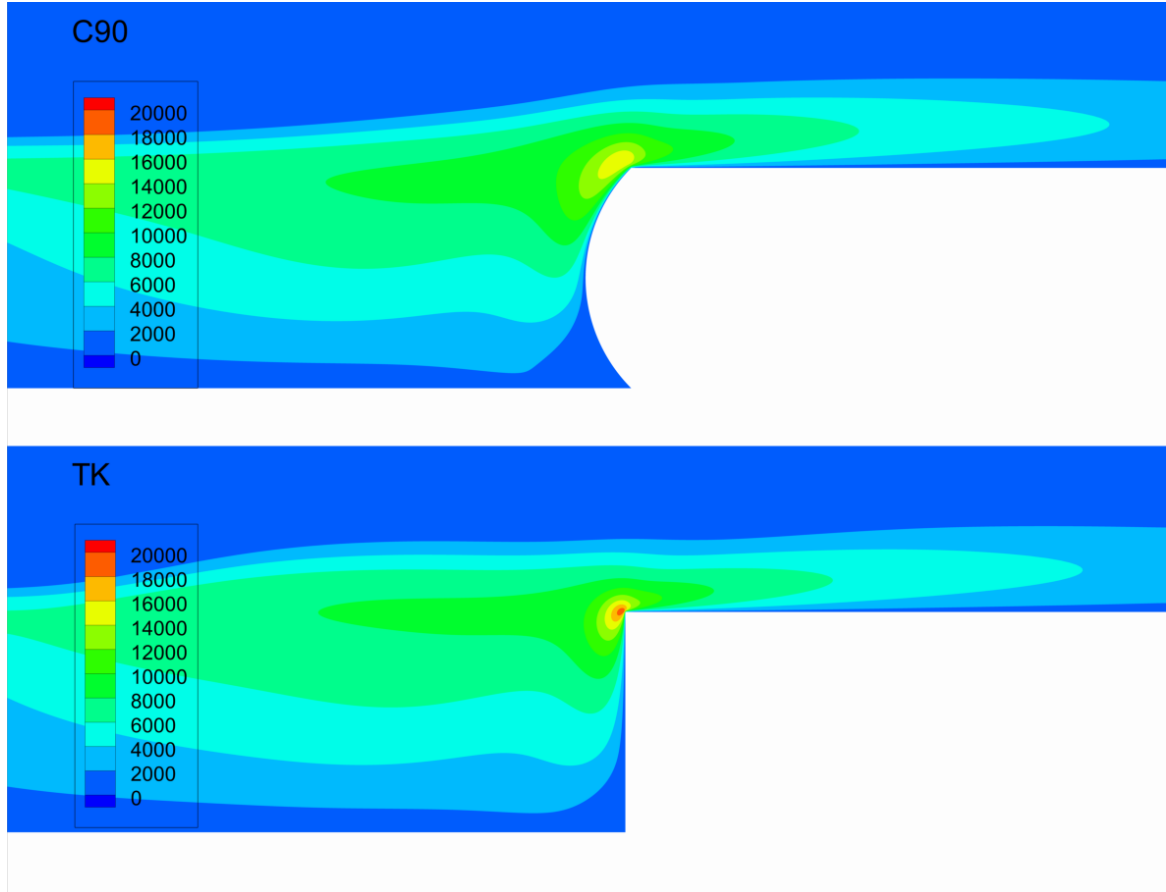




Şekil 6.11. Parametrik arka duvar hilal geometri çalışmaları için türbülanslı kinetik enerji konturları

Şekil 6.12’de kavite arka duvarının farklı eğrilik oluşum açılarında kavite bölgesinin en kritik yeri olan arka duvara yaklaşmış türbülanslı kinetik enerji dağılımları gösterilmiştir. Ses basınç seviyelerindeki en etkili parametre türbülansın çalkantılı yapısıdır. Şekil 6.12 incelendiğinde kavite eğrilik oluşum açısı arttıkça kavite arka duvarının kavite bölgesi akışı ve kesme tabakası ile daha yumuşak ve eğimli bir etkileşime girerek, çalkantılı yapıyı azaltmıştır. C90 konfigürasyonunda bu çalkantılı yapının azaldığını türbülans kinetik enerji konturları doğrulamaktadır. Hilal geometrisi oluşum açısı arttıkça türbülanslı kinetik enerji dağılımları arka duvar üst köşesinden başlayarak azalma göstermiştir. Temel konfigürasyon ve diğer hilal geometrileri kıyaslandığında azalmanın en iyi olduğu konfigürasyon C90 olmuştur.





Şekil 6.12. Parametrik arka duvar hilal geometri çalışmaları için yakınlştırılmış arka duvar türbülanslı kinetik enerji konturları

Parametrik kavite arka duvar hilal geometrileri arasında ses basınç seviyelerinde düşüş sağlayan en iyi konfigürasyon C90 konfigürasyonu olmuştur. Bu konfigürasyonun kontrolsüz temel konfigürasyon (TK) ile alt duvar konumu için belirli x/L değerlerinde ses basınç seviyeleri cinsinden kıyaslaması Çizelge 6.6'da gösterilmiştir. Kavite tabanı boyunca temel konfigürasyona göre ortalama 7,43 dB düşüş sağlanmıştır. Bu düşüş temel konfigürasyona göre % 5,08 oranında ses basınç seviyelerinde iyileşme anlamına gelmektedir.

Çizelge 6.6. Kavite arka duvar hilal geometri çalışmaları sonucunda TK ile C90 konfigürasyonlarının kavite alt duvarı için SPL değerleri

Konfigürasyon Adı		Kavite Alt Duvar Konumu					
		x/L = 0	x/L = 0,2	x/L = 0,4	x/L = 0,6	x/L = 0,8	x/L = 1
TK		146,59	137,76	147,82	148,83	148,24	155,59
C90		141,19	127,11	141,87	138,51	142,13	149,43
	Fark	5,4	10,65	5,95	10,32	6,11	6,16
	Fark (%)	3,68	7,73	4,03	6,94	4,12	3,96

Çizelge 6.7’de kontrolsüz temel konfigürasyon (TK) ile hilal geometrileri arasından en iyi sonuç veren C90 konfigürasyonunun arka duvar konumu için belirli y/D değerlerinde ses basınç seviyelerindeki kıyaslaması gösterilmiştir. Kavite arka duvarı boyunca kontrolsüz temel konfigürasyona göre ortalama 7,38 dB düşüş sağlanmıştır. Bu düşüş yaklaşık olarak % 4,73 oranında ses basınç seviyelerinde iyileşme sağlamıştır.

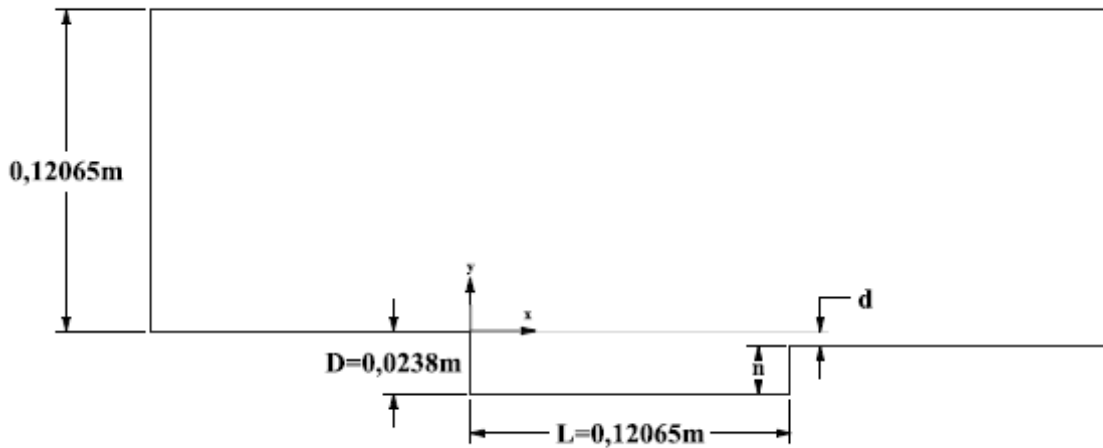
Çizelge 6.7. Kavite arka duvar hilal geometri çalışmaları sonucunda TK ile C90 konfigürasyonlarının kavite arka duvarı için SPL değerleri

Konfigürasyon Adı		Kavite Arka Duvar Konumu					
		y/D = 0	y/D = -0,2	y/D = -0,4	y/D = -0,6	y/D = -0,8	y/D = -1
TK		157,09	157,39	155,88	154,80	155,50	155,59
C90		146,94	150,03	148,64	148,60	148,34	149,43
	Fark	10,15	7,36	7,24	6,2	7,16	6,16
	Fark (%)	6,46	4,68	4,65	4,01	4,61	3,96

6.3. Kavite Arka Duvar Boyunu Kısaltma (Offset Verme) Çalışmaları

Kavite arka duvar boyunu kısaltma çalışmaları için uygulanan modelin şematik gösterimi Şekil 6.13’de gösterilmiştir. Kavite arka duvar boyu, kontrolsüz modeldeki arka duvar boyunun % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranında kavite üst köşesinden kısaltılmıştır. Oluşturulan her yeni kavite modeline uygun iki boyutlu kavite geometrileri oluşturulmuş olup, elde edilen ağ yapıları doğrulama çalışmalarında nihai olarak seçilen kontrolsüz temel ağ yapısının özellikleri korunarak oluşturulmuştur.

Oluşturulan modellerde kavite offset oranı (O) boyutsuz sayısı tanımlanmış olup bu tanım kavite derinliğinin (D) kavite arka duvar boşluğuna (d) oranı olarak gösterilmiştir. Kavite arka duvar boyunun % 5 oranında kısaltıldığı konfigürasyonun adı O5, % 10 oranında kısaltıldığı konfigürasyonun adı O10, % 15 oranında kısaltıldığı konfigürasyonun adı O15 ve % 20 oranında kısaltıldığı konfigürasyonun adı O20 olarak tanımlanmıştır. Kavitenin kıyaslama yapılacak temel kontrolsüz çalışması ise TK olarak gösterilmiştir. Gelecek çalışmalarda boyutsuz O sayısı kullanılarak yeni kavite modelleri oluşturulup, kavite offset oranının süpersonik kavite akışına etkisi incelenebilir.



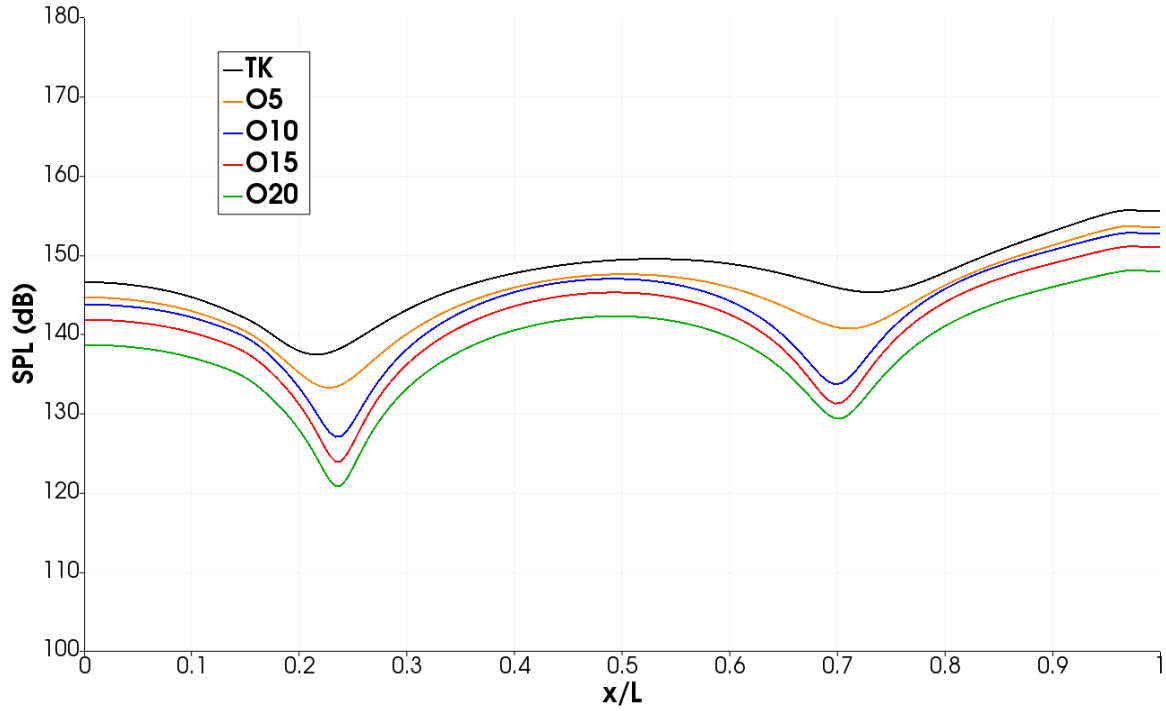
Şekil 6.13. Kavite arka duvar boyunu kısaltma (offset verme) çalışmalarının şematik gösterimi

Çizelge 6.8’de kavite arka duvar boyu kısaltılan konfigürasyonların özellikleri sunulmuştur. Oluşturulan dört konfigürasyon için kavite arka duvar boyu kısaltılmasının kavite bölgesinde oluşan ses basınç seviyelerine etkileri incelenmiştir. İnceleme yapılırken parametrik konfigürasyonların, kontrolsüz temel konfigürasyonla (TK) kıyaslaması kavite alt ve arka duvarı için ses basınç seviyeleri cinsinden sunulmuştur.

Çizelge 6.8. Kavite bölgesi arka duvar boyunu kısaltma konfigürasyon değerleri

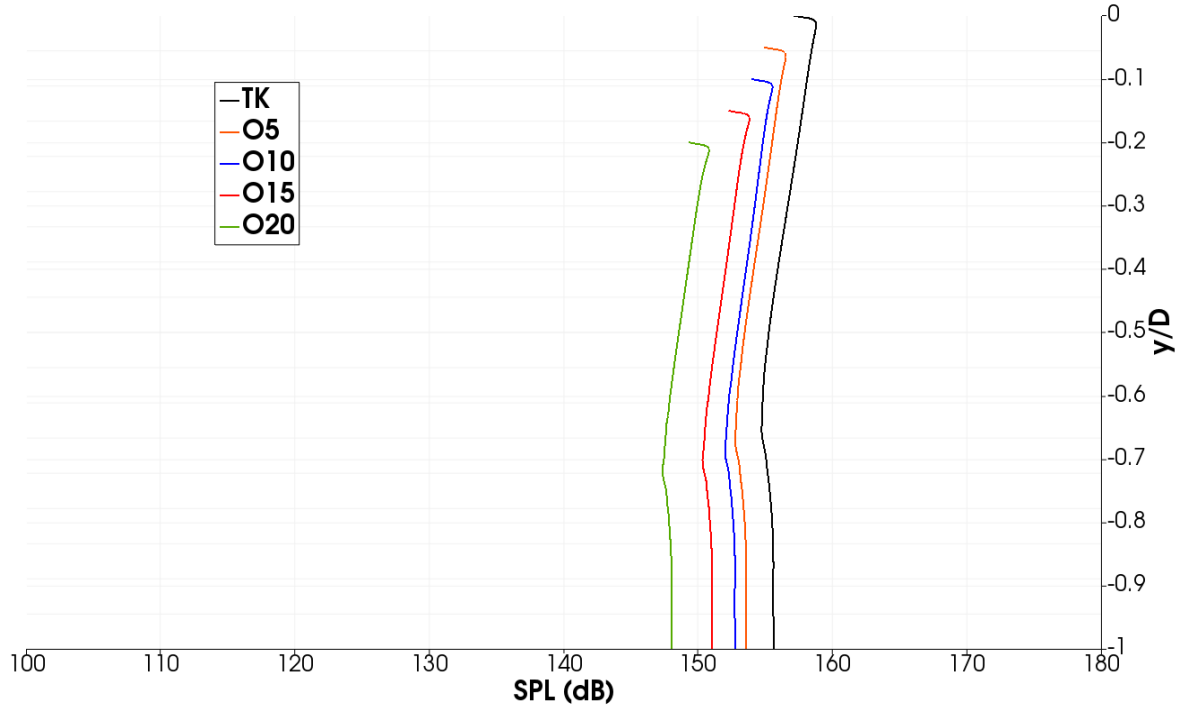
Konfig. Numarası	Kavite Uzunluğu L (m)	Kavite Derinliği D (m)	Kavite Arka Duvar Boyu n (m)	Kavite Arka Duvar Boşluğu d (m)	Kavite Arka Duvar Offset (%)	Kavite Offset Oranı $O=D/d$	Konfig. Adı
1	0,12065	0,0238	0,02261	0,00119	5	20	O5
2	0,12065	0,0238	0,02142	0,00238	10	10	O10
3	0,12065	0,0238	0,02023	0,00357	15	6,67	O15
4	0,12065	0,0238	0,01904	0,00476	20	5	O20
5	0,12065	0,0238	0,0238	-	-	-	TK

Şekil 6.14’de kavite arka duvar boyunu kısaltma çalışmaları sonucunda; kavite alt duvarında oluşan ses basınç seviyelerinin alt duvar konumuna göre dağılımı sunulmuştur. Kavite alt duvar konumu boyutsuzlaştırılarak Şekil 6.14’de gösterilmiştir. Kavite arka duvarının boyu kısaltıldıkça alt duvar boyunca gözlemlenen ses basınç seviyelerinde düşüş görülmüştür. Bunun sebebi olarak kavite arka duvar boyunun kısaltılması kesme tabakasının dinamik yapısını bir miktar düzenli hale getirmiş ve kesme tabakasında oluşan osilasyonun azalmasına sebep olduğu yorumu yapılabilir. Gerçekleştirilen tüm kontrol çalışmalarında kontrolsüz duruma göre ses basınç seviyelerinde alt duvar için iyileştirmeler sağlanmıştır. Ses basınç seviyelerinin en düşük olarak gözlemlendiği konfigürasyon kavite arka duvar boyunun % 20 oranında kısaltıldığı O20 konfigürasyonu olmuştur.



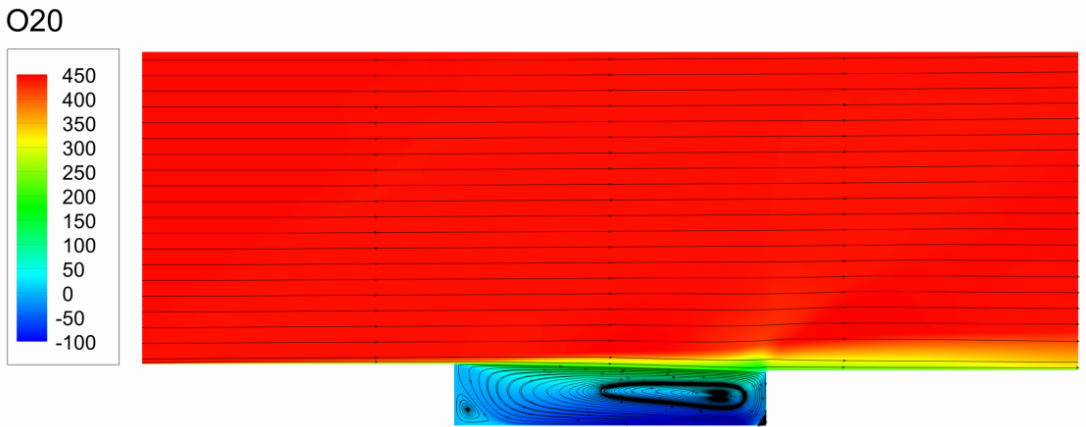
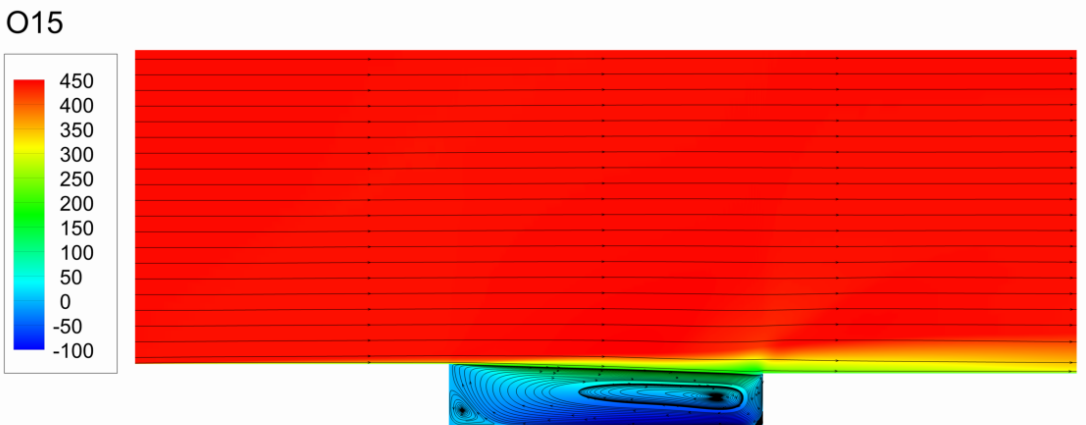
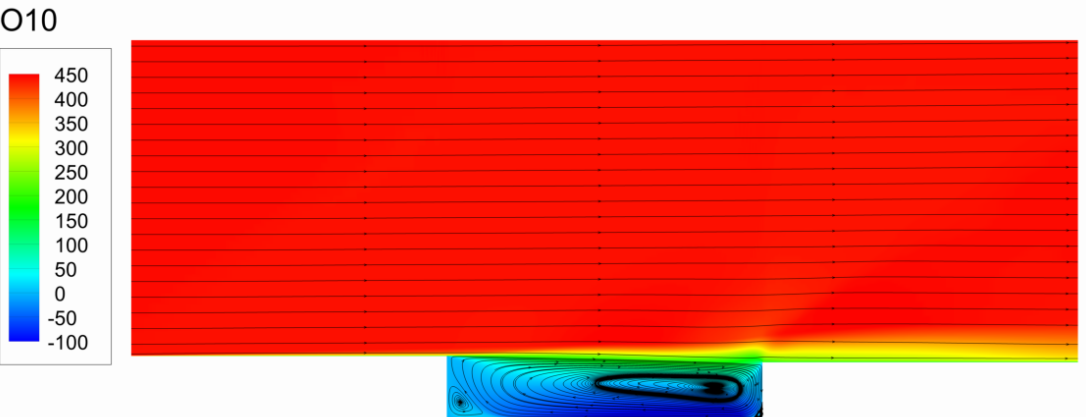
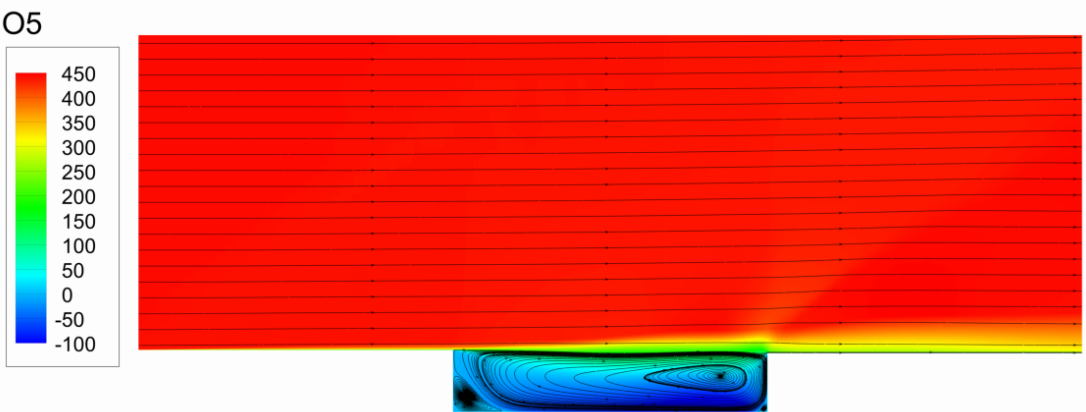
Şekil 6.14. Kavite arka duvar boyunu kısaltma (offset verme) çalışmalarının alt duvar konumuna göre SPL grafiği

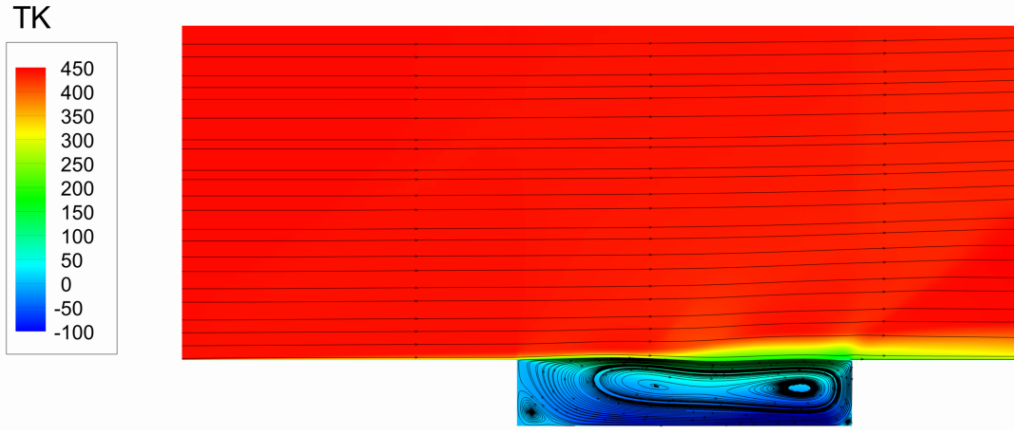
Şekil 6.15’de kavite arka duvar boyunu kısaltma çalışmaları sonucunda; kavite arka duvarında oluşan ses basınç seviyelerinin arka duvar konumuna göre dağılımları sunulmuştur. Kavite arka duvar konumu boyutsuzlaştırılarak Şekil 6.15’de çizdirilmiştir. Gerçekleştirilen tüm kontrol çalışmalarında kontrolsüz duruma göre kavite alt duvarındaki gürültü seviyeleri azalmıştır. Kavite arka boyu kısaldıkça kavite arka duvarında oluşan ses basınç seviyelerinde iyileşmeler görülmüştür. Yine kavite alt duvar dağılımına benzer bir şekilde ses basınç seviyelerindeki en fazla düşüş kavite arka duvar boyunun % 20 azaltıldığı O20 konfigürasyonunda gözlemlenmiştir.



Şekil 6.15. Kavite arka duvar boyunu kısaltma (offset verme) çalışmalarının arka duvar konumuna göre SPL grafiği

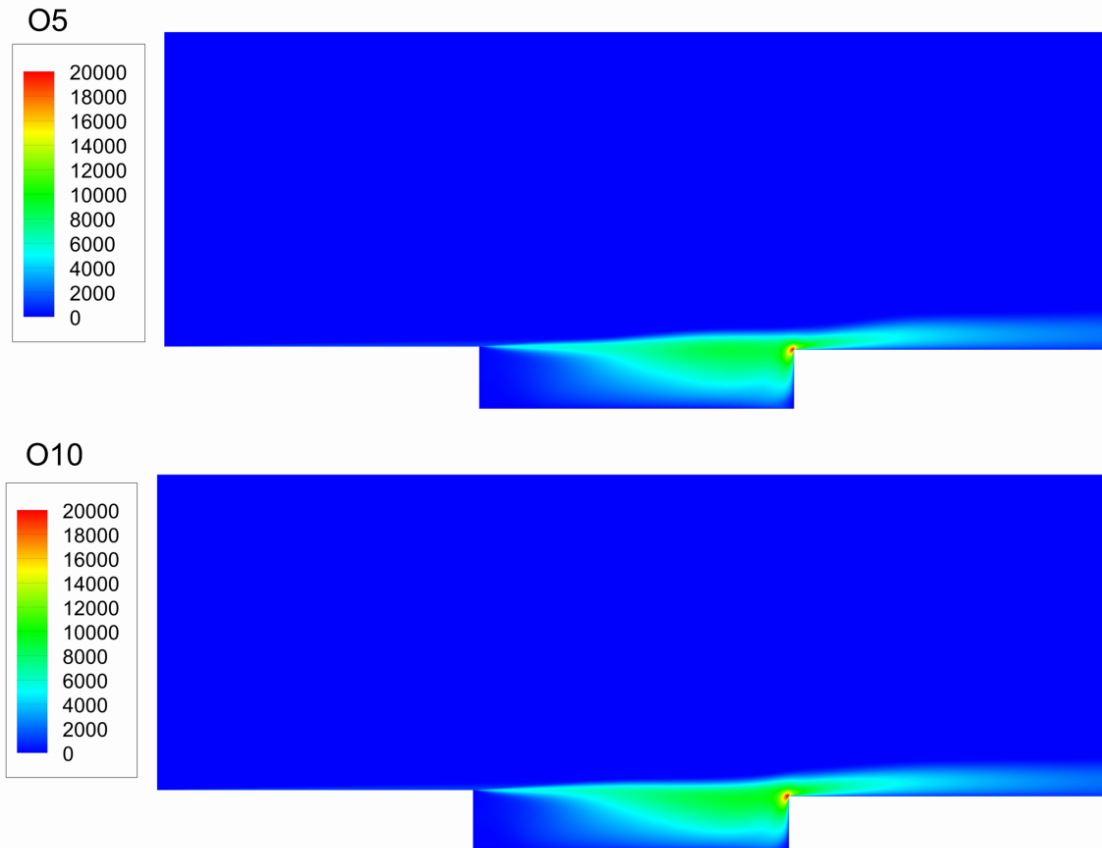
Şekil 6.16'da kavite arka duvar boyunu kısaltma çalışmalarının kavite bölgesindeki vektörel hız dağılımları gösterilmiştir. Kavite arka duvar boyunun kısaltılması ile tüm parametrik çalışmalarda kesme tabakasının kavite bölgesine doğru eğildiği görülmüştür. Kesme tabakasına arka duvarın geometrik yapısı ile verilen eğilim akışta oluşan basınç dalgalanmalarını azaltabilmiştir. Kavite bölgesini domine eden büyük girdap yapısı kendi içerisinde çoklu iki adet yapı oluşturmakta yerine tekli büyük yapıya doğru yönelim göstermiştir. Parametrik çalışmalarda yine kavite ön duvar alt köşesindeki girdap yapısı ve kavite arka duvarı alt köşesindeki küçük girdap yapısı ortaya çıkmaktadır. Ses basınç seviyelerinde en iyi konfigürasyon olan O20 çalışması incelendiğinde akışın daha düzenli, girdap yapılarının belirgin ve kendini tekrar eden yapıya sahip olduğu yorumu yapılabilir.

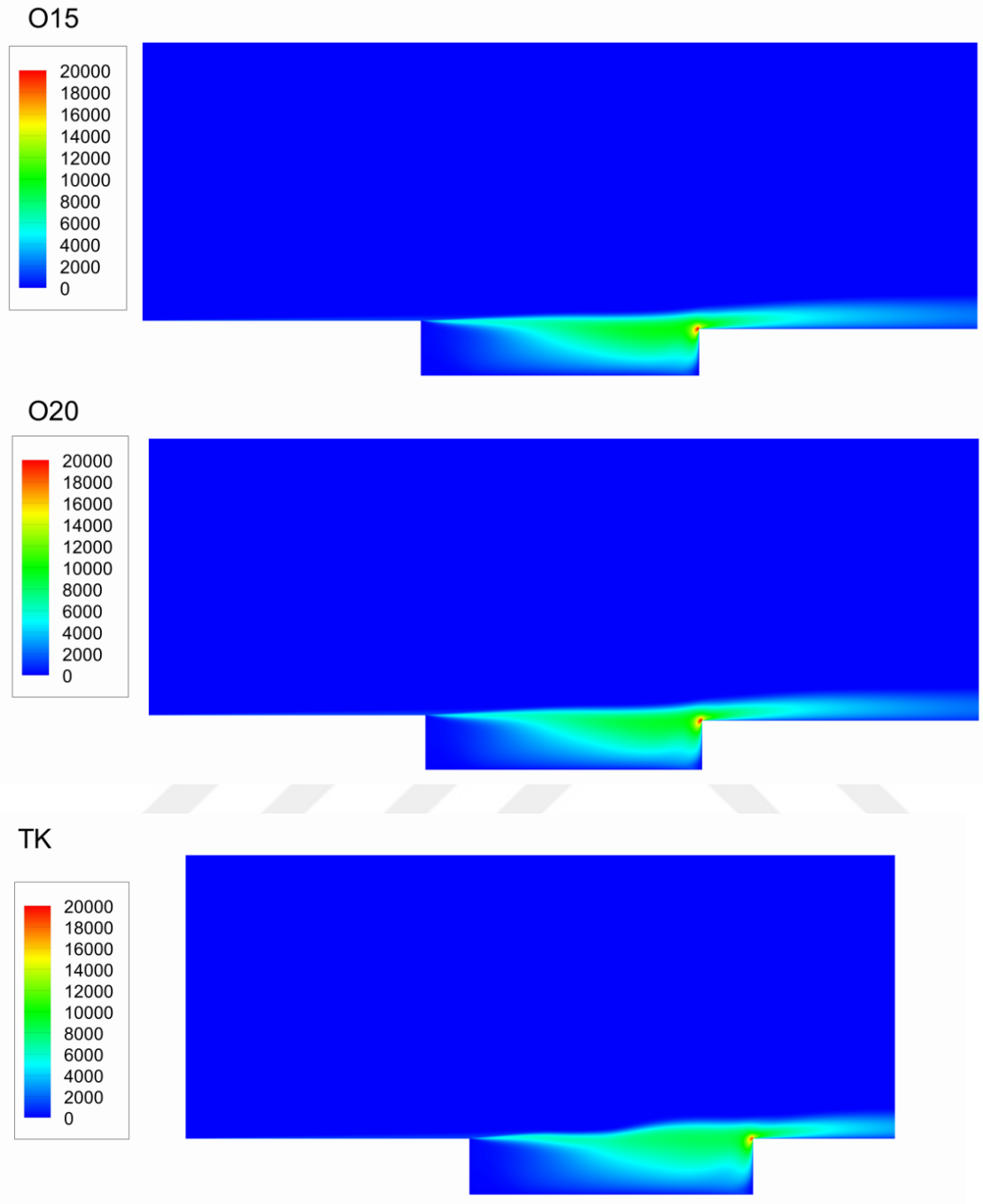




Şekil 6.16. Parametrik arka duvar boyunu kısaltma çalışmaları için vektörel hız dağılımları

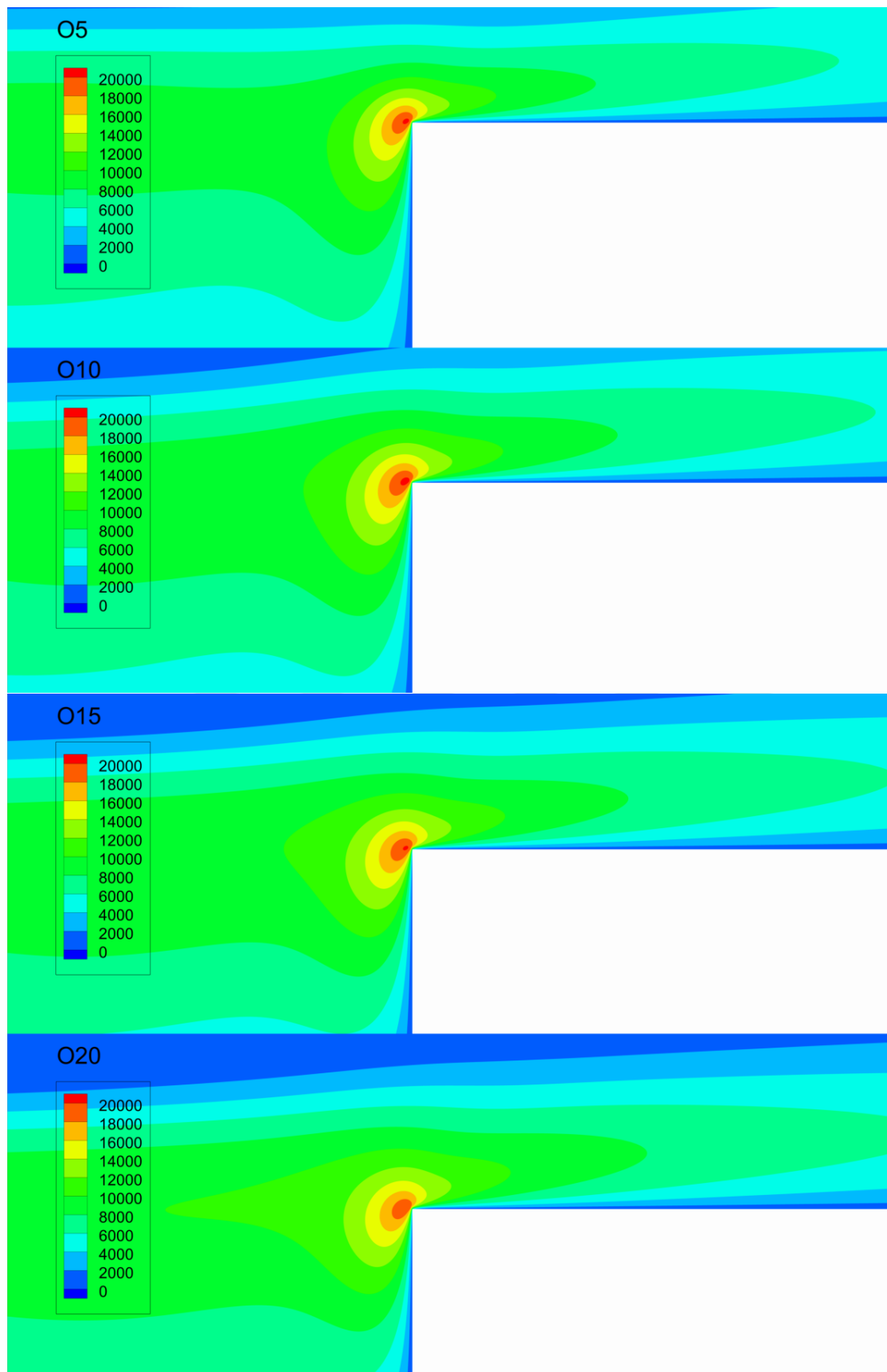
Şekil 6.17’de kavite arka duvar boyunu kısaltma çalışmalarının türbülans kinetik enerji dağılımları gösterilmiştir. Kavite arka duvar boyunun % 20 oranında kısaltıldığı O20 konfigürasyonunda diğer konfigürasyonlarla kıyaslanarak yoğunluğu en az türbülans kinetik enerji dağılımı gözlemlenebilir. Bunun sonucu olarak hem kavite arka duvarı hem de kavite alt duvarı için ses basınç seviyelerindeki değerlerin düşük olması, elde edilen grafikleri doğrular niteliktedir.

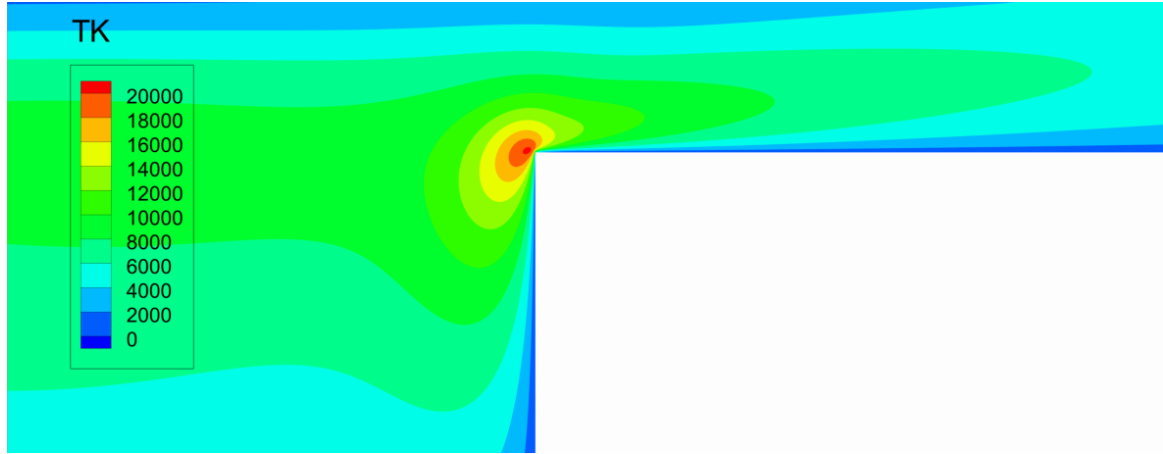




Şekil 6.17. Parametrik arka duvar boyunu kısaltma çalışmaları için türbülanslı kinetik enerji konturları

Şekil 6.18’de arka duvar boyunu kısaltma çalışmalarının arka duvardaki türbülanslı kinetik enerji konturları gösterilmiştir. Kavite arka duvarı boyu azaldıkça kesme tabakası kaynaklı akustik osilasyonların azalmasından dolayı kavite arka duvarında oluşan türbülans kinetik enerji dağılımı azalmıştır. Bunun sonucunda gerçekleştirilen tüm kontrollü çalışmalarda kontrolsüz çalışmalara göre ses basınç seviyeleri azalmıştır. Ses basınç seviyelerindeki en fazla düşüş kavite arka duvar boyu % 20 kısaltılan O20 konfigürasyonu olmuştur.





Şekil 6.18. Parametrik arka duvar boyunu kısaltma çalışmaları için arka duvar türbülanslı kinetik enerji dağılımı

Çalışma kapsamında incelenen kavite arka duvar boyunu kısaltma konfigürasyonları arasından ses basınç seviyelerinde düşüş sağlayan en iyi konfigürasyon O20 konfigürasyonu olmuştur. Bu konfigürasyonun kontrolsüz temel konfigürasyon (TK) ile alt duvar konumu için belirli x/L değerlerinde ses basınç seviyeleri cinsinden kıyaslaması Çizelge 6.9’da gösterilmiştir. Kavite tabanı boyunca temel konfigürasyona göre ortalama 7,27 dB düşüş sağlanmıştır. Bu düşüş temel konfigürasyona göre ortalama % 4,95 oranında ses basınç seviyelerinde iyileşme sağlamıştır.

Çizelge 6.9. Kavite arka duvar boyunu kısaltma çalışmaları sonucunda TK ile O20 konfigürasyonlarının kavite alt duvar konumu için SPL değerleri

Konfigürasyon Adı		Kavite Alt Duvar Konumu					
		$x/L = 0$	$x/L=0,2$	$x/L = 0,4$	$x/L = 0,6$	$x/L = 0,8$	$x/L = 1$
TK		146,59	137,76	147,82	148,83	148,24	155,59
O20		138,69	128,36	142,13	139,98	143,92	148,10
	Fark	7,9	9,4	5,69	8,85	4,32	7,49
	Fark (%)	5,39	6,82	3,85	5,95	2,91	4,81

Çizelge 6.10'da kontrolsüz temel konfigürasyon (TK) ile kavite arka duvarına offset verme çalışmaları arasından en iyi sonuç veren O20 konfigürasyonunun arka duvar konumu için belirli y/D değerlerinde ses basınç seviyelerindeki kıyaslaması gösterilmiştir. Kavite arka duvarı boyunca temel konfigürasyona göre ortalama 6,06 dB düşüş sağlanmıştır. Bu düşüş yaklaşık olarak % 3,89 oranında ses basınç seviyelerinde iyileşme sağlamıştır.

Çizelge 6.10. Kavite arka duvar boyunu kısaltma çalışmaları sonucunda TK ile O20 konfigürasyonlarının kavite arka duvar konumu için SPL değerleri

Konfigürasyon Adı		Kavite Arka Duvar Konumu					
		y/D = 0	y/D = -0,2	y/D = -0,4	y/D = -0,6	y/D = -0,8	y/D = -1
TK		157,09	157,39	155,88	154,80	155,50	155,59
O20		-	151,81	150,22	149,85	148,86	148,10
	Fark	-	5,58	5,66	4,95	6,64	7,49
	Fark (%)	-	3,55	3,63	3,20	4,27	4,81

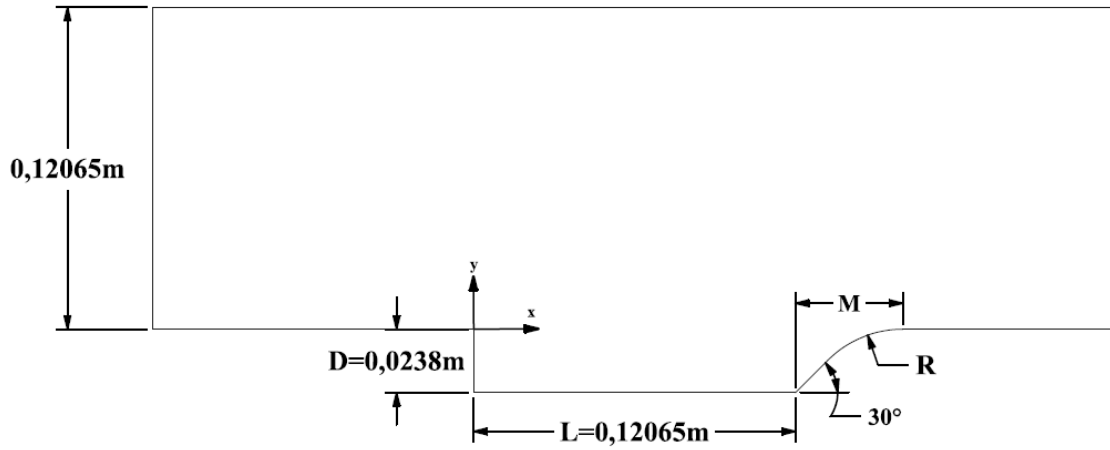
Bu çalışmada şimdiye kadar üç adet temel parametrik çalışma incelenmiştir. Bu çalışmalar kavite arka duvarına eğim verme, kavite arka duvarında hilal geometrisi oluşturma ve kavite arka duvar boyunu kısaltma çalışmalarıdır. Kavite arka duvarına eğim verilen çalışmalarda ses basınç seviyelerini en çok azaltan çalışma kavite arka duvarına 30° eğim verilen E30 konfigürasyonu olmuştur. Bu konfigürasyon için kavite alt duvarında ortalama 39,81 dB, arka duvarda ise ortalama 43,53 dB ses basınç seviyelerinde iyileşme sağlanmıştır. Kavite arka duvarına hilal şekli verilen çalışmalarda en iyi konfigürasyon iki noktası sabit 90° oluşum açısı ile elde edilen C90 konfigürasyonu olmuştur. Bu konfigürasyon için kavite alt duvarında ortalama 7,43 dB, arka duvarda ise ortalama 7,38 dB ses basınç seviyelerinde iyileşme sağlanmıştır. Kavite arka duvar boyunun kısaltıldığı çalışmalarda ise en iyi konfigürasyon arka duvar boyunun; normal duvar boyuna göre %20 kısaltıldığı O20 konfigürasyonu olmuştur. Bu konfigürasyon için kavite alt duvarında ortalama 7,27 dB, arka duvarda ise ortalama 6,06 dB ses basınç seviyelerinde iyileşme sağlanmıştır.

Özetlemek gerekirse gürültü seviyelerini en fazla düşürebilen parametrik çalışma kavite arka duvarına eğim verme çalışmaları olmuştur. Bu çalışmadan sonra en iyi sonuçları veren parametrik çalışma ise kavite arka duvarına eğrilik verme (hilal geometrisi oluşturma) çalışması olmuştur. Tezin geri kalan parametrik çalışmalarında şimdiye kadar gürültünün en az olduğu, kavite arka duvarına 30° eğim verilen E30 konfigürasyonunun eniyileştirme çalışmaları gerçekleştirilecektir. Bu çalışmalar gerçekleştirilirken E30 konfigürasyonunun arka duvarına belirli yerlerden eğrilikler verilecek olup ses basınç seviyeleri daha da düşürülmeye çalışılacaktır.

6.4. Kavite Arka Duvar Eğiminin 30° Olduğu Durumda Arka Duvar Üst Köşesinden Eğrilik Verme Çalışmaları

Kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durum için kavite arka duvarının üst köşesinden eğrilik verme çalışmalarında kullanılan modelin şematik gösterimi Şekil 6.19'da gösterilmiştir. Eğimli kavite arka duvarı, çıkış kavite duvarı ile belirli bir yarıçaptaki eğri ile birleştirilmiştir. Oluşturulan her yeni kavite modeline uygun iki boyutlu kavite geometrileri oluşturulmuş olup, elde edilen ağ yapıları doğrulama çalışmalarında nihai olarak seçilen ağ yapısının özellikleri korunarak gerçekleştirilmiştir.

Oluşturulan modellerde eğimli kavite eğrilik oranı (T) boyutsuz sayısı tanımlanmış olup bu tanım kavite derinliğinin (D) kavite arka duvar üst köşesine verilen eğrilik oluşum yarıçapına (R) oranı olarak gösterilmiştir. 30° eğimli kavite arka duvarına üst köşeden 45 mm yarıçap ile eğrilik verilen konfigürasyonun adı EC45, 15 mm yarıçap ile eğrilik verilen konfigürasyonun adı EC15, 5 mm yarıçap ile eğrilik verilen konfigürasyonun adı EC5 ve 1 mm yarıçap ile eğrilik verilen konfigürasyonun adı EC1 olarak tanımlanmıştır. Kavitenin 30° eğim verilen kıyaslama yapılacak olan çalışma ise E30 olarak gösterilmiştir.



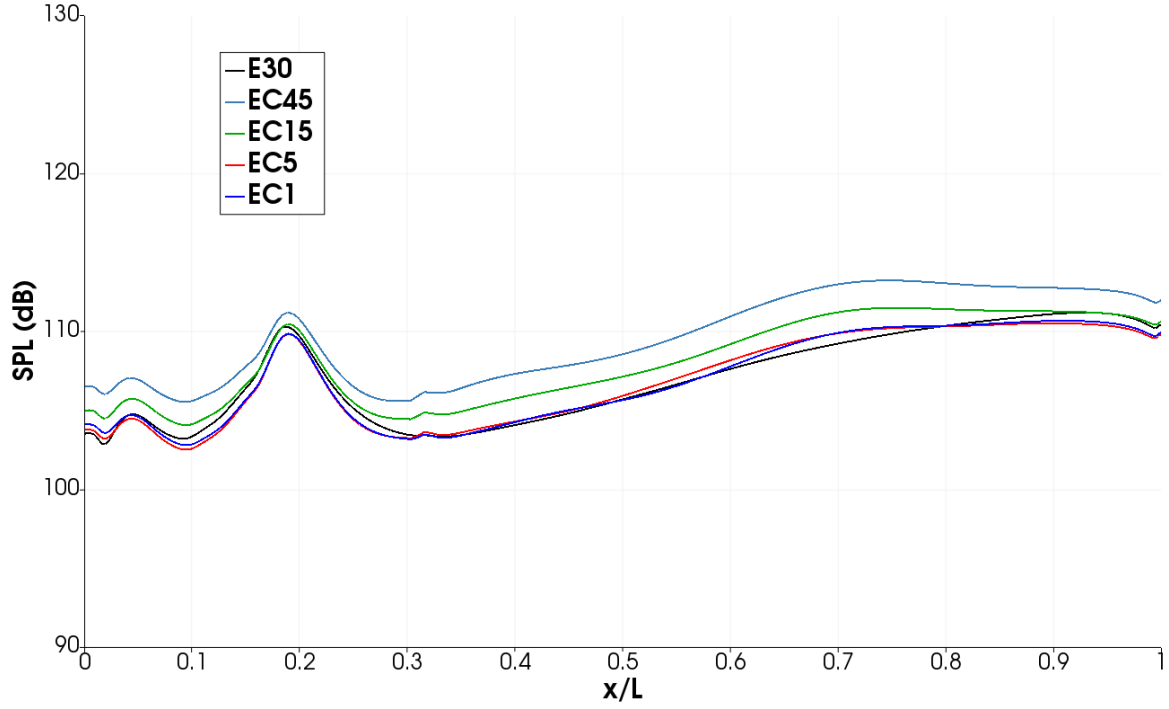
Şekil 6.19. Kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durum için kavite arka duvarının üst köşesinden eğrilik verme çalışmalarının şematik gösterimi

Çizelge 6.11’de önceki parametrik çalışmalarda en iyi sonuç veren E30 konfigürasyonu referans alınarak kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvar üst köşesine belirli yarıçaplarda eğrilik verilen konfigürasyonların özellikleri sunulmuştur. Oluşturulan yeni konfigürasyonlar için kavite bölgesinde oluşan gürültü seviyeleri incelenmiştir. İnceleme yapılırken parametrik konfigürasyonların, kontrolsüz temel konfigürasyonla (TK) kıyaslaması kavite alt ve arka duvarı için ses basınç seviyeleri cinsinden sunulmuştur.

Çizelge 6.11. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvar üst köşesine eğrilik verme çalışmaları konfigürasyon özellikleri

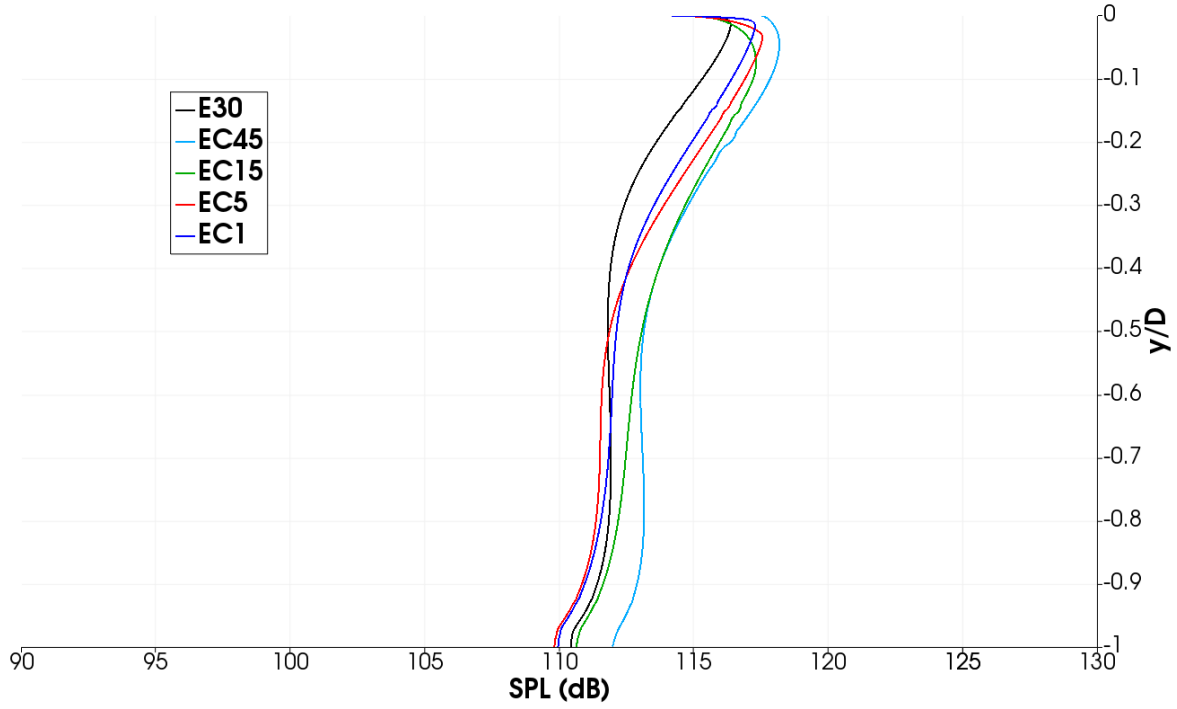
Konfig. Numarası	Kavite Uzunluğu L (m)	Kavite Derinliği D (m)	Kavite Eğim Uzunluğu M (m)	Kavite Arka Duvar Üstten Eğrilik Oluşum Yarıçapı R (m)	Eğimli Kavite Eğrilik Oranı T=D/R	Konfig. Adı
1	0,12065	0,0238	0,05355	0,04599	0,52	EC45
2	0,12065	0,0238	0,04573	0,01583	1,50	EC15
3	0,12065	0,0238	0,04256	0,005	4,76	EC5
4	0,12065	0,0238	0,04149	0,001	23,8	EC1
5	0,12065	0,0238	0,04122	-	-	E30

Şekil 6.20’de parametrik çalışmalarda kavite alt duvarında oluşan ses basınç seviyelerinin alt duvar konumuna göre dağılımları sunulmuştur. Tüm parametrik çalışmalarda elde edilen gürültü seviyeleri çok benzerdir. Kavite tabanı boyunca kavite üst köşesine verilen eğrilik yarıçapı azaldıkça ses basınç seviyelerinde azalmalar görülmüştür. Bu azalma EC5 konfigürasyonuna kadar devam etmiştir. EC1 konfigürasyonu kavite üst köşesine 1mm eğrilik verilen ve eğrilik yarıçapı en az olan çalışma olmasına rağmen ses basınç seviyelerini düşüren en iyi çalışma değildir. E30 konfigürasyonuna göre EC45 ve EC15 konfigürasyonları ses basınç seviyelerinde iyileşme sağlayamamıştır. Kavite tabanın büyük bir kısmında ses basınç seviyelerinin en düşük olarak gözlemlendiği konfigürasyon kavite arka duvar üst köşesine 5mm yarıçapında eğrilik verilen EC5 konfigürasyonu olmuştur.



Şekil 6.20. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvar üst köşesine eğrilik verme çalışmalarının alt duvar konumuna göre SPL grafiği

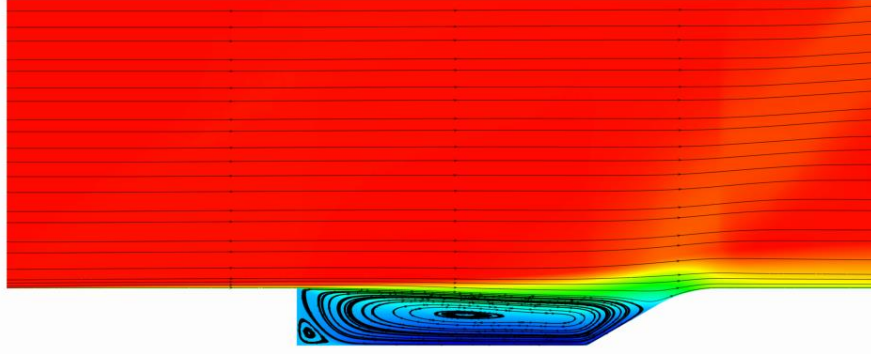
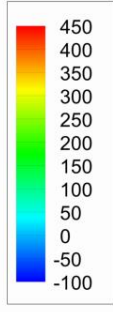
Şekil 6.21’de parametrik çalışmalar sonucunda kavite arka duvarında oluşan ses basınç seviyelerinin arka duvar konumuna göre dağılımları sunulmuştur. Tüm çalışmalarda gürültü seviyeleri kavite alt duvarında olduğu gibi kavite arka duvarında da çok benzerdir. Kavite arka duvarının alt bölgesinden orta bölgesine ($y/D = -1$ ile $y/D = -0,5$ arası) kadar en iyi konfigürasyon EC5 konfigürasyonudur. Kavite arka duvar üst bölgesinde ise gerçekleştirilen parametrik çalışmalar ses basınç seviyelerinde iyileşme sağlayamamıştır. Fakat bu bölgede (arka duvarın üst bölgesinde) E30 konfigürasyonu hariç tutulursa eğer en iyi konfigürasyon kavite arka duvar üst köşesine en fazla eğrilik yarıçapı verilen EC45 konfigürasyonu olmuştur. Bu sonuçtan kavite arka duvar üst köşesine verilen eğriliğin daha büyük olmasının ses basınç seviyelerini azalttığı yorumu çıkarılabilir. Sonuç olarak kavite arka duvar bölgesinin yarısında ve alt duvar bölgesinin çoğunluğunda ses basınç seviyelerini azaltabilen EC5 konfigürasyonu gerçekleştirilen parametrik çalışmaların en iyisi olarak seçilmiştir.



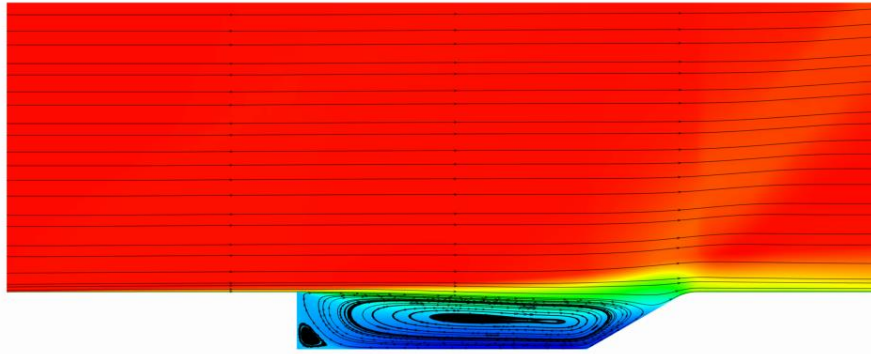
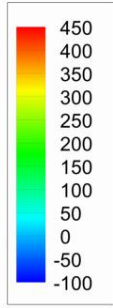
Şekil 6.21. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvar üst köşesine eğrilik verme çalışmalarının arka duvar konumuna göre SPL grafiği

Şekil 6.22’de kavite arka duvarının farklı parametrik arka duvar üst noktasından eğrilik verme çalışmaları sonucunda aynı zaman diliminde oluşan vektörel hız dağılımları gösterilmiştir. Tüm parametrik çalışmalarda; kavite arka duvar üst köşesinin, çıkış duvarı ile sert birleşmek yerine daha yumuşak birleşmesi; kavite arka duvarına çarpan kesme tabakasının şiddetini azaltmıştır. Parametrik çalışmalardaki kavite çıkış bölgesinde oluşan şokun daha az belirgin olması bu yorumu doğrulamaktadır. Çalışmaların tümünde kavite bölgesini domine eden iki adet girdap yapısı görülmektedir. Bunlardan bir tanesi büyük tekli girdap yapısı, diğeri ise kavite ön duvar alt köşesinde bulunan küçük tekli girdap yapısıdır. Kavite bölgesinde dominant tek bir sirkülasyon bölgesinin olmasının basınç dalgalanmalarını azalttığı yorumu yapılabilir. Ek olarak, kavite bölgesinde oluşan kesme tabakasının kararsız hareketleri yapılan tüm çalışmalarda gözlemlenmektedir.

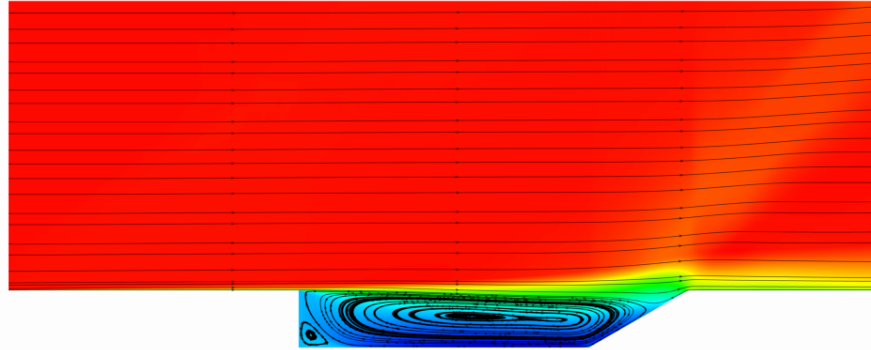
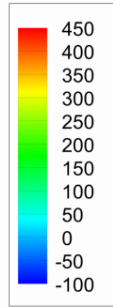
EC45



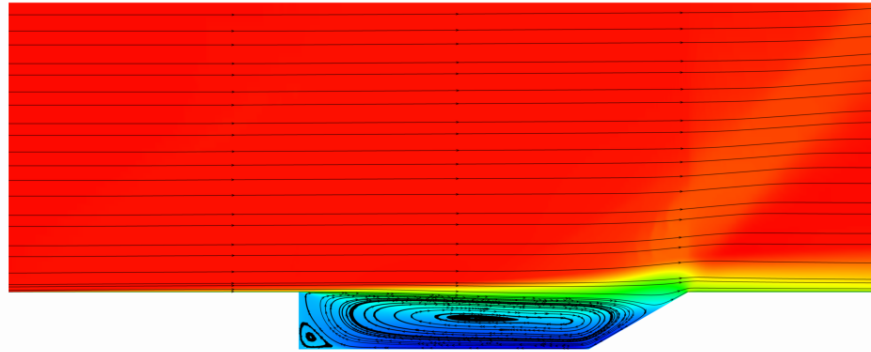
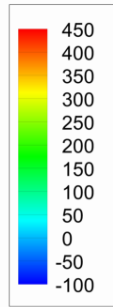
EC15



EC5



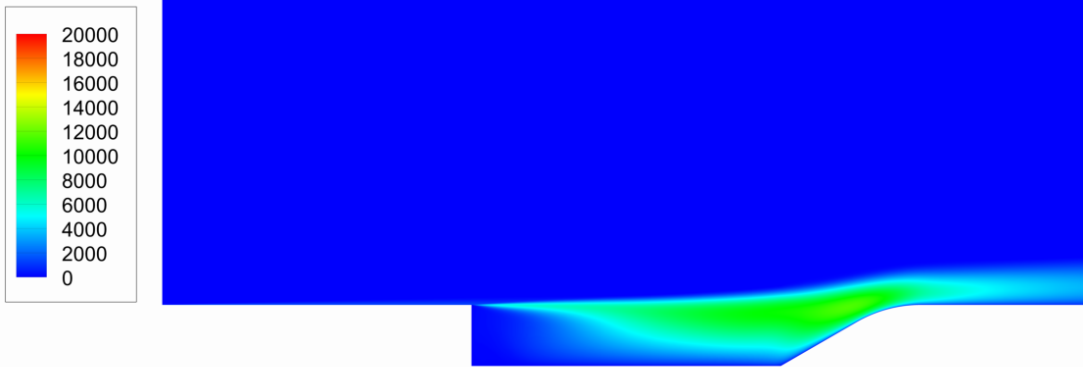
E30



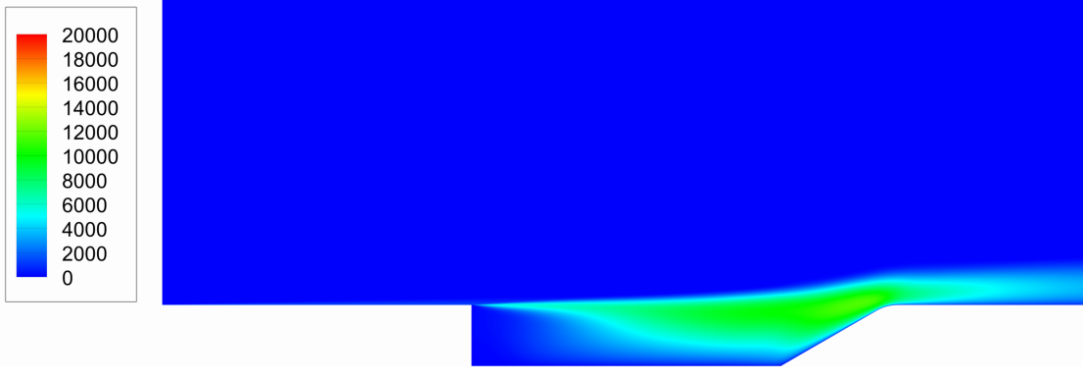
Şekil 6.22. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvar üst köşesine eğrilik verme çalışmalarının vektörel hız dağılımları

Şekil 6.23’de kavite arka duvarının farklı parametrik arka duvar üst bölgelerinden eğrilik verme çalışmaları sonucunda aynı zaman diliminde oluşan türbülanslı kinetik enerji konturları gösterilmiştir. Tüm parametrik çalışmalarda çalkantılı yapının kavite arka duvarında yoğunlaştığı görülmektedir. Kavite bölgesi içerisinde girdap oluşumu ve hareketlenmeleri tetikleyen en önemli etken kesme tabakasının arka duvara çarpmasıdır. Gerçekleştirilen eniyileştirme parametrik çalışmalarında kesme tabakasının arka duvar ile etkileşiminin zayıflatıldığı görülmektedir.

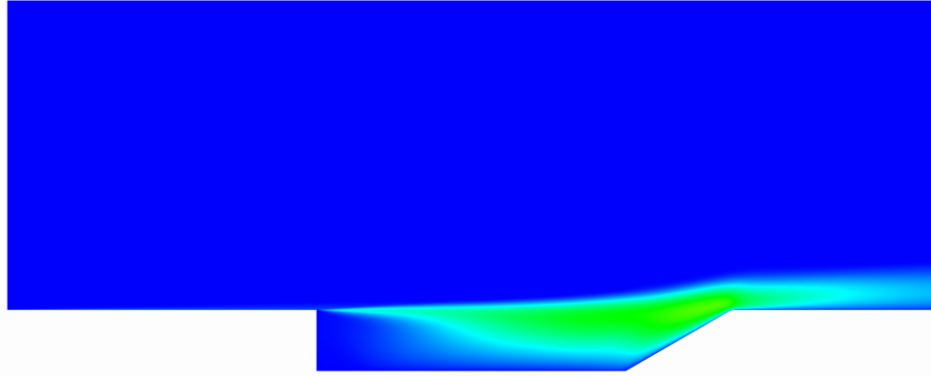
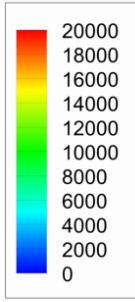
EC45



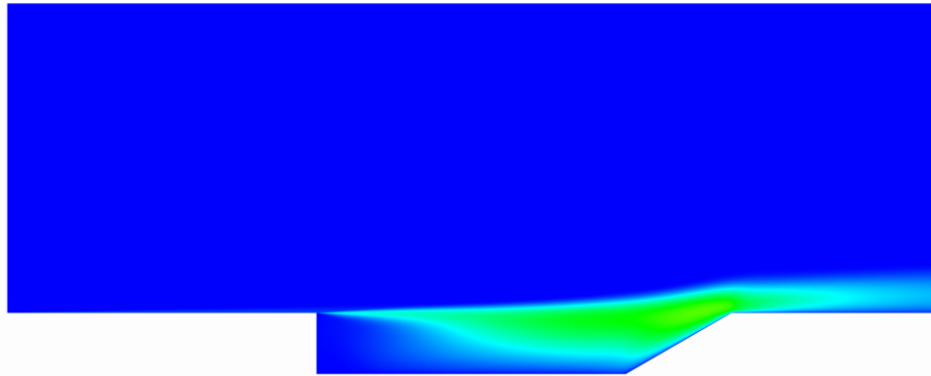
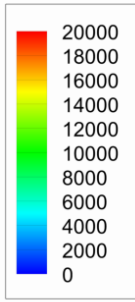
EC15



EC5

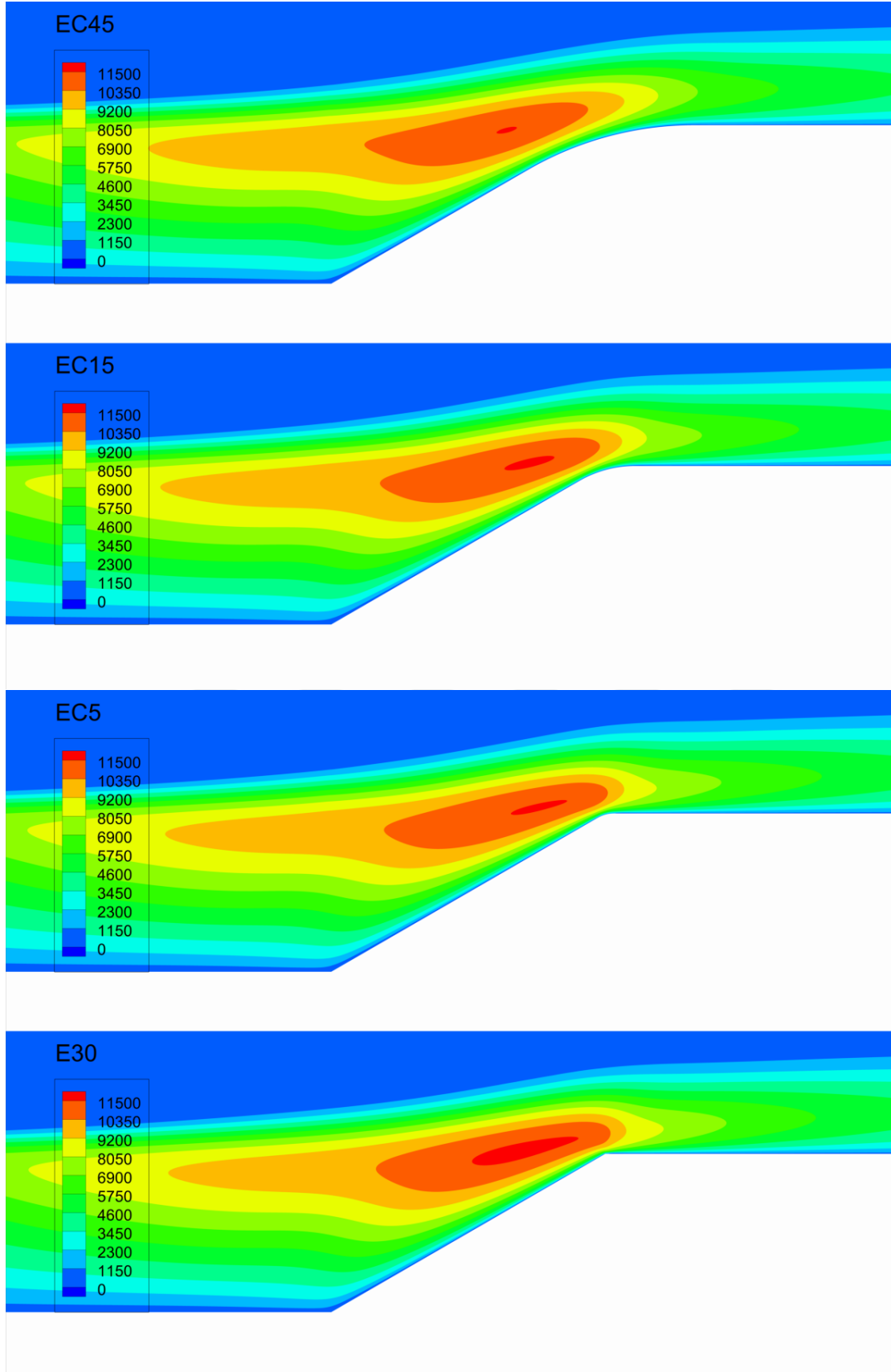


E30



Şekil 6.23. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvar üst köşesine eğrilik verme çalışmalarının türbülanslı kinetik enerji konturları

Şekil 6.24’de kavite arka duvarının farklı parametrik arka duvar üst noktalarından eğrilik verme çalışmaları sonucunda arka duvarda oluşan türbülanslı kinetik enerji konturları gösterilmiştir. Gerçekleştirilen tüm çalışmalarda ses basınç seviyeleri birbirine çok yakındır. Bu yüzden arka duvarda oluşan türbülanslı kinetik enerji konturlarına daha da çok yaklaşılmış olup, türbülanslı kinetik enerji dağılımı legendi değiştirilerek bakılmıştır. Kıyaslama yapılırken parametrik çalışmaların legend değerleri aynı tutulmuştur. Kavite arka duvar üst köşesine verilen eğrilik yarıçapı arttıkça ses basınç seviyelerinde azalmaların arttığını Şekil 6.24’deki türbülanslı kinetik enerji yoğunluk dağılımı doğrulamıştır. Ek olarak kavite arka duvarında alt bölgelere yaklaşıldığında türbülanslı kinetik enerji değerlerinde en düşük değeri veren konfigürasyon EC5 olmuştur. Bu sonuç ses basınç seviyelerinde EC5 konfigürasyonunun en iyi konfigürasyon olarak ortaya çıkmasını doğrulamıştır.



Şekil 6.24. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvar üst köşesine eğrilik verme çalışmalarının arka duvar türbülanslı kinetik enerji konturları

Gerçekleştirilen çalışmalarda parametrik kavite arka duvarına üstten eğrilik verme çalışmaları arasında ses basınç seviyelerinde düşüş sağlayan en iyi konfigürasyon EC5 konfigürasyonu olmuştur. Bu konfigürasyonun kontrolsüz temel konfigürasyon (TK) ile alt duvar konumu için belirli x/L değerlerinde kıyaslaması Çizelge 6.12’de gösterilmiştir. Kavite tabanı boyunca temel konfigürasyona göre ses basınç seviyelerinde ortalama 39,82 dB düşüş sağlanmıştır. Bu düşüş temel konfigürasyona göre ortalama % 26,92 oranında ses basınç seviyelerinde iyileşme sağlamıştır.

Çizelge 6.12. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvar üst köşesine eğrilik verme çalışmaları sonucunda TK ile EC5 konfigürasyonlarının kavite alt duvar konumu için SPL değerleri

Konfigürasyon Adı		Kavite Alt Duvar Konumu					
		$x/L = 0$	$x/L = 0,2$	$x/L = 0,4$	$x/L = 0,6$	$x/L = 0,8$	$x/L = 1$
TK		146,59	137,76	147,82	148,83	148,24	155,59
EC5		103,77	109,11	104,43	108,28	110,33	109,98
	Fark	42,82	28,65	43,39	40,55	37,91	45,61
	Fark (%)	29,21	20,80	29,35	27,25	25,57	29,31

Çizelge 6.13’de kontrolsüz temel konfigürasyon (TK) ile kavite arka duvarına üstten eğim verme çalışmaları arasında en iyi sonuç veren EC5 konfigürasyonunun arka duvar konumu için belirli y/D değerlerinde ses basınç seviyelerindeki kıyaslaması gösterilmiştir. Kavite arka duvarı boyunca temel konfigürasyona göre ses basınç seviyelerinde ortalama 43,50 dB düşüş sağlanmıştır. Bu düşüş yaklaşık olarak % 27,88 oranında ses basınç seviyelerinde iyileşme sağlamıştır.

Çizelge 6.13. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvar üst köşesine eğrilik verme çalışmaları sonucunda TK ile EC5 konfigürasyonlarının kavite arka duvar konumu için SPL değerleri

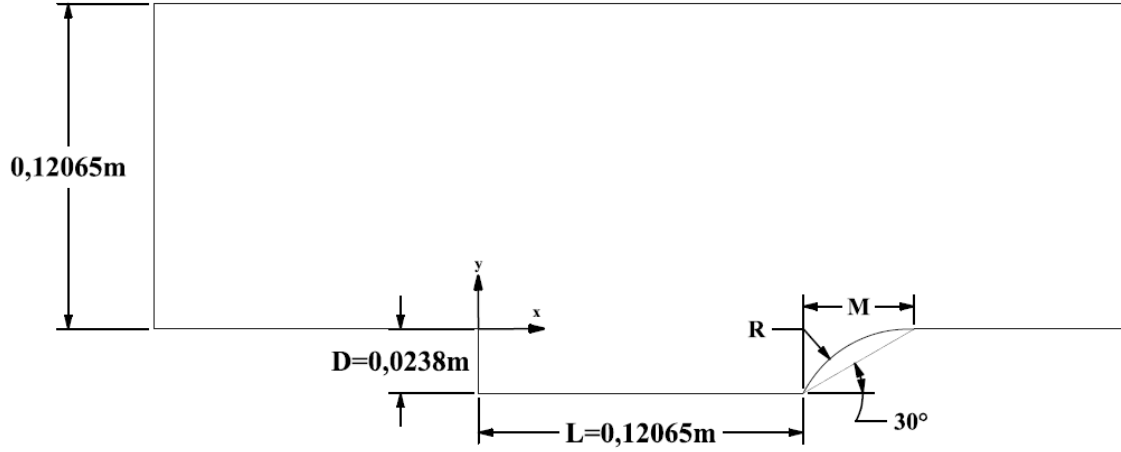
Konfigürasyon Adı		Kavite Arka Duvar Konumu					
		y/D = 0	y/D = -0,2	y/D = -0,4	y/D = -0,6	y/D = -0,8	y/D = -1
TK		157,09	157,39	155,88	154,80	155,50	155,59
EC5		114,44	115,34	112,55	111,57	111,36	109,98
	Fark	42,65	42,05	43,33	43,23	44,14	45,61
	Fark (%)	27,15	26,72	27,80	27,93	28,39	29,31

6.5. Kavite Arka Duvar Eğiminin 30° Olduğu Durumda Arka Duvara Tabandan Eğrilik Verme (Hilal Geometrisi) Çalışmaları

Kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durum için kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme çalışmalarında kullanılan modelin şematik gösterimi Şekil 6.25’de gösterilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada kavite arka duvarının 30° eğimli olduğu durumda kavite arka duvarının alt noktası ile üst noktasına bölüm 6.2’deki parametrik çalışmada oluşturulan hilal geometrileri yerleştirilmiştir. Oluşturulan her yeni eğimli hilal kavite modeline uygun iki boyutlu kavite geometrileri hazırlanıp, elde edilen ağ yapıları doğrulama çalışmalarında nihai olarak seçilen ağ yapısının özellikleri korunarak gerçekleştirilmiştir.

Oluşturulan modellerde eğimli kavite eğrilik oranı (T) boyutsuz sayısı tanımlanmış olup bu tanım kavite derinliğinin (D) kavite arka duvarına tabandan verilen eğrilik oluşum yarıçapına (R) oranı olarak gösterilmiştir. 30° eğimli kavite arka duvarına 30° ’lik eğrilik oluşum açısı ile oluşan hilal geometrisinin yerleştirildiği konfigürasyonun adı TC30, 30° eğimli kavite arka duvarına 60° ’lik eğrilik oluşum açısı ile oluşan hilal geometrisinin yerleştirildiği konfigürasyonun adı TC60, 30° eğimli kavite arka duvarına 90° ’lik eğrilik oluşum açısı ile oluşan hilal geometrisinin yerleştirildiği konfigürasyonun adı TC90 olarak

tanımlanmıştır. Ses basınç seviyeleri cinsinden karşılaştırma yapılacak 30° eğimli kavite çalışması ise E30 olarak gösterilmiştir.



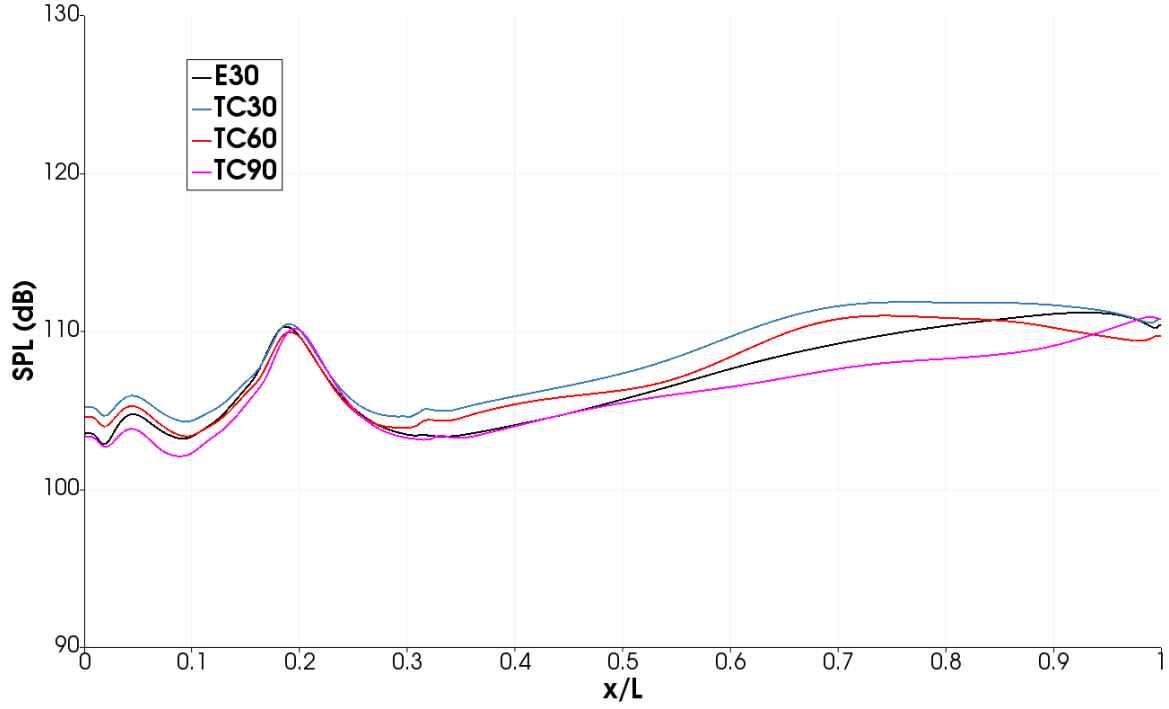
Şekil 6.25. Kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durum için kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme çalışmalarının şematik gösterimi

Çizelge 6.14’de E30 konfigürasyonu referans alınarak kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda kavite arka duvarının alt noktası ile üst noktasına yerleştirilen hilal geometrileri sonucunda oluşan konfigürasyonların özellikleri gösterilmiştir. Oluşturulan yeni konfigürasyonlar için kavite bölgesinde oluşan gürültü seviyeleri incelenmiştir. İnceleme yapılırken konfigürasyonların, kontrolsüz temel konfigürasyonla (TK) kıyaslaması kavite alt ve arka duvarı için ses basınç seviyeleri cinsinden sunulmuştur.

Çizelge 6.14. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvara tabandan eğrilik verme çalışmaları konfigürasyon değerleri

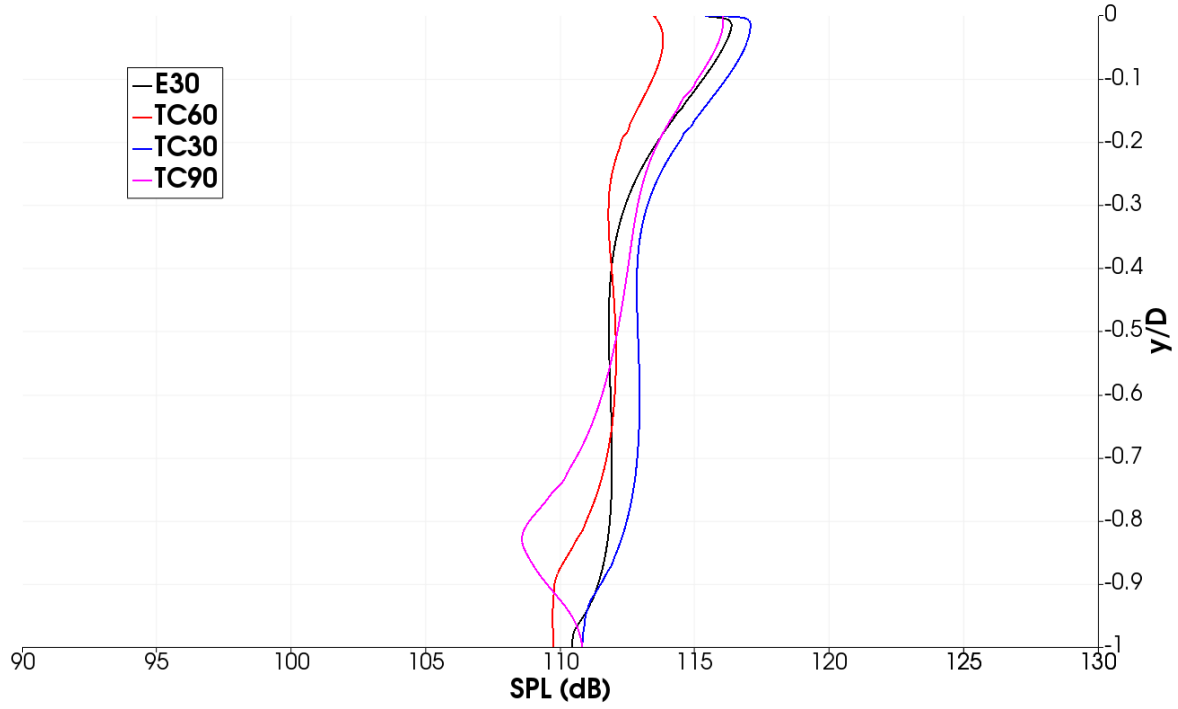
Konfig. Numarası	Kavite Uzunluğu L (m)	Kavite Derinliği D (m)	Kavite Eğim Uzunluğu M (m)	Kavite Arka Duvar Tabandan Eğrilik Oluşum Yarıçapı R (m)	Eğimli Kavite Eğrilik Oranı T=D/R	Konfig. Adı
1	0,12065	0,0238	0,04122	0,09196	0,26	TC30
2	0,12065	0,0238	0,04122	0,0476	0,50	TC60
3	0,12065	0,0238	0,04122	0,03366	0,71	TC90
4	0,12065	0,0238	0,04122	-	-	E30

Şekil 6.26'da eniyileştirme parametrik çalışmalarında kavite alt duvarında oluşan ses basınç seviyelerinin alt duvar konumuna göre dağılımları gösterilmiştir. Kavite alt duvar konumu boyutsuzlaştırılarak Şekil 6.26'da gösterilmiştir. Kavite tabanı boyunca 30° eğimli arka duvara yerleştirilen hilal geometrisinin oluşum açısı arttıkça gürültü miktarları azalmıştır. Kavite tabanı boyunca ses basınç seviyeleri açısından en iyi sonucu veren konfigürasyon TC90 konfigürasyonu olmuştur.



Şekil 6.26. Kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durum için kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme çalışmalarının arka duvar konumuna göre SPL grafiği

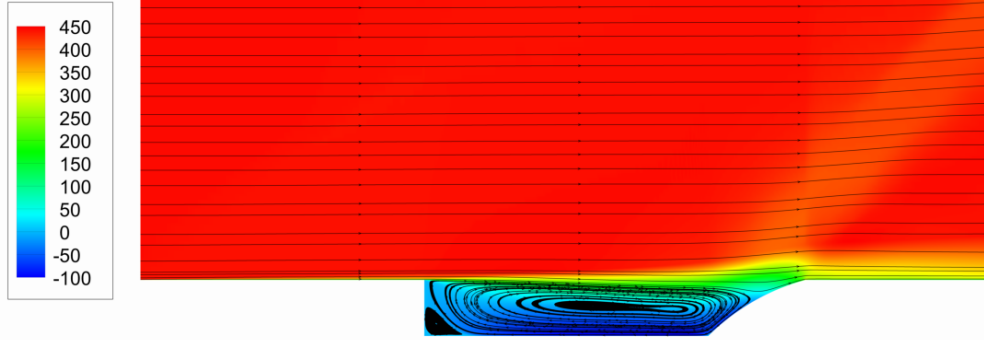
Şekil 6.27’de eniyileştirme parametrik çalışmalarında kavite arka duvarında oluşan ses basınç seviyelerinin arka duvar konumuna göre dağılımları gösterilmiştir. Kavite arka duvar konumu boyutsuzlaştırılarak Şekil 6.27’de çizdirilmiştir. Tüm parametrik çalışmalarda elde edilen gürültü seviyeleri benzerdir. Kavite alt duvarında olduğu gibi hilal geometrisinin oluşum açısıyla direkt orantılı bir dağılım söz konusu olmamıştır. Kavite arka duvar alt köşesinden orta bölgelere doğru en iyi konfigürasyon TC90 iken üst bölgelere doğru TC60 konfigürasyonu daha iyi sonuçlar vermiştir. Kavite alt tabanında TC90 konfigürasyonunun baskın bir şekilde iyi olmasından dolayı arka duvar geometrisinde de TC90 konfigürasyonunun seçilmesi uygundur.



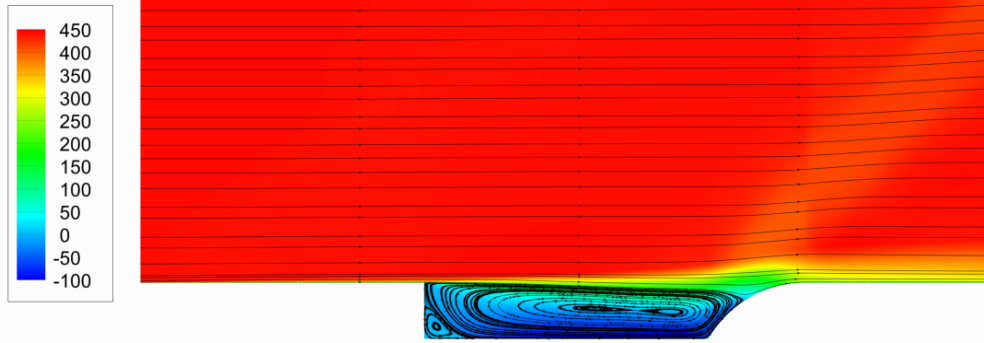
Şekil 6.27. Kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durum için kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme çalışmalarının arka duvar konumuna göre SPL grafiği

Şekil 6.28’de kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durum için kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme çalışmalarının x yönündeki vektörel hız dağılımları gösterilmiştir. Her bir parametrik çalışmada kesme tabakasının dinamik yapısı, kesme tabakası ile arka duvarın etkileşimi ve akışı domine eden büyük tekli girdap yapısı ile ön duvar alt köşesinde oluşan küçük tekli girdap yapısı gözlemlenmiştir. Ses basınç seviyelerinde en iyi sonucu veren TC90 konfigürasyonu için kesme tabakasının kavite dışarısında ayrıldığı görülmektedir. Ayrılan bu yapıdan dolayı kavite arka duvar çıkışında oluşan şokun kalınlığı azalmıştır. Kesme tabakasının kavite dışarısında çıkış duvarı ile ayrılabilmenin kavite bölgesi içerisindeki gürültü seviyelerinde iyileşmelere sebep olduğu yorumu ses basınç seviyeleri grafiğindeki sonuçlar ile tutarlıdır.

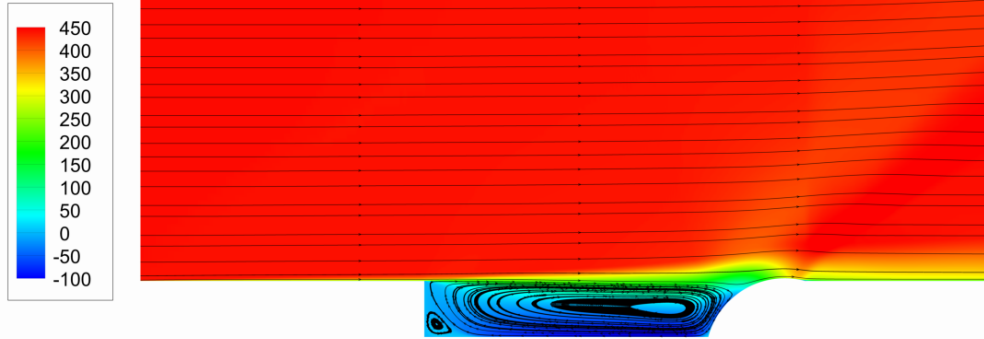
TC30



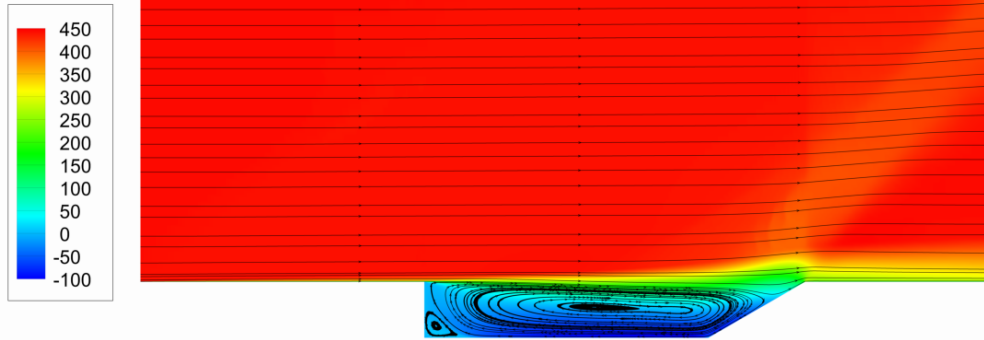
TC60



TC90



E30

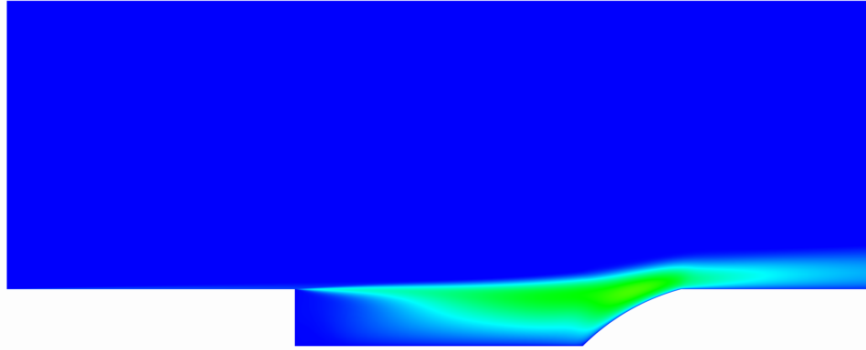
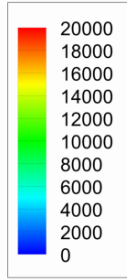


Şekil 6.28. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme çalışmalarının vektörel hız dağılımları

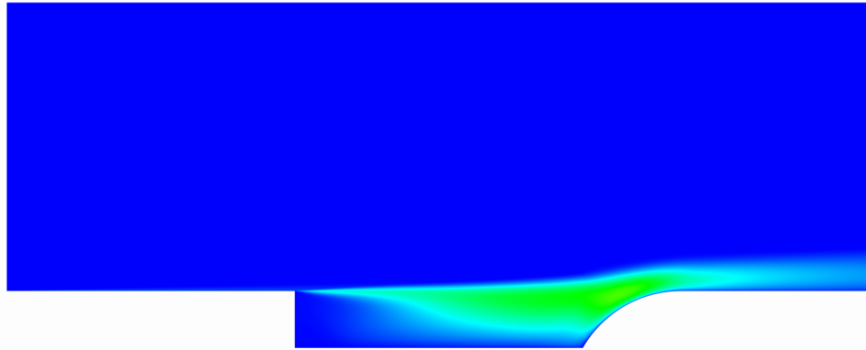
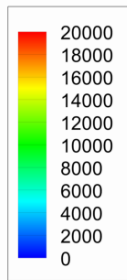
Şekil 6.29’da kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme çalışmalarının türbülanslı kinetik enerji konturları sunulmuştur. Konturlar incelendiğinde akışta gürültüye sebep olan basınç dalgalanmalarının arka duvara doğru yoğunlaştığı ve ardından alt duvara doğru yöneldiği görülmektedir. Tüm eniyileştirme çalışmaları için türbülanslı kinetik enerji dağılımları benzer yapıda görülmektedir. TC90 konfigürasyonunda arka duvarda yoğunlaşan salınım yapılarının diğer konfigürasyonlara göre daha az yoğun olduğu konturlardan anlaşılmaktadır. Daha net bir şekilde yorum yapabilmek ve gözlemlemek için Şekil 6.30’da kavite bölgesi arka duvarına yaklaşılaraq türbülanslı kinetik enerji konturları çizdirilmiştir.



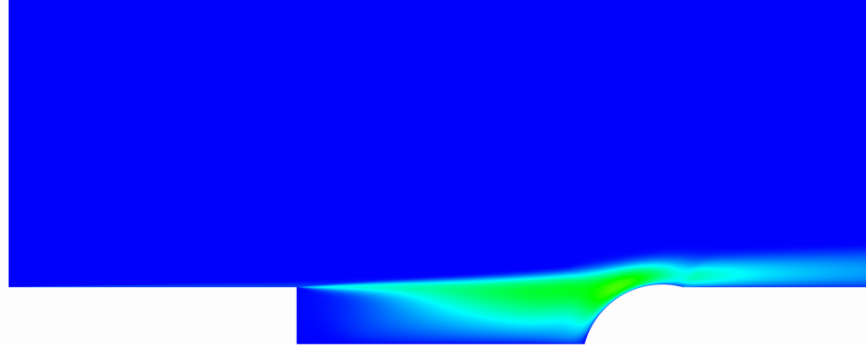
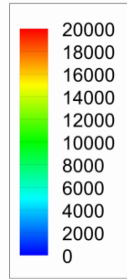
TC30



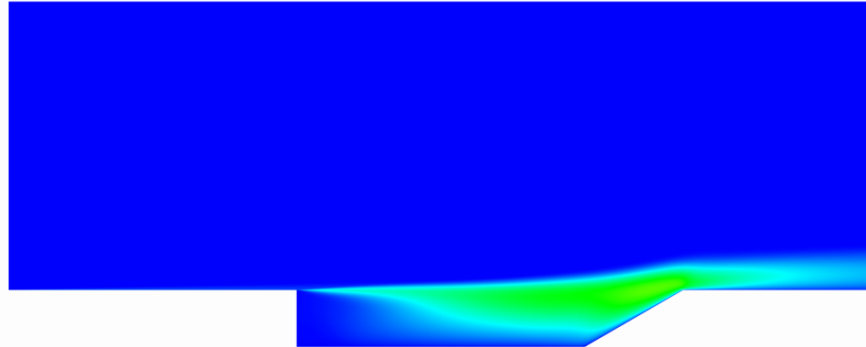
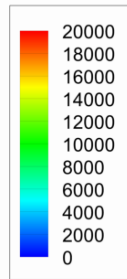
TC60



TC90



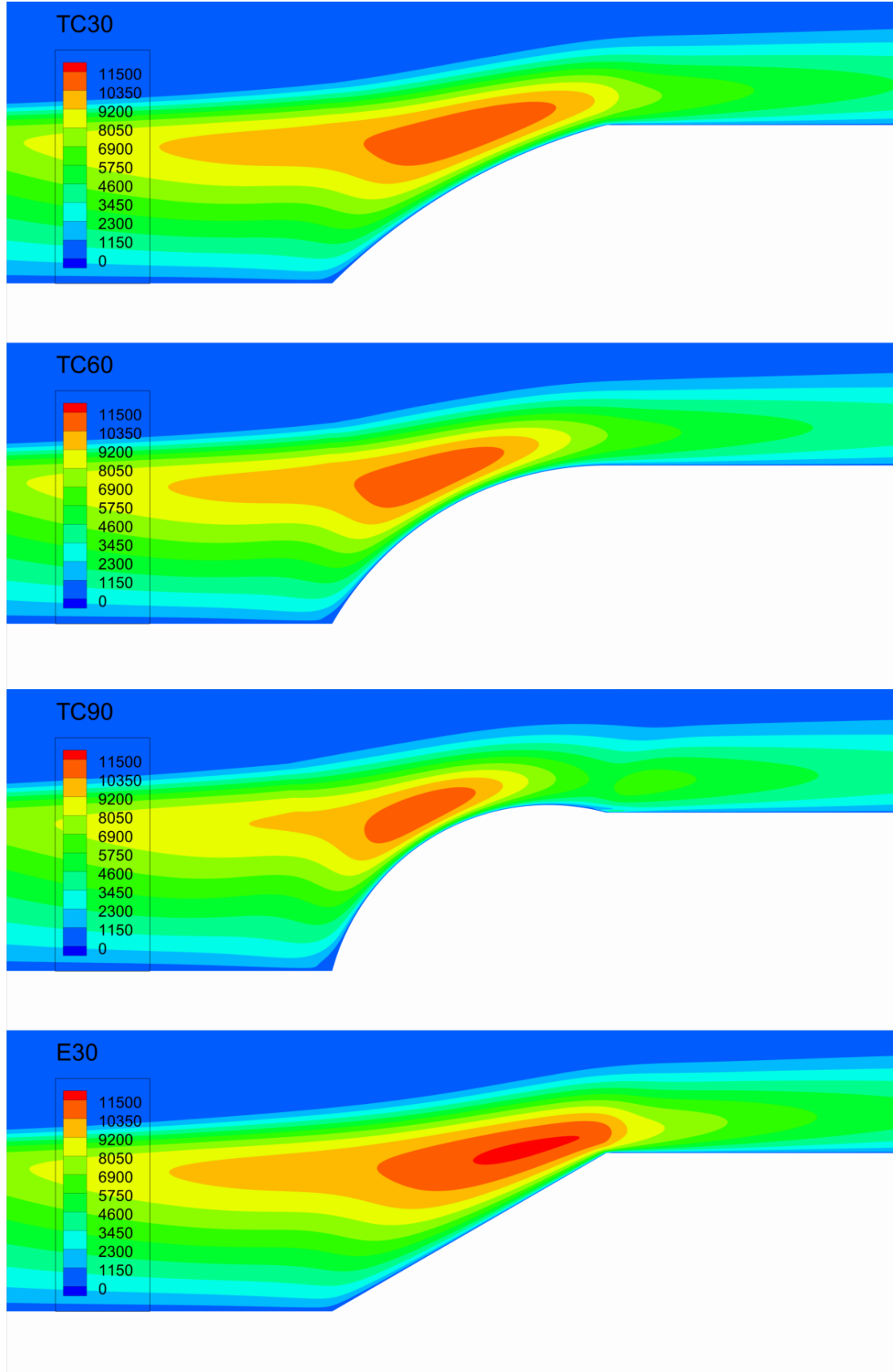
E30



Şekil 6.29. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme çalışmalarının türbülanslı kinetik enerji konturları

Şekil 6.30’da kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme çalışmalarının arka duvara yaklaşarak türbülanslı kinetik enerji konturları gösterilmiştir. Çalışmalar incelendiğinde kavite arka duvarının daha dik ve eğrilik yapısının fazla olduğu durumda çalkantıların azaldığı görülmektedir. E30 konfigürasyonunda arka duvarda oluşan türbülanslı kinetik enerji yapısı en yoğun şekilde kendini göstermektedir. Kesme tabakasının kavite arka duvarı çıkışında daha yukarıya yönlendirildiği TC90 konfigürasyonunda ise yoğunluğu en az olan bir türbülanslı kinetik enerji dağılım grafiği görülmektedir. TC90 konfigürasyonunun arka duvarında oluşan düzensiz ve çalkantılı yapı dağılımının en az olması ses basınç seviyeleri kıyaslama grafiklerinde çıkan sonuçları doğrulamaktadır.





Şekil 6.30. Kavite bölgesi arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme çalışmalarının arka duvar türbülanslı kinetik enerji konturları

Çalışma kapsamında incelenen kavite arka duvar boyuna tabandan eğrilik verme (tabandan hilal geometrisi yerleştirme) konfigürasyonları arasından ses basınç seviyelerinde düşüş sağlayan en iyi konfigürasyon TC90 konfigürasyonu olmuştur. Bu konfigürasyonun kontrolsüz temel konfigürasyon (TK) ile alt duvar konumu için belirli x/L değerlerinde ses basınç seviyeleri cinsinden kıyaslaması Çizelge 6.15’de gösterilmiştir. Kavite tabanı boyunca temel konfigürasyona göre ortalama ses basınç seviyelerinde 40,58 dB düşüş sağlanmıştır. Bu düşüş temel konfigürasyona göre ortalama % 27,41 oranında ses basınç seviyelerinde iyileşme sağlamıştır.

Çizelge 6.15. Kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvara tabandan eğrilik verme çalışmaları sonucunda TK ile TC90 konfigürasyonlarının kavite alt duvar konumu için SPL değerleri

Konfigürasyon Adı		Kavite Alt Duvar Konumu					
		$x/L = 0$	$x/L = 0,2$	$x/L = 0,4$	$x/L = 0,6$	$x/L = 0,8$	$x/L = 1$
TK		146,59	137,76	147,82	148,83	148,24	155,59
TC90		103,62	110,75	104,01	105,94	107,99	109,02
	Fark	42,97	27,01	43,81	42,89	40,25	46,57
	Fark (%)	29,31	19,61	29,64	28,82	27,15	29,93

Çizelge 6.16’da kontrolsüz temel konfigürasyon (TK) ile kavite arka duvarına tabandan eğrilik verilen çalışmalar arasından en iyi sonuç veren TC90 konfigürasyonunun arka duvar konumu için belirli y/D değerlerinde ses basınç seviyelerindeki kıyaslaması gösterilmiştir. Kavite arka duvarı boyunca temel konfigürasyona göre ses basınç seviyelerinde ortalama 43,90 dB düşüş sağlanmıştır. Bu düşüş yaklaşık olarak % 28,14 oranında ses basınç seviyelerinde iyileşme sağlamıştır.

Çizelge 6.16. Kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durumda arka duvara tabandan eğrilik verme çalışmaları sonucunda TK ile TC90 konfigürasyonlarının kavite arka duvar konumu için SPL değerleri

Konfigürasyon Adı		Kavite Arka Duvar Konumu					
		y/D = 0	y/D = -0,2	y/D = -0,4	y/D = -0,6	y/D = -0,8	y/D = -1
TK		157,09	157,39	155,88	154,80	155,50	155,59
TC90		115,36	113,42	111,82	111,06	111,02	109,89
	Fark	41,73	43,97	44,06	43,46	44,48	45,7
	Fark (%)	26,56	27,94	28,27	28,08	28,61	29,37

Tez kapsamında temel parametrik çalışmalar sonucunda gürültü seviyelerini en çok düşürebilen çalışma olan E30 konfigürasyonunun eniyileştirme çalışmaları iki adet parametrik çalışma ile gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmalardan birincisi E30 konfigürasyonuna arka duvar üst bölgesinden eğrilik verme (EC) çalışmalarıdır. Kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durum için kavite arka duvarının üst köşesinden eğrilik verme çalışmalarında en iyi sonuç kavite arka duvar üst köşesine 5 mm eğrilik verilen EC5 konfigürasyonu olmuştur. EC5 konfigürasyonu temel kontrolsüz konfigürasyona (TK) göre kavite alt duvarı için ses basınç seviyelerinde ortalama 39,82 dB (temel konfigürasyona göre % 26,92) düşüş sağlamıştır. EC5 konfigürasyonu kavite arka duvarı için ise temel kontrolsüz konfigürasyona (TK) göre ses basınç seviyelerinde ortalama 43,50 dB (temel konfigürasyona göre % 27,88) iyileşme sağlamıştır.

Eniyileştirme çalışmalarının ikincisi ise E30 konfigürasyonun arka duvarına tabandan eğrilik verme (TC) çalışmalarıdır. Kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durum için kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme çalışmalarının en iyi sonucu kavite arka duvarına 90° 'lik eğrilik oluşum açısı ile oluşan hilal geometrisinin yerleştirildiği TC90 konfigürasyonu olmuştur. TC90 konfigürasyonu temel kontrolsüz konfigürasyona (TK)

göre kavite alt duvarı için ses basınç seviyelerinde ortalama 40,58 dB (temel konfigürasyona göre % 27,41) iyileşme sağlamıştır. TC90 konfigürasyonu kavite arka duvarı için temel kontrolsüz konfigürasyona (TK) göre ses basınç seviyelerinde ortalama 43,90 dB (temel konfigürasyona göre % 28,14) düşüş sağlamıştır.

Tüm parametrik çalışmalar kıyaslandığında gürültü seviyelerini azaltan en iyi kavite geometrisi TC90 konfigürasyonu olmuştur. Tezin geri kalan kısmında TC90 konfigürasyonu için süpersonik rejimde belirli Mach sayılarının kavite akışına etkileri incelenecektir.

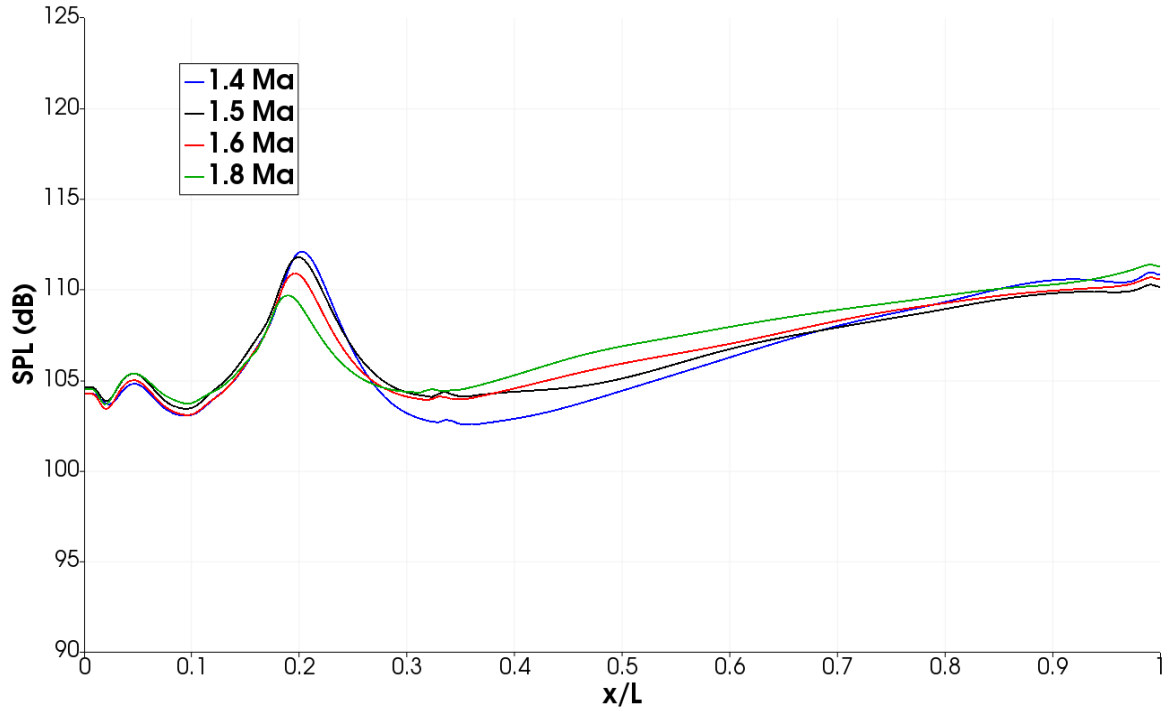
6.6. 30° Eğimli Kavite Arka Duvarına 90°'lik Eğrilik Oluşum Açısı ile Oluşan Hilal Geometrisinin Yerleştirildiği TC90 Konfigürasyonu için Süpersonik Rejimde Mach Sayısının Akışa Etkileri

Bu bölümde tez kapsamında incelenen parametrik çalışmalarda ses basınç seviyeleri cinsinden en iyi sonuç veren TC90 kavite konfigürasyonu için süpersonik rejimde belirli Mach sayılarının akışa etkileri incelenecektir. 1,5 Mach ile yapılan çalışma gerçekleştirilen mevcut çalışma olup, süpersonik rejimde 1,4, 1,6 ve 1,8 Mach rejimleri için çalışmalar yürütülecektir. Çizelge 6.17'de incelenen süpersonik rejimdeki parametrik Mach sayılarının akış özellikleri gösterilmiştir. Parametrik çalışma için Çizelge 5.1'de gösterilen Kaufman ve Clark'ın [14] deneysel çalışma koşulları kullanılmış olup, incelenmek istenen serbest akış hızları akış rejimine göre güncellenmiştir. Simülasyonlarda oluşturulan ağ yapıları doğrulama çalışmalarında nihai olarak seçilen ağ yapısının özellikleri korunarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.17. Süpersonik rejimdeki parametrik çalışmaların akış özellikleri

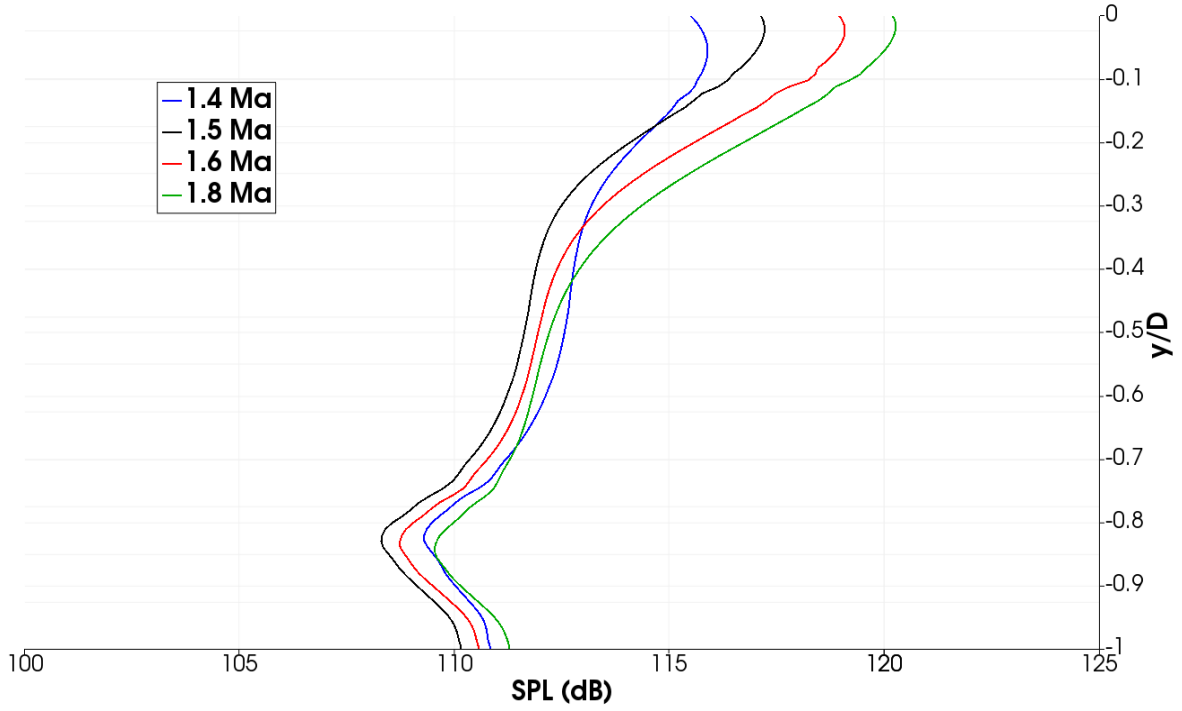
Konfigürasyon Numarası	Akış Rejimi (Mach)	Serbest Akış Hızı (m/s)	Konfigürasyon Adı
1	1,4	414	TC90
2	1,5	444	TC90
3	1,6	474	TC90
4	1,8	533	TC90

Şekil 6.31’de TC90 konfigürasyonunun süpersonik rejimde farklı Mach sayılarında kavite alt duvarında oluşan ses basınç seviyelerinin boyutsuz kavite alt duvar konumuna göre dağılımları gösterilmiştir. Parametrik çalışmalar incelendiğinde, serbest akış hızı arttıkça kavite tabanında oluşan gürültü seviyeleri artmıştır. Kavite alt duvarının sadece $x/L = 0,2$ konumunda genel trendin aksine 1,4 Mach rejiminde ses basınç seviyeleri daha yüksek gözlemlenmiştir. Perng ve Dolling [22]’in yapmış oldukları çalışmada kesme tabakası dinamiği ile kavite akustiği arasındaki ilişkinin Mach sayısı azaldıkça belirli konumlarda artabileceğini vurgulanmıştır. Bu doğrultuda $x/L = 0,2$ konumunda elde edilen sonuç tutarlıdır. Parametrik çalışmaların tamamında oluşan trend benzer olup ses basınç seviyeleri arasındaki fark çok azdır.



Şekil 6.31. TC90 konfigürasyonunun farklı Mach sayılarında kavite alt duvarı için SPL grafiği

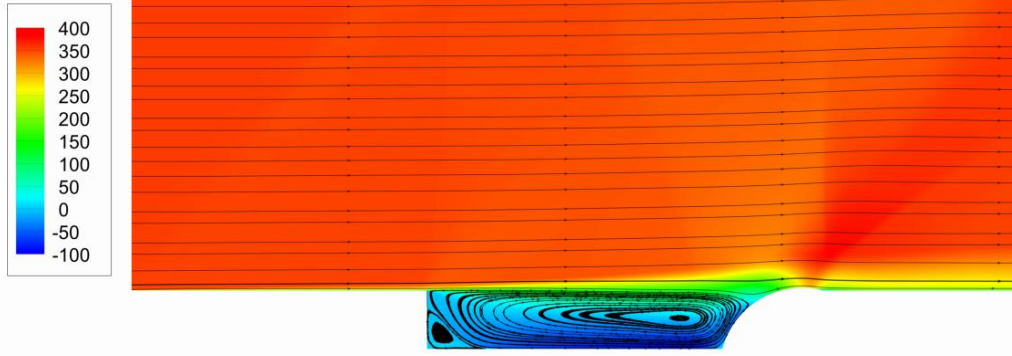
Şekil 6.32’de TC90 konfigürasyonunun süpersonik rejimdeki farklı Mach sayılarında kavite arka duvarında oluşan ses basınç seviyelerinin boyutsuz kavite arka duvar konumuna göre dağılımları gösterilmiştir. Sonuçlara göre, arka duvarın büyük çoğunluğunda 1,8 Mach rejimindeki ses basınç seviyeleri değerleri diğer Mach rejimlerinden yüksek çıkmıştır. Kavite arka duvarı için 1,4 Mach rejimindeki simülasyonda kavite arka duvarının $y/D = -0,36$ konumu ile $y/D = -1$ konumu arasında ses basınç seviyeleri 1,5 Mach ve 1,6 Mach rejimlerine göre 1-2 dB daha fazla çıkmıştır. Kavite arka duvarı için farklı hız rejimlerinde gerçekleştirilen tüm çalışmalarda ses basınç seviyeleri arasındaki fark azdır. Bunun sonucu olarak süpersonik rejim için belirlenen kritik bir Mach sayısı değeri süpersonik rejimde akışı anlayıp, tasarıma girdi sağlamak için gerekli olan diğer hız rejimlerini temsil edebildiği yorumu yapılabilir.



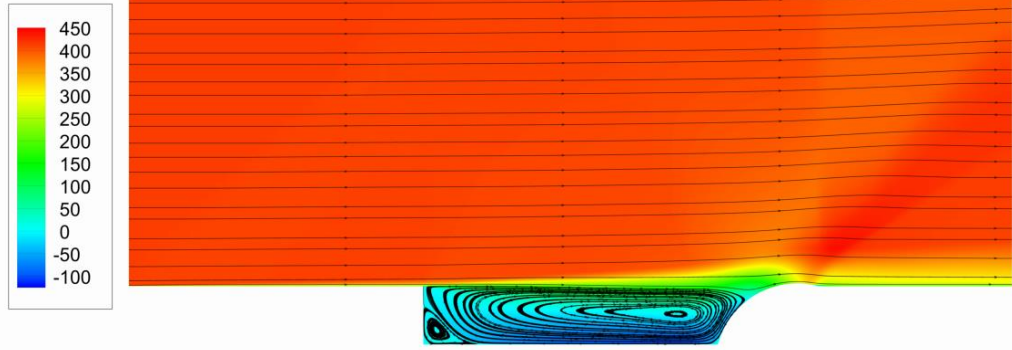
Şekil 6.32. TC90 konfigürasyonunun farklı Mach sayılarında kavite arka duvarı için SPL grafiği

Şekil 6.33'de TC90 konfigürasyonunun süpersonik rejimde sırasıyla 1,4 Mach, 1,5 Mach, 1,6 Mach ve 1,8 Mach hız rejimleri için vektörel hız dağılımları gösterilmiştir. Gerçekleştirilen farklı hız rejimlerindeki çalışmalarda kesme tabakasının durağan olmayan yapısı, kesme tabakası ile arka duvarın etkileşimi ve akışı domine eden büyük tekli girdap yapısı ile ön duvar alt köşesinde oluşan küçük tekli girdap yapısı gözlemlenmiştir. Serbest akım hızı arttıkça kavite çıkışında gözlemlenen zayıf eğik şok daha belirgin hale gelmiştir. Kavite arka duvar çıkışında oluşan şok bölgesinden sonra kesme tabakasının ayrılması parametrik çalışmaların tamamında gözlemlenmiştir.

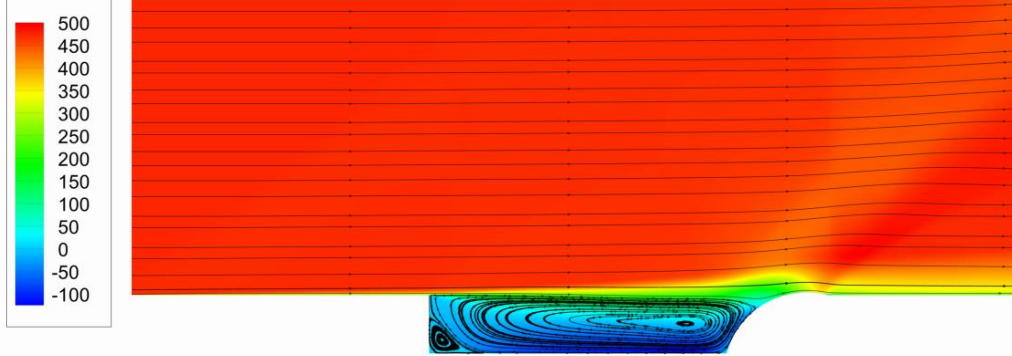
TC90



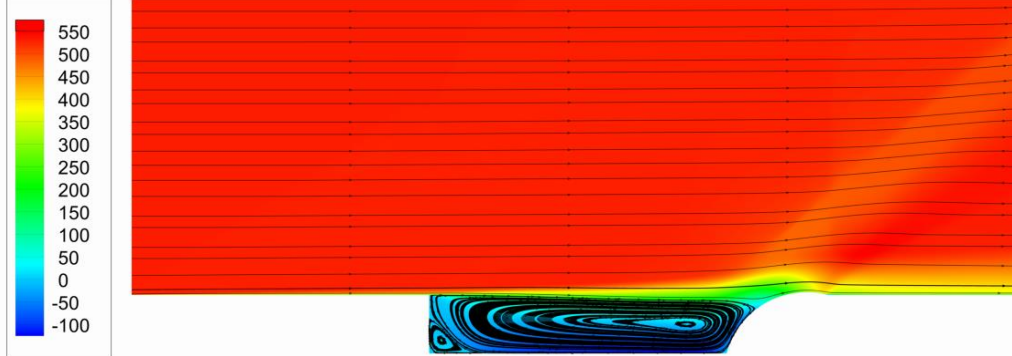
TC90



TC90

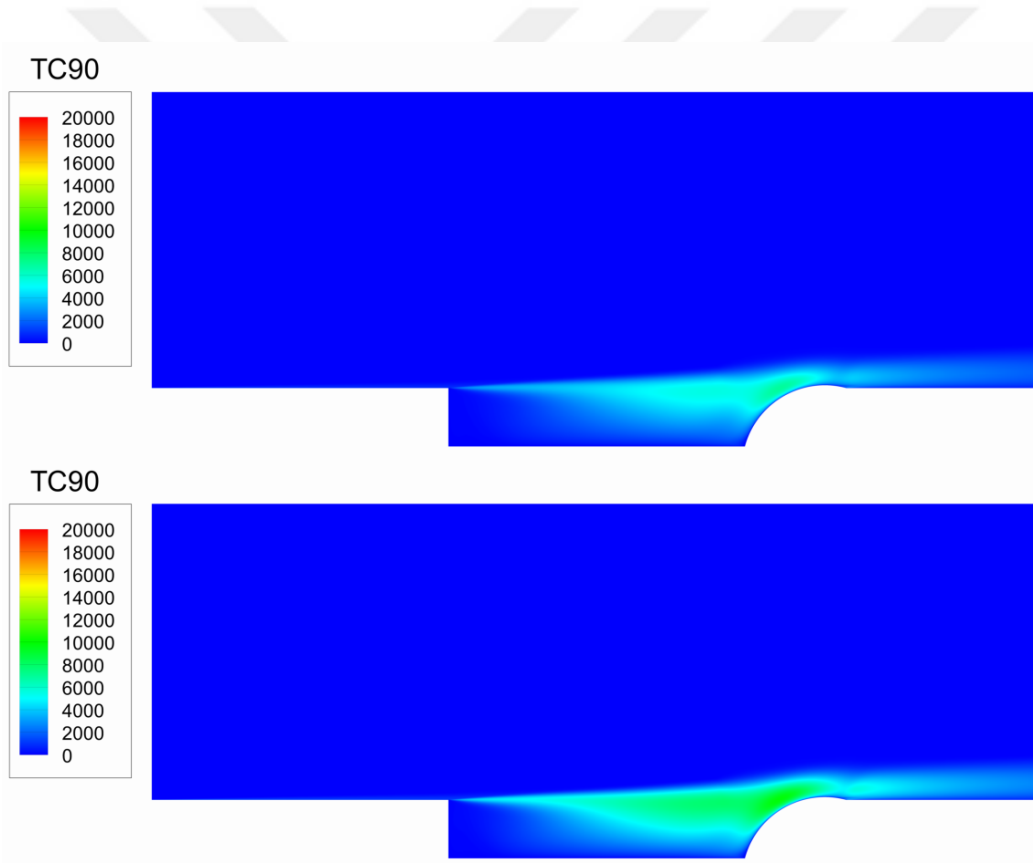


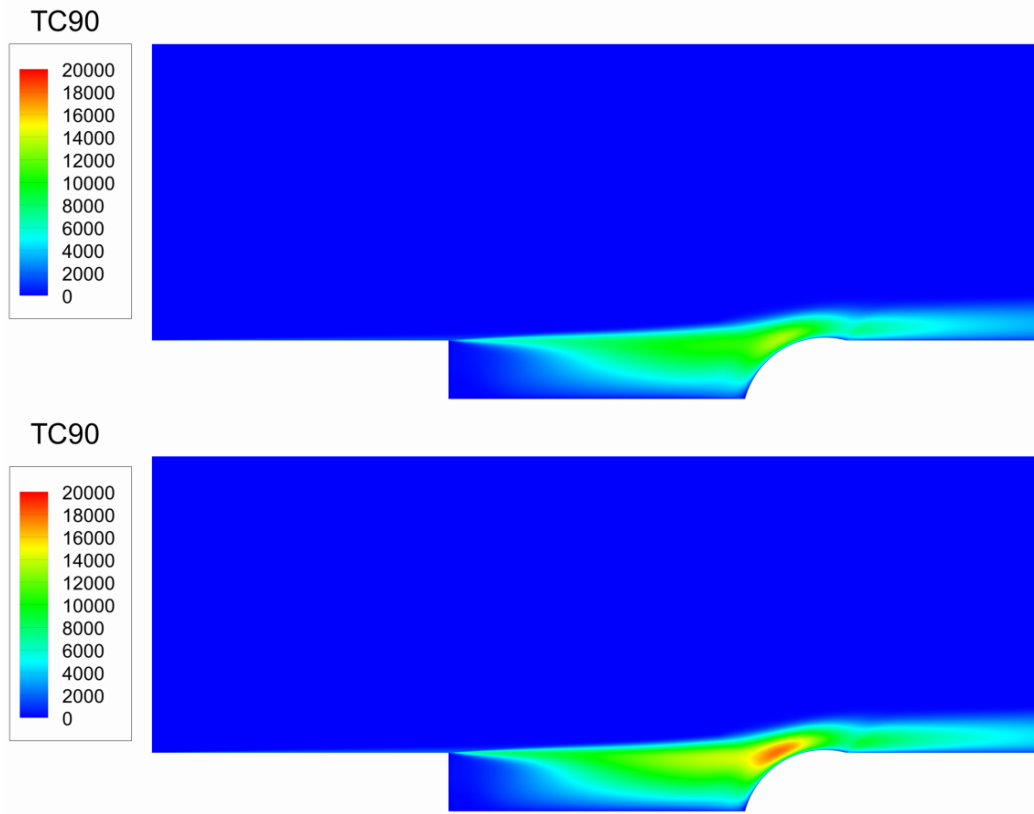
TC90



Şekil 6.33. TC90 konfigürasyonunun süpersonik rejimde farklı Mach sayılarında vektörel hız dağılımları

Şekil 6.34’de TC90 konfigürasyonunun süpersonik rejimde sırasıyla 1,4 Mach, 1,5 Mach, 1,6 Mach ve 1,8 Mach hız rejimleri için türbülanslı kinetik enerji dağılımları gösterilmiştir. Süpersonik kavite akışının karakteristiğini belirleyen en önemli parametrelerden bir tanesi serbest akım hızıdır. Serbest akım hızının değiştiği konturlar incelendiğinde kavite bölgesinde gürültüye sebep olan basınç dalgalanmalarının kavite arka duvarına, ardından kavite alt duvarına doğru yoğunlaştığı görülmektedir. Kavite bölgesinde serbest akış hızının artması türbülanslı kinetik enerji yoğunluklarının artmasına sebep olmuştur. Böylece kavite bölgesinde ses basınç seviyeleri artmıştır. 1,8 Mach rejiminde özellikle arka duvarın üst bölgelerindeki türbülanslı çalkantılı yapıların yoğunluğu ses basınç seviyelerinin karşılaştırıldığı grafiklerde çıkan sonuçlar ile tutarlıdır.





Şekil 6.34. TC90 konfigürasyonunun süpersonik rejimde farklı Mach sayılarında türbülanslı kinetik enerji konturları

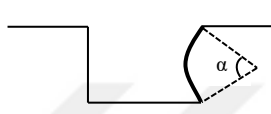
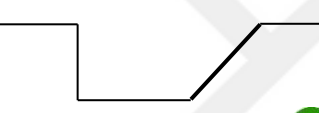
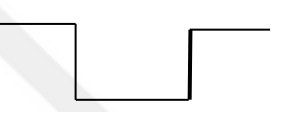
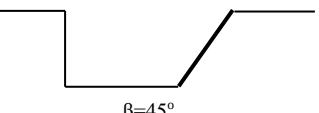
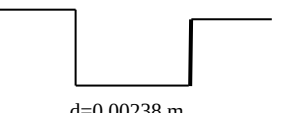
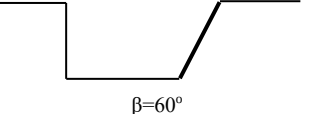
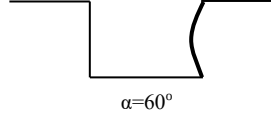
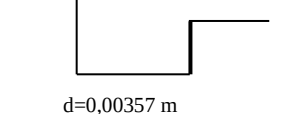
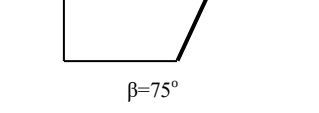
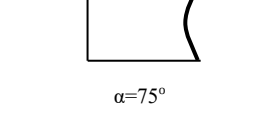
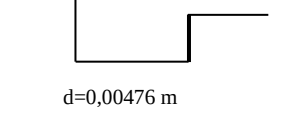
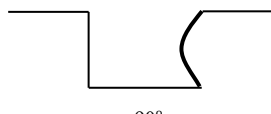
6.7. Parametrik Çalışma Sonuçlarının Toplu Değerlendirilmesi

Bu bölümde tez kapsamında gerçekleştirilen tüm parametrik çalışmalar toplu bir şekilde değerlendirilmiştir. Çizelge 6.18 ve Çizelge 6.19’da gösterilen parametrik kavite arka duvarı geometrileri sayısal çalışmada aşama aşama ilerlenen metodolojiyi özetlemektedir.

İlk olarak temel kavite konfigürasyonu için arka duvara belirli açılarda eğim verme, arka duvarı belirli açılarda oluşan hilal şekilleri ile oluşturma ve arka duvarı belirli oranlarda kısaltma teknikleri ile parametrik sayısal çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmalar sonucunda her bir kavite arka duvarında yapılan değişikliklerde temel konfigürasyona göre gürültü seviyelerinde iyileşmeler sağlanmıştır. Bu iyileşmelerden en iyi sonucu veren konfigürasyon kavite arka duvarına 30°’lik açı verilen E30 konfigürasyonu olmuştur.

Çizelge 6.18. Temel kavite konfigürasyonu parametrik çalışma metotları

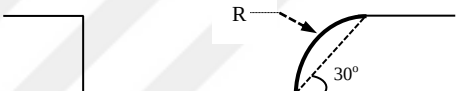
 Temel Kavite Konfigürasyonu		
 Konfigürasyon 1	 Konfigürasyon 2	 Konfigürasyon 3
1a. ★ ★ ★ ★  $\beta=30^\circ$	2a. ★  $\alpha=30^\circ$	3a. ★  $d=0,0019 \text{ m}$
1b. ★ ★ ★  $\beta=45^\circ$	2b. ★  $\alpha=45^\circ$	3b. ★ ★  $d=0,00238 \text{ m}$
1c. ★ ★  $\beta=60^\circ$	2c. ★ ★  $\alpha=60^\circ$	3c. ★ ★  $d=0,00357 \text{ m}$
1d. ★  $\beta=75^\circ$	2d. ★ ★  $\alpha=75^\circ$	3d. ★ ★ ★  $d=0,00476 \text{ m}$
	2e. ★ ★ ★  $\alpha=90^\circ$	

Ses basınç seviyelerine parametrik çalışma tekniklerinin etkileri kıyaslandığında kavite arka duvarına eğim verme ve kavite arka duvarına hilal şekli verme teknikleri kavite arka duvar boyunu kısaltma tekniğinden daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu yüzden parametrik çalışmaların en iyi sonuç veren konfigürasyonu olan kavite arka duvarına 30°'lik açı verilen E30 konfigürasyonuna eğim verme ve hilal şekli oluşturma teknikleri uygulanmıştır. Bu iki adet teknikten ilki kavite arka duvarının 30° eğimli olduğu yerden kavite arka duvarına tabandan hilal şekli verme, ikincisi ise kavite arka duvarının 30° eğimli olduğu durumda kavite arka duvar üst köşesinden hilal şekli verme çalışmalarıdır.

Çizelge 6.19'da eniyileştirme parametrik çalışmaları kapsamında izlenen metodolojiyi gösteren değerlendirme tablosu sunulmuştur.

Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda 30°'lik açı verilen E30 konfigürasyonunun kavite arka duvarına yapılan değişikliklerde temel E30 konfigürasyonuna göre gürültü seviyelerinde iyileşmeler sağlanmıştır. Bu iyileşmelerden en iyi sonucu veren konfigürasyon, 30° eğimli kavite arka duvarına tabandan 90°'lik eğrilik oluşum açısı ile oluşan hilal geometrisinin yerleştirildiği konfigürasyon (TC90) olmuştur. Bu konfigürasyonun tabandan oluşturduğu hilal geometrisinin yarıçapı 0,03366 m'dir.

Çizelge 6.19. Kavite arka duvarına 30°'lik açı verilen E30 konfigürasyonu parametrik çalışma tablosu

 Konfigürasyon 1a.	
 Konfigürasyon 4	 Konfigürasyon 5
4a.  R=0,045 m	5a.  R=0,09196 m
4b.  R=0,015 m	5b.  R=0,0476 m
4c.  R=0,005 m	5c.  R=0,03366 m
4d.  R=0,001 m	

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, yeni nesil savaş uçaklarının mühimmat bıraktıkları bölgeyi temsil eden kavite bölgesi akışı, süpersonik rejimde sayısal olarak incelenmiştir. Bu anlamda, kavite bölgesinde oluşan ses basınç seviyelerinin azaltılmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İncelemelerde açık kaynak kodlu bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan OpenFOAM yazılımı kullanılmıştır. Kavitenin en kritik bölgesi olan arka duvar geometrisinde yapılan değişikliklerin kavite bölgesi gürültü seviyelerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre gürültü seviyelerinin en az olduğu optimum kavite konfigürasyonu belirlenmiştir. Ses basınç seviyelerinin en iyi olduğu bu kavite konfigürasyonu ile süpersonik rejimde farklı Mach sayılarının kavite akışına etkileri araştırılmıştır.

Çalışmanın ilk kısmında, kullanılacak sayısal model ve yaklaşımlarının doğruluğunun sağlanabilmesi için literatürden seçilen iki adet deneysel çalışma ile karşılaştırma yapılmıştır. Sayısal modelin doğruluğu sağlandıktan sonra parametrik çalışmalara başlanmıştır. Parametrik çalışmalarda kavite bölgesinde basınç kaynaklı oluşan gürültü seviyelerinin pasif kontrol yöntemleri ile azaltılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, kavite bölgesinde gürültüye neden olan en etkili parametre, yani kavite arka duvar geometrisi, kavite akış mekanizması ve yapısı göz önüne alınarak sistematik bir şekilde değiştirilmiştir. Elde edilen her bir parametrik modelde yapılan değişikliklerin tutarlı bir şekilde incelenebilmesi için boyutsuz sayılar tanımlanmış olup, gelecek çalışmalarda yeni kavite modellerine bu sayıların yardımcı olması amaçlanmıştır. Her bir parametrik çalışma sonucunda gürültü seviyelerini düşürebilen en iyi kavite geometrisi kontrolsüz temel konfigürasyon ile kıyaslanmıştır.

Parametrik çalışmaların ilki kavite arka duvarını eğme çalışmalarıdır. Kavite arka duvarının eğilmesindeki amaç kavite arka duvarının kesme tabakası ile etkileşimini hafifletebilmektir. Elde edilen sonuçlara göre kavite arka duvarına verilen eğim açısı azaldıkça hem kavite arka duvarındaki hem de kavite tabanındaki ses basınç seviyeleri azalmıştır. Bu çalışmalar içerisinde ses basınç seviyelerindeki en çok iyileşmenin kavite arka duvarına 30° eğim verilen E30 konfigürasyonunda olduğu görülmüştür. Bu konfigürasyon için kavite alt duvarında kontrolsüz temel konfigürasyona göre ortalama

39,81 dB (% 26,91), arka duvarda ise ortalama 43,53 dB (% 27,9) ses basınç seviyelerinde iyileşme sağlanmıştır.

İkinci parametrik çalışma, kavite arka duvarına eğrilik verilen (hilal geometrisi oluşturulan) çalışmalardır. Bu çalışmalarda kavite arka duvarı, üç nokta eğri oluşumu tekniği ile oluşturulmuştur. Kavite arka duvarının alt ve üst noktaları sabit tutularak eğrilik oluşum açıları değiştirilmiştir. Sonuçlara göre kavite arka duvarının eğrilik oluşum açısı arttıkça kavite bölgesinde oluşan gürültü seviyeleri azalmıştır. Ses basınç seviyelerindeki en çok iyileşme kavite arka duvarı eğrilik oluşum açısının 90° olduğu C90 konfigürasyonunda sağlanmıştır. Bu konfigürasyon için kontrolsüz temel konfigürasyona kıyasla kavite alt duvarında ortalama 7,43 dB (% 5,08), arka duvarda ise ortalama 7,38 dB (% 4,73) ses basınç seviyelerinde iyileşme sağlanmıştır.

Üçüncü parametrik çalışma, kavite arka duvar boyunun belirli bir oranda kısaltıldığı (offset verildiği) çalışmalardır. Sonuçlara göre kavite arka duvar boyu kısaltıldıkça kavite alt ve arka duvarında oluşan gürültü seviyeleri azalmıştır. Kavite arka duvarına offset verme çalışmaları içerisinde ses basınç seviyelerinin en düşük olarak gözlemlendiği konfigürasyon kavite arka duvar boyunun normal duruma göre % 20 oranında kısaltıldığı O20 konfigürasyonu olmuştur. Bu konfigürasyon için kavite alt duvarında kontrolsüz temel konfigürasyona göre ortalama 7,27 dB (% 4,95), arka duvarda ise ortalama 6,06 dB (% 3,89) ses basınç seviyelerinde iyileşme sağlanmıştır.

Temel olarak incelenen üç parametrik çalışma sonucunda gürültü seviyelerini en fazla düşürebilen parametrik çalışma yöntemi kavite arka duvarına eğim vermek olmuştur. Bu yöntemden sonra en iyi sonuçları veren parametrik çalışma tekniği ise kavite arka duvarına eğrilik vermek (hilal geometrisi oluşturmak) olmuştur. Tüm parametrik çalışmalar sonucunda, gürültünün en az olduğu konfigürasyon olan kavite arka duvarına 30° eğim verilen E30 konfigürasyonu için gürültü seviyelerini daha da azaltabilmek için bu iki yöntemin kombinasyonu sonucu ortaya çıkan arka duvar geometrilerinin parametrik çalışmasının yapılmasına karar verilmiştir. Bu kapsamda, kavite arka duvarına 30° eğim verilen E30 konfigürasyonunun eniyileştirme parametrik çalışmaları sistematik olarak gerçekleştirilmiştir. Kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durum için kavite arka duvarının üst köşesinden eğrilik verme parametrik çalışmaları (EC) ve kavite arka duvar

eğiminin 30° olduğu durum için kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme (hilal geometrisi yerleştirme) parametrik çalışmaları (TC) gerçekleştirilmiştir.

Eniyileştirme çalışmaları kapsamında ilk olarak kavite arka duvarına 30° eğim verilen E30 konfigürasyonu referans alınarak, kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durum için kavite arka duvarının üst köşesinden eğrilik verme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre 30° eğimli kavite arka duvarına üst köşeden 5 mm yarıçap ile eğrilik verilen konfigürasyon olan EC5 konfigürasyonu kavite arka ve alt duvar bölgesinin çoğunluğunda ses basınç seviyelerini azaltan konfigürasyon olmuştur. Bu konfigürasyon için kavite alt duvarında temel konfigürasyona göre ortalama 39,82 dB (% 26,92), arka duvarda ise ortalama 43,50 dB (% 27,88) ses basınç seviyelerinde iyileşme sağlamıştır.

Eniyileştirme çalışmaları kapsamında son çalışma olarak kavite arka duvarına 30° eğim verilen E30 konfigürasyonu referans alınarak, kavite arka duvar eğiminin 30° olduğu durum için kavite arka duvarına tabandan eğrilik verme (hilal geometrisi yerleştirme) çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre kavite tabanı ve kavite arka duvarı için ses basınç seviyeleri açısından en iyi sonucu veren konfigürasyon 30° eğimli kavite arka duvarına 90° 'lik eğrilik oluşum açısı ile oluşan hilal geometrisinin yerleştirildiği TC90 konfigürasyonu olmuştur. Bu konfigürasyon kavite alt duvarında temel konfigürasyona göre ortalama 40,58 dB (% 27,41), arka duvarda ise ortalama 43,90 dB (% 28,14) ses basınç seviyelerinde iyileşme sağlamıştır.

Daha sonra ses basınç seviyelerini azaltan optimum geometri olan TC90 konfigürasyonu için süpersonik rejimde belirli Mach sayılarının akışa etkileri araştırılmıştır. Sonuçlara göre kavite alt duvarının geneli ve kavite arka duvarının büyük bir kısmında akış hızı arttıkça ses basınç seviyelerinde artışlar gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, birçok farklı parametrenin detaylı olarak incelendiği bu tez çalışmasında; incelenen tüm kavite arka duvar parametrelerinin kavite bölgesinde oluşan gürültü seviyelerine etkileri görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre ses basınç seviyelerini azaltan en iyi kavite geometrisi; kavite arka duvarına 90° 'lik eğrilik oluşum açısı ile oluşturulan hilal geometrisinin yerleştirildiği TC90 konfigürasyonu olmuştur. TC90 konfigürasyonu temel kontrolsüz konfigürasyona (TK) göre ses basınç seviyelerinde kavite alt duvarı için

ortalama 40,58 dB (% 27,41), kavite arka duvarı için ortalama 43,90 dB (% 28,14) iyileşme sağlamıştır.

Bu tez çalışmasında kullanılan pasif kontrol yöntemlerinden birisi olan arka duvar parametrelerinin kapsamı genişletilerek ve yenileri ilave edilerek kavite bölgesinde oluşan gürültü seviyelerinin iyileşebileceği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte gelecek çalışmalar için aşağıdaki öneriler yapılabilmektedir:

Gerçekleştirilen çalışmada sınırlı sayısal hesaplama gücü ve zaman nedeniyle kavite akışı iki boyutlu simülasyonlar ile gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu simülasyonlar ile kavite akışındaki üçüncü boyut etkileri incelenebilir.

DES ve LES gibi daha güçlü HAD çözücüleri kullanılarak modellerin süpersonik kavite akışı üzerindeki sonuçları araştırılabilir.

Bu çalışmada kullanılan parametrik çalışmalardaki arka duvar konfigürasyonları ses altı (subsonic) ve ses ötesi (transonic) akış rejimleri için uygulanıp, sonuçlar araştırılabilir.

OpenFOAM açık kaynak kodlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsünün doğruluğu ve güvenilirliği süpersonik rejimde kavite akışı gibi zor bir havacılık uygulaması için kanıtlanmıştır. Gelecek çalışmalarda açık kaynak kodlu OpenFOAM çözücüsü ticari kodlara olan bağımlılığın azaltılabilmesi için farklı HAD uygulamalarında kullanabilir.

KAYNAKLAR

1. Lawson, S. J. and Barakos, G. N. (2011). Review of numerical simulations for high-speed, turbulent cavity flows. *Progress in Aerospace Sciences*, 47(3), 186-216.
2. İnternet: URL: <https://www.businessinsider.com/new-pictures-of-the-f-35-with-its-weapons-bay-doors-wide-open-2012-3>, Son Erişim Tarihi: 03.01.2020.
3. İnternet: URL: <https://www.key.aero/forum/modern-military-aviation/126265-f-16-and-dual-missiles-pylon>, Son Erişim Tarihi: 04.01.2020
4. Izawa, S., Lerner, J. C., and Boldes, U. (2011). Active and passive control of flow past a cavity. *Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research*, 369.
5. Tracy, M. B. (1997). Cavity unsteady-pressure measurements at subsonic and transonic speeds (Vol. 3669). NASA, Langley Research Center.
6. Plentovich, E. B., Stallings Jr, R. L., and Tracy, M. B. (1993). Experimental cavity pressure measurements at subsonic and transonic speeds. Static-pressure results.
7. ESDU. (2004). Aerodynamics and Aero-Acoustics of Rectangular Planform Cavities. Part I: Time-Averaged Flow.
8. Stallings Jr, R. L. and Wilcox Jr, F. J. (1987). Experimental cavity pressure distributions at supersonic speeds.
9. Rossiter, J. E. (1964). Wind tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds. *RAE Technical Report No. 64037*.
10. Rossiter, J. E. and Kurn, A. G. (1965). *Wind tunnel measurements of the unsteady pressures in and behind a bomb bay (Canberra)*. HM Stationery Office.
11. Rossiter, J. (1960). A preliminary investigation into armament bay buffet at subsonic and transonic speeds. *Royal Aircraft Establishment, TM AERO*, 679.
12. Ahuja, K. K. and Mendoza, J. (1995). Effects of cavity dimensions, boundary layer, and temperature on cavity noise with emphasis on benchmark data to validate computational aeroacoustic codes.
13. Heller, H. H. and Bliss, D. B. (1975). Aerodynamically induced pressure oscillations in cavities. *Physical Mechanisms and Suppression Concepts AFFDL-TR-74-133*.
14. Kaufman II, L. G., Maciulaitis, A., and Clark, R. L. (1983). *Mach 0.6 to 3.0 flows over rectangular cavities*. AIR FORCE WRIGHT AERONAUTICAL LABS WRIGHT-PATTERSON AFB OH.
15. Charwat, A. F., Roos, J. N., Dewey Jr, F. C., and Hitz, J. A. (1961). An investigation of separated flows-Part I: The pressure field. *Journal of the Aerospace Sciences*, 28(6), 457-470.

16. Heller, H., and Bliss, D. (1975, March). The physical mechanism of flow-induced pressure fluctuations in cavities and concepts for their suppression. In 2nd Aeroacoustics Conference (p. 491).
17. Zhang, J., Morishita, E., Okunuki, T., & Itoh, H. (2002). Experimental investigation on the mechanism of flow-type changes in supersonic cavity flows. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 45(149), 170-179.
18. Block, P. J. (1976). Noise response of cavities of varying dimensions at subsonic speeds.
19. Unalmis, O. H., Clemens, N. T., and Dolling, D. S. (2001). Experimental study of shear-layer/acoustics coupling in Mach 5 cavity flow. *AIAA journal*, 39(2), 242-252.
20. Thangamani, V. (2019). Mode Behavior in Supersonic Cavity Flows. *AIAA Journal*, 57(8), 3410-3421.
21. Malhotra, A. and Vaidyanathan, A. (2016). Aft wall offset effects on open cavities in confined supersonic flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 74, 411-428.
22. Perng, S. W. and Dolling, D. (1996). Passive control of pressure oscillations in hypersonic cavity flow. In 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (p. 444).
23. Vikramaditya, N. S. and Kurian, J. (2014). Experimental study of influence of trailing wall geometry on cavity oscillations in supersonic flow. *Experimental thermal and fluid science*, 54, 102-109.
24. Gautam, T., Lovejeet, G., and Vaidyanathan, A. (2017). Experimental study of supersonic flow over cavity with aft wall offset and cavity floor injection. *Aerospace Science and Technology*, 70, 211-232.
25. Pey, Y. Y., & Chua, L. P. (2014). Effects of trailing wall modifications on cavity wall pressure. *Experimental thermal and fluid science*, 57, 250-260.
26. Maurya, P. K., Rajeev, C., RR, V. K., and 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.
27. Zhang, X. and Edwards, J. A. (1996). Analysis of unsteady supersonic cavity flow employing an adaptive meshing algorithm. *Computers & fluids*, 25(4), 373-393.
28. SUHS, N. (1987, June). Computations of three-dimensional cavity flow at subsonic and supersonic Mach numbers. In 19th AIAA, Fluid Dynamics, Plasma Dynamics, and Lasers Conference (p. 1208).
29. Rizzetta, D. P. (1988). Numerical simulation of supersonic flow over a three-dimensional cavity. *AIAA journal*, 26(7), 799-807.
30. Ayılı, Ü. E. (2012). Süpersonik kavitelerdeki akışın sayısal analizi (Yüksek Lisans Tezi).

31. Zhang, X. (1995). Compressible cavity flow oscillation due to shear layer instabilities and pressure feedback. *AIAA journal*, 33(8), 1404-1411.
32. Nayyar, P., Barakos, G. N., and Badcock, K. J. (2007). Numerical study of transonic cavity flows using large-eddy and detached-eddy simulation. *Aeronautical Journal*, 111(1117), 153-164.
33. Panigrahi, C., Vaidyanathan, A., and Nair, M. T. (2019). Effects of subcavity in supersonic cavity flow. *Physics of Fluids*, 31(3), 036101.
34. Aradag, S., Gelisli, K. A., and Yaldir, E. C. (2017). Effects of Active and Passive Control Techniques on Mach 1,5 Cavity Flow Dynamics. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2017.
35. Ren, Z., Wang, B., Hu, B., and Zheng, L. (2018). Numerical analysis of supersonic flows over an aft-ramped open-mode cavity. *Aerospace Science and Technology*, 78, 427-437.
36. Demir, O. (2019). A Numerical Investigation on Passive Flow Controls of Open Cavities at Transonic Speeds (Yüksek Lisans Tezi).
37. Versteeg, H. K., and Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education.
38. Wilcox, D. C. (1995). Turbulence Modelling for CFD. *Journal of Fluid Mechanics*, 289, 406-407.
39. Greenshields, C. J. (2015). OpenFOAM user guide. *OpenFOAM Foundation Ltd, version*, 3(1), 47.
40. Moukalled, F., Mangani, L., and Darwish, M. (2016). *The finite volume method in computational fluid dynamics* (Vol. 6). Berlin, Germany::Springer.
41. İnternet: URL: http://www.wolfdynamics.com/wiki/fvm_crash_intro.pdf, Son Erişim Tarihi: 18.06.2020.
42. Xiansheng, W., Dangguo, Y., Jun, L., and Fangqi, Z. (2020). Control of Pressure Oscillations Induced by Supersonic Cavity Flow. *AIAA Journal*, 58(5), 2070-2077.
43. Kim, H., Aradag, S., and Knight, D. (2006). Two and three dimensional simulations of supersonic cavity flow. In *12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference)*, 2431.
44. Yaldir, E. C. (2018). Mach 1,5 Süpersonik Kavite Akışının Açık Kaynak Yazılımla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizleri ve Sonuçların Ticari Yazılım Simülasyonları ile Karşılaştırılması (Yüksek Lisans Tezi, TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).
45. Gelisli, K. A. (2019). Süpersonik kavite akışının aktif ve pasif yöntemlerle kontrolü (Yüksek Lisans Tezi, TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).
46. Mathworks, C., Matlab-Simulink User's Guide R2018a, 2018.

47. Tecplot 360 User's Manual Release 1.





EK-1. OpenFOAM çözüm çıktıları örneği

```
Courant Number mean: 0.0076848006 max: 0.1351656
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
PIMPLE: iteration 1
DILUPBiCGStab: Solving for Ux, Initial residual = 6.7733063e-06, Final residual = 2.2762391e-10, No Iterations 2
DILUPBiCGStab: Solving for Uy, Initial residual = 3.5168664e-05, Final residual = 7.6393514e-10, No Iterations 3
DILUPBiCGStab: Solving for e, Initial residual = 4.3845386e-05, Final residual = 1.9571952e-10, No Iterations 3
DILUPBiCGStab: Solving for p, Initial residual = 6.2198929e-05, Final residual = 4.5005467e-12, No Iterations 2
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
time step continuity errors : sum local = 3.0263094e-12, global = 4.6592479e-13, cumulative = -3.5716952e-07
DILUPBiCGStab: Solving for p, Initial residual = 7.1990746e-07, Final residual = 5.9172414e-12, No Iterations 1
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
time step continuity errors : sum local = 3.9789705e-12, global = 8.0060607e-13, cumulative = -3.5716872e-07
PIMPLE: iteration 2
DILUPBiCGStab: Solving for Ux, Initial residual = 3.0002998e-08, Final residual = 3.7622703e-11, No Iterations 1
DILUPBiCGStab: Solving for Uy, Initial residual = 5.9115496e-08, Final residual = 9.3032517e-11, No Iterations 1
DILUPBiCGStab: Solving for e, Initial residual = 5.2881829e-06, Final residual = 8.9115641e-11, No Iterations 1
DILUPBiCGStab: Solving for p, Initial residual = 2.3092061e-06, Final residual = 1.3404616e-11, No Iterations 1
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
time step continuity errors : sum local = 9.0135761e-12, global = 1.5690432e-12, cumulative = -3.5716715e-07
DILUPBiCGStab: Solving for p, Initial residual = 3.9193047e-08, Final residual = 2.5069061e-11, No Iterations 1
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
time step continuity errors : sum local = 1.6856961e-11, global = 4.0275022e-12, cumulative = -3.5716313e-07
DILUPBiCGStab: Solving for omega, Initial residual = 1.2461968e-06, Final residual = 6.5182671e-11, No Iterations 2
DILUPBiCGStab: Solving for k, Initial residual = 1.2389629e-05, Final residual = 8.3661661e-11, No Iterations 3
ExecutionTime = 784.37 s ClockTime = 834 s
```

```
Time = 0.0272
Courant Number mean: 0.0071206285 max: 0.088778783
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
PIMPLE: iteration 1
DILUPBiCGStab: Solving for Ux, Initial residual = 2.9873114e-06, Final residual = 1.2575451e-10, No Iterations 1
DILUPBiCGStab: Solving for Uy, Initial residual = 2.2673266e-05, Final residual = 3.5492689e-10, No Iterations 2
DILUPBiCGStab: Solving for e, Initial residual = 4.308326e-05, Final residual = 4.7864328e-10, No Iterations 1
DILUPBiCGStab: Solving for p, Initial residual = 0.00057289856, Final residual = 4.5568474e-11, No Iterations 2
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
time step continuity errors : sum local = 4.1255077e-12, global = 8.3226816e-13, cumulative = 1.1259168e-06
DILUPBiCGStab: Solving for p, Initial residual = 7.6427185e-06, Final residual = 5.0214064e-11, No Iterations 1
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
time step continuity errors : sum local = 4.5460655e-12, global = 1.4189022e-13, cumulative = 1.125917e-06
PIMPLE: iteration 2
DILUPBiCGStab: Solving for Ux, Initial residual = 3.3579921e-08, Final residual = 2.7079219e-11, No Iterations 1
DILUPBiCGStab: Solving for Uy, Initial residual = 2.5623694e-07, Final residual = 2.0201588e-10, No Iterations 1
DILUPBiCGStab: Solving for e, Initial residual = 6.7954729e-06, Final residual = 4.3625046e-11, No Iterations 1
DILUPBiCGStab: Solving for p, Initial residual = 2.5957109e-05, Final residual = 2.988212e-12, No Iterations 2
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
time step continuity errors : sum local = 2.7060516e-13, global = 1.4253658e-14, cumulative = 1.125917e-06
DILUPBiCGStab: Solving for p, Initial residual = 3.7338754e-07, Final residual = 3.8026207e-12, No Iterations 1
diagonal: Solving for rho, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
time step continuity errors : sum local = 3.4438175e-13, global = -6.4808580e-14, cumulative = 1.1259169e-06
DILUPBiCGStab: Solving for omega, Initial residual = 7.4367955e-07, Final residual = 2.9656816e-11, No Iterations 1
DILUPBiCGStab: Solving for k, Initial residual = 9.749092e-07, Final residual = 7.2506058e-12, No Iterations 2
ExecutionTime = 44286.28 s ClockTime = 46537 s

functionObjects::MachNo MachNo writing field: Ma
yPlus yPlus write:
writing field yPlus
patch BW y+ : min = 0.0002955161, max = 1.6503868, average = 0.51234032
patch LE y+ : min = 0.00029519734, max = 0.52551051, average = 0.030915412
patch TE y+ : min = 0.0016737451, max = 18.59627, average = 2.8125346
patch wall y+ : min = 2.7201918, max = 11.167677, average = 3.7172416
fieldAverage fieldAverage1 write:
calculating averages

Writing average fields

End

Finalising parallel run
```

EK-2. MATLAB FFT kodu

```

clc
clear
close
format longG
%% Data okuma
fileName = sprintf('TK_OpenFOAM'); % Dosya adının yazılması (uzantılı)
fileID = fopen(fileName, 'r+');
% Text dosyasını hücre şeklinde okuma
i = 1;
tline = fgetl(fileID);
cellID{i} = tline;
while ischar(tline)
    i = i + 1;
    tline = fgetl(fileID);
    cellID{i} = tline;
end
fclose(fileID);
%% Vektör oluşturma
index = 20; % Dataların başladığı satır indeksi
fileLength = length(cellID); % Datadaki toplam satır sayısı
% Memory Allocation
timeVector = zeros(1, fileLength-index); % Time Vector Allocation
probe0Vector = zeros(1, fileLength-index); % Probe 0 Vector Allocation
probe1Vector = zeros(1, fileLength-index); % Probe 1 Vector Allocation
probe2Vector = zeros(1, fileLength-index); % Probe 2 Vector Allocation
probe3Vector = zeros(1, fileLength-index); % Probe 3 Vector Allocation
probe4Vector = zeros(1, fileLength-index); % Probe 4 Vector Allocation
probe5Vector = zeros(1, fileLength-index); % Probe 5 Vector Allocation
probe6Vector = zeros(1, fileLength-index); % Probe 6 Vector Allocation
probe7Vector = zeros(1, fileLength-index); % Probe 7 Vector Allocation
probe8Vector = zeros(1, fileLength-index); % Probe 8 Vector Allocation
probe9Vector = zeros(1, fileLength-index); % Probe 9 Vector Allocation

```

EK-2. (devam) MATLAB FFT kodu

```

probe10Vector = zeros(1, fileLength-index); % Probe 10 Vector Allocation
probe11Vector = zeros(1, fileLength-index); % Probe 11 Vector Allocation
probe12Vector = zeros(1, fileLength-index); % Probe 12 Vector Allocation
probe13Vector = zeros(1, fileLength-index); % Probe 13 Vector Allocation
probe14Vector = zeros(1, fileLength-index); % Probe 14 Vector Allocation
probe15Vector = zeros(1, fileLength-index); % Probe 15 Vector Allocation
probe16Vector = zeros(1, fileLength-index); % Probe 16 Vector Allocation
% Vektör atama
for i = index:fileLength-1
    timeVector(1, i-index+1) = str2double(cellID{i}(7:15));
    probe0Vector(1, i-index+1) = str2double(cellID{i}(23:31));
    probe1Vector(1, i-index+1) = str2double(cellID{i}(39:47));
    probe2Vector(1, i-index+1) = str2double(cellID{i}(55:63));
    probe3Vector(1, i-index+1) = str2double(cellID{i}(71:79));
    probe4Vector(1, i-index+1) = str2double(cellID{i}(87:95));
    probe5Vector(1, i-index+1) = str2double(cellID{i}(103:111));
    probe6Vector(1, i-index+1) = str2double(cellID{i}(119:127));
    probe7Vector(1, i-index+1) = str2double(cellID{i}(135:143));
    probe8Vector(1, i-index+1) = str2double(cellID{i}(151:159));
    probe9Vector(1, i-index+1) = str2double(cellID{i}(167:175));
    probe10Vector(1, i-index+1) = str2double(cellID{i}(183:191));
    probe11Vector(1, i-index+1) = str2double(cellID{i}(199:207));
    probe12Vector(1, i-index+1) = str2double(cellID{i}(215:223));
    probe13Vector(1, i-index+1) = str2double(cellID{i}(231:239));
    probe14Vector(1, i-index+1) = str2double(cellID{i}(247:255));
    probe15Vector(1, i-index+1) = str2double(cellID{i}(263:271));
    probe16Vector(1, i-index+1) = str2double(cellID{i}(279:287));
end
%% Hesaplama
% Line Selection
probe0Select = probe0Vector(1, 20:1697339); % Line sayısı değişebilir.
probe1Select = probe1Vector(1, 20:1697339); % Line sayısı değişebilir.

```

EK-2. (devam) MATLAB FFT kodu

```

probe2Select = probe2Vector(1, 20:1697339); % Line sayısı değişebilir.
probe3Select = probe3Vector(1, 20:1697339); % Line sayısı değişebilir.
probe4Select = probe4Vector(1, 20:1697339); % Line sayısı değişebilir.
probe5Select = probe5Vector(1, 20:1697339); % Line sayısı değişebilir.
probe6Select = probe6Vector(1, 20:1697339); % Line sayısı değişebilir.
probe7Select = probe7Vector(1, 20:1697339); % Line sayısı değişebilir.
probe8Select = probe8Vector(1, 20:1697339); % Line sayısı değişebilir.
probe9Select = probe9Vector(1, 20:1697339); % Line sayısı değişebilir.
probe10Select = probe10Vector(1, 20:1697339); % Line sayısı değişebilir.
probe11Select = probe11Vector(1, 20:1697339); % Line sayısı değişebilir.
probe12Select = probe12Vector(1, 20:1697339); % Line sayısı değişebilir.
probe13Select = probe13Vector(1, 20:1697339); % Line sayısı değişebilir.
probe14Select = probe14Vector(1, 20:1697339); % Line sayısı değişebilir.
probe15Select = probe15Vector(1, 20:1697339); % Line sayısı değişebilir.
probe16Select = probe16Vector(1, 20:1697339); % Line sayısı değişebilir.
% Ortalama Hesaplama
probe0Avg = sum(probe0Select)/(length(probe0Select));
probe1Avg = sum(probe1Select)/(length(probe1Select));
probe2Avg = sum(probe2Select)/(length(probe2Select));
probe3Avg = sum(probe3Select)/(length(probe3Select));
probe4Avg = sum(probe4Select)/(length(probe4Select));
probe5Avg = sum(probe5Select)/(length(probe5Select));
probe6Avg = sum(probe6Select)/(length(probe6Select));
probe7Avg = sum(probe7Select)/(length(probe7Select));
probe8Avg = sum(probe8Select)/(length(probe8Select));
probe9Avg = sum(probe9Select)/(length(probe9Select));
probe10Avg = sum(probe10Select)/(length(probe10Select));
probe11Avg = sum(probe11Select)/(length(probe11Select));
probe12Avg = sum(probe12Select)/(length(probe12Select));
probe13Avg = sum(probe13Select)/(length(probe13Select));
probe14Avg = sum(probe14Select)/(length(probe14Select));
probe15Avg = sum(probe15Select)/(length(probe15Select));

```

EK-2. (devam) MATLAB FFT kodu

```

probe16Avg = sum(probe16Select)/(length(probe16Select));
% Genlik Hesaplama
probe0Amg = sum(abs(probe0Select - probe0Avg))/(length(probe0Select));
probe1Amg = sum(abs(probe1Select - probe1Avg))/(length(probe1Select));
probe2Amg = sum(abs(probe2Select - probe2Avg))/(length(probe2Select));
probe3Amg = sum(abs(probe3Select - probe3Avg))/(length(probe3Select));
probe4Amg = sum(abs(probe4Select - probe4Avg))/(length(probe4Select));
probe5Amg = sum(abs(probe5Select - probe5Avg))/(length(probe5Select));
probe6Amg = sum(abs(probe6Select - probe6Avg))/(length(probe6Select));
probe7Amg = sum(abs(probe7Select - probe7Avg))/(length(probe7Select));
probe8Amg = sum(abs(probe8Select - probe8Avg))/(length(probe8Select));
probe9Amg = sum(abs(probe9Select - probe9Avg))/(length(probe9Select));
probe10Amg = sum(abs(probe10Select - probe10Avg))/(length(probe10Select));
probe11Amg = sum(abs(probe11Select - probe11Avg))/(length(probe11Select));
probe12Amg = sum(abs(probe12Select - probe12Avg))/(length(probe12Select));
probe13Amg = sum(abs(probe13Select - probe13Avg))/(length(probe13Select));
probe14Amg = sum(abs(probe14Select - probe14Avg))/(length(probe14Select));
probe15Amg = sum(abs(probe15Select - probe15Avg))/(length(probe15Select));
probe16Amg = sum(abs(probe16Select - probe16Avg))/(length(probe16Select));
% Ses basınç seviyesi hesaplama
pRef = 2*10^-5; % Reference pressure of air
probe0SPL = 20*log10(probe0Amg/pRef);
probe1SPL = 20*log10(probe1Amg/pRef);
probe2SPL = 20*log10(probe2Amg/pRef);
probe3SPL = 20*log10(probe3Amg/pRef);
probe4SPL = 20*log10(probe4Amg/pRef);
probe5SPL = 20*log10(probe5Amg/pRef);
probe6SPL = 20*log10(probe6Amg/pRef);
probe7SPL = 20*log10(probe7Amg/pRef);
probe8SPL = 20*log10(probe8Amg/pRef);
probe9SPL = 20*log10(probe9Amg/pRef);
probe10SPL = 20*log10(probe10Amg/pRef);

```

EK-2. (devam) MATLAB FFT kodu

```

probe11SPL = 20*log10(probe11Amg/pRef);
probe12SPL = 20*log10(probe12Amg/pRef);
probe13SPL = 20*log10(probe13Amg/pRef);
probe14SPL = 20*log10(probe14Amg/pRef);
probe15SPL = 20*log10(probe15Amg/pRef);
probe16SPL = 20*log10(probe16Amg/pRef);
%% Grafik Çizdirme
figure(1)
probeTotalSPL1 = [probe0SPL, probe1SPL, probe2SPL, probe3SPL, ...
    probe4SPL, probe5SPL ];
y = linspace(0, 1, 6);
plot(probeTotalSPL1, y, 'b', 'linewidth', 3)
set(gca, 'fontsize', 26)
xlabel('SPL (dB)', 'FontSize', 36)
ylabel('y/D', 'FontSize', 36)
% legend('Arka Duvar')
xlim([100 180])
set(gcf,'color','white')
legend('OpenFOAM')
title('Arka duvar')
hold off
figure(2)
probeTotalSPL2 = [probe6SPL, probe7SPL, probe8SPL, probe9SPL, ...
    probe10SPL];
y = linspace(0, 1, 5);
plot(probeTotalSPL2, y, 'b', 'linewidth', 3)
set(gca, 'fontsize', 26)
xlabel('SPL (dB)', 'FontSize', 36)
ylabel('y/D', 'FontSize', 36)
% legend('On Duvar')
xlim([100 180])
set(gcf,'color','white')

```

EK-2. (devam) MATLAB FFT kodu

```

legend('OpenFOAM')
title('On duvar')
hold off
figure(3)
probeTotalSPL3 = [ probe11SPL, probe12SPL, probe13SPL, probe14SPL, ...
    probe15SPL, probe16SPL ];
x = linspace(0, 1, 6);
plot(x, probeTotalSPL3, 'b', 'linewidth', 3)
set(gca, 'fontsize', 26)
xlabel('x/L', 'FontSize', 36)
ylabel('SPL (dB)', 'FontSize', 36)
ylim([110 180])
set(gcf, 'color', 'white')
hold on
%% Deney Datası ile Karşılaştırma
load experiment.txt
experiment_length=experiment(1:5,1);
experiment_SPL=experiment(1:5,2);
plot(experiment_length,experiment_SPL,'k*','linewidth', 5);
legend('OpenFOAM','Experiment')
title('Alt duvar')

```




GAZİ GELECEKTİR..