

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TRANSONİK KAVİTE AKIŞININ AEROAKUSTİK İNCELEMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Haydar İREY

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı

Savunma Teknolojileri Programı

HAZİRAN 2023

TRANSONİK KAVİTE AKIŞININ AEROAKUSTİK İNCELEMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Haydar İREY
(514191051)

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı

Savunma Teknolojileri Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Baha ZAFER

HAZİRAN 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 514191051 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi, “Haydar İREY”, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TRANSONİK KAVİTE AKIŞININ AEROAKUSTİK İNCELEMESİ” başlıklı tezini, aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Baha ZAFER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Erman ASLAN**
Kocaeli Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Saliha Banu YILMAZ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 26 Mayıs 2023
Savunma Tarihi : 20 Haziran 2023





Aileme ve memleketime,



ÖNSÖZ

“Transonik Kavite Akışının Aeroakustik İncelemesi” konulu tezimi hazırlarken, benden bilgi birikimini, yardım ve hoşgörüsünü esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Baha ZAFER ile bugünlere gelmemde bana maddi ve manevi sonsuz destek olan aileme ve yol arkadaşım Arş. Gör. Kübra ARSLAN İREY’e teşekkürlerimi sunarım. Tezimin, gelecekte bu konuyla ilgili çalışma yapacak olanlara yardımcı olmasını temenni ederim.

Tüm Aziz Şehitlerimize ve Kahraman Gazilerimize ithaf ediyorum.

Haziran 2023

Haydar İREY
(Makine Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Kavite Akışı	4
1.1.1 Kavite akış fiziği.....	4
1.1.2 Kavite akışı sınıflandırılması.....	5
1.2 Rossiter Mekanizması.....	11
1.2.1 Rossiter modları.....	13
1.2.2 Rossiter formülasyonu	14
1.3 Literatür Araştırması.....	15
1.3.1 Sayısal çalışmalar	17
1.3.2 Deneysel çalışmalar	22
1.4 Tezin Amacı.....	27
1.5 Tezin Planı	29
2. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ.....	31
2.1 Navier-Stokes Denklemleri.....	31
2.2 Türbülans Modellemesi	34
2.2.1 Large eddy simulation (LES)	38
2.2.2 SST k- ω türbülans modeli.....	39
2.2.3 IDDES türbülans modeli.....	43
2.3 Hesaplama Alanı ve Sınır Şartları	46
2.4 Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) Akustik Analoji	52
2.5 Spektral Analiz ve Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT).....	58
3. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ DOĞRULAMASI	61
4. PASİF KONTROL YÖNTEMİ UYGULAMARI VE BULGULARI.....	69
5. SONUÇLAR VE YORUMLAR.....	81
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	95



KISALTMALAR

İHA	: İnsansız Hava Aracı
FW-H	: Ffowcs Williams-Hawkings
HAA/CAA	: Hesaplamalı Aeroakustik
HAD/CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
N-S	: Navier Stokes Denklemleri
LES	: Büyük Girdap Simülasyonu
RANS	: Reynolds Ortalamalı Navier Stokes
URANS	: Kararsız Reynolds ortalama Navier Stokes
DNS	: Direkt Sayısal Simülasyonu
DES	: Ayrık Girdap Benzeşim Yöntemi
DDES	: Gecikmeli Ayrılmış Girdap Benzeşimi
IDDES	: Geliştirilmiş Gecikmeli Ayrılmış Girdap Benzeşimi
WMLES	: Duvar Modelli Büyük Girdap Simülasyonu
GIS	: Ağ Yapısı Kaynaklı Ayrılma
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
OASPL	: Genel Ortalama Ses Basınç Seviyesi
REF	: Referans
RMS	: Ortalama Karekök
SPL	: Ses Basınç Seviyesi
SAS	: Ölçek Uyarlamalı Simülasyon
SGS	: Alt Izgara Ölçeği
SST	: Kayma Gerilimi Taşınması



SEMBOLLER

t	: Zaman
L	: Kavite uzunluğu
W	: Kavite genişliği
D	: Karakteristik uzunluk
ρ	: Yoğunluk
μ	: Dinamik vizkozite
P	: Basınç
$P_{anlık}$	: Anlık basınç değeri
P_{ort}	: Ortalama basınç değeri
T	: Sıcaklık
P_{ref}	: Uluslararası standart minimum işitilebilir ses
δ_{ij}	: Kronecker delta
S_{ij}	: Gerinim oranı
$S=110.56 \text{ K}$	: Etkili bir sıcaklık anlamına gelen Sutherland sabiti
f_m	: Belirli m modundaki frekans
U_{∞}	: Serbest akım hızı
m	: Mod sayısı
α	: Faz gecikmesi
K_v	: Girdap yayılım hızının serbest akış hızına oranı
M_{∞}	: Mach sayısı
γ	: Özgül ısı
Re	: Reynolds sayısı
St	: Strouhal sayısı
u_i	: Hız vektörü
x_i	: Koordinat vektörü
x_i	: Koordinat vektörü
τ_{ij}	: Viskoz gerilim tensörü
λ	: İkinci viskozite katsayısı
E	: Toplam enerji
H	: Toplam entalpi
e	: İç enerji
h	: Entalpi
T_{ref}	: Referans sıcaklık değeri (273.11 K)
μ_{ref}	: T_{ref} sıcaklığındaki dinamik vizkozite değeri
R	: Spesifik gaz sabiti (Hava için $R=286.73 \text{ J/kg.K}$)
k_B	: Boltzmann sabiti ($1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)
N_A	: Avogadro sayısı (6.022×10^{23})
M	: Gazın molar kütlesi
c_p	: Sabit basınçtaki spesifik ısı
c_v	: Sabit hacimde spesifik ısı
y^+	: Boyutsuz duvar uzunluğu
u_{τ}	: Kayma hızı
τ_w	: Duvar kayma gerilmesi
R_{ij}	: Reynolds stres tensörü
k	: Termal iletkenlik/ Türbülans kinetik enerjisi
q_j	: Isı akısı

ω	: Spesifik yayılım
μ_t	: Türbülans girdap viskozitesi
L_{hibrit}	: Hibrit uzunluk ölçeği
L_{IDDES}	: IDDES uzunluk ölçeği
L_{LES}	: LES uzunluk ölçeği
C_{DES}	: DES'in temel ampirik sabiti
$\hat{f}_d$	: Geciktirme fonksiyonu
f_B	: Geometri fonksiyonu
$1 - f_{dt}$	: Akış fonksiyonu
Δ_{min}	: En az ayrıklaştırma boyutu
Δ_{max}	: En çok ayrıklaştırma boyutu
$k20...k29$	: Mikrofon isimleri
L_x, L_y, L_z	: Hesaplama alanı boyutları
$\delta(f)$	: Dirac Delta fonksiyonu
$H(f)$	: Heaviside fonksiyonu
T_{ij}	: Lighthill gerilme tensörü
$\hat{P}_n$	: Fourier katsayısı
N	: Örneklem sayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2. 1 : k - ω türbülans modelinde bulunan sabitler.....	43
Çizelge 2. 2: Pasif kontrol yöntemleri.	50
Çizelge 2. 3: Birleştirilmiş pasif kontrol yöntemleri.	51
Çizelge 2. 4: Deneysel çalışma koşulları.	51
Çizelge 3. 1: Sayısal ayırıklaştırmadan bağımsızlık çalışması.	62
Çizelge 3. 2: Farklı modların frekans değerleri.	66



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. 1: Kapakları açıkken F-35B'nin silah bölmesi	2
Şekil 1. 2: F-16 gövde dışı faydalı yük taşınması.....	2
Şekil 1. 3: Kavite akışı şematik gösterimi.....	5
Şekil 1. 4: Ses üstü hızlarda kapalı kavite akışı.....	7
Şekil 1. 5: Ses altı hızlarda kapalı kavite akışı	7
Şekil 1. 6: Ses altı hızlarda açık kavite akışı	8
Şekil 1. 7: Ses üstü hızlarda açık kavite akışı.....	9
Şekil 1. 8: Açık kavitelerde Transonik ve subsonik hızlarda basınç katsayısı dağılımı	9
Şekil 1. 9: Bulutlarda görülen Kelvin-Helmholtz kararsızlıkları.....	10
Şekil 1. 10: (a) Kapalı kavite akışı, (b) Kapalıya yakın geçişli kavite akışı, (c) Açığa yakın geçişli kavite akışı, (d) Açık kavite akışı	11
Şekil 1. 11: Rossiter Mekanizması	12
Şekil 1. 12: Açık, geçişli ve kapalı kavite akışlarında akustik tonlar	13
Şekil 1. 13: Rossiter modları	13
Şekil 2.1: Düz plaka üzerinde laminar, geçiş bölgesi ve türbülanslı bölge sınır tabaka akışı	35
Şekil 2.2: Türbülans model sınıflandırması	36
Şekil 2. 3: DNS, LES ve RANS türbülans yöntemlerinin ızgara ölçeği	37
Şekil 2.4: Büyük ve küçük girdaplar	38
Şekil 2.5: Türbülans niceliklerinin Reynolds ayrışımı	39
Şekil 2.6: Deney kavite geometrisi	47
Şekil 2.7: Kavite mikrofon konumları	47
Şekil 2.8: Kavite mikrofon konumlarının yan görünüşü	48
Şekil 2.9: Kavite geometrisinin yapısal olmayan sayısal ağ yapısı örneği.....	49
Şekil 2.10: Arka duvara uygulanan pasif kontrol gösterimi.....	49
Şekil 2.11: Arka duvar ortasından itibaren eğim olarak uygulanan pasif kontrol gösterimi ..	50
Şekil 2.12: Hesaplama Alanı Sınır Koşulları.	52
Şekil 2.13: FW-H kontrol yüzeyi tanımı.....	55
Şekil 2.14: Gürültü kaynakları a) Monopol, b) Dipol, c) Kuadrupol.....	56
Şekil 3.1: Yapısal ağ yapısı ayrıklaştırması örneği.....	62
Şekil 3.2: Sayısal ağdan bağımsızlık testleri OASPL değerleri	63
Şekil 3.3: y^+ kıyaslaması OASPL değerleri.....	64
Şekil 3.4: Yapısal-Yapısal olmayan ağ yapısı OASPL kıyaslaması	65
Şekil 3.5: (a) Mikrofon k21, (b) Mikrofon k24, (c) Mikrofon k26, (d) Mikrofon k28 SPL-Frekans değerleri.	67
Şekil 4.1: Mikrofon k21 için ilk 8 durumda SPL-Frekans değerleri kıyaslaması	70
Şekil 4.2: Mikrofon k28 için ilk 8 durumda SPL-Frekans değerleri kıyaslaması	71
Şekil 4.3: Mikrofon k21 kavite ön duvarları kısaltılması durumları SPL kıyaslaması	73
Şekil 4.4: Mikrofon k28 için kavite ön ve arka duvar kısaltılması durumları SPL-Frekans değerleri kıyaslaması	74
Şekil 4.5: Mikrofon k21 için birleşik durumlar SPL-Frekans değerleri kıyaslaması	75
Şekil 4.6: Mikrofon k28 için birleşik durumlar SPL-Frekans değerleri kıyaslaması.	76
Şekil 4.7: Durum 16'ya ait mikrofon k28 için SPL-Frekans değerleri.....	77
Şekil 4. 8: Bütün durumlar OASPL kıyaslaması.....	78
Şekil 4. 9: Girdaplık konturları a) durum 6, b) durum 8, c) durum 13, d) durum 16.....	79



TRANSONİK KAVİTE AKIŞININ AEROAKUSTİK İNCELEMESİ

ÖZET

Bu çalışmanın temelinde bulunan kavite yapıları mühendislik alanında çeşitli tasarımlarda karşımıza sıklıkla çıkan geometrilerdir. Kavite akışları ise bu geometrilerin etkilediği veya bu geometrileri etkileyen akış alanlarını konu alan akış türleri olarak tanımlanabilmektedir. Kavite akışları farklı mühendislik alanlarının ilgisini çeken, geometrilerinin basitliğine rağmen zamana bağlı olarak oluşturduğu değişken etkileşimlerinin düzensiz ve rastgeleliği yüksek akış alanları oluşturması sebebiyle üzerinde sıklıkla durulan önemli mühendislik problemlerinden biridir. Kavite akışları üzerine araştırmalar, 20 yüzyıl ortalarında askeri şirketler öncülüğünde, savaş uçaklarının silah bölmeleri ve bu bölmeler içindeki ekipmanların üzerindeki etkilerini incelemek için başlanmış olup, hava araçları iniş takımları ve taarruz uçaklarındaki mühimmat yuvaları başta olmak üzere otomotiv sanayisinden inşaat sektörüne kadar geniş bir yelpazede irdelenmektedir. Beşinci nesil olarak adlandırılan taarruz tipi hava araçlarında faydalı yükler radar görünürlüğünü düşürmek başta olmak üzere çeşitli nedenlerden dolayı gövde içinde taşınmaya başlanmıştır. Savaş uçaklarının gövde içinde mühimmat taşıdıkları bu yuvalar havacılıkta kavite olarak isimlendirilmektedir. Basitliğine rağmen kavite akışları irdelenmesi gereken olumsuz etkiler doğurabilmektedir. Bu geometriler akış alanı içerisinde sürüklenme kuvvetleri, basınç kuvvetleri, titreşim sorunları ve gürültü gibi istenmeyecek sorunların kaynağı olabilmektedir.

Kavite geometrileri oluşturdukları akış alanları ile aerodinamik yüzeyi bozarak güçlü akustik etkiler, rastgelelik ve türbülans oluşturmaları sebebiyle incelenmeye ve araştırılmaya açık yapılardır. İyi bilindiği üzere hava araçlarının uçabilmesi için gerekli kaldırma kuvvetinin eldesi yüksek hızlara çıkmasıyla sağlanır. Yüksek hızlarda, kavite gibi aerodinamik yapıyı bozan ortamlar son derece zorludur. Mühimmat ayrımı tutarsızlığı, kararsız akış alanı, şiddetli basınç salınımları, bu çalışmanın da konusu olan istenmeyen akustik yükler gibi olumsuz sonuçlara yol açabilir. Dolayısıyla bu etkilerin kontrol altına alınması veya en azından en aza indirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Yankının bilimi olarak adlandırılan akustik maddeselliğin bulunduğu alanlarda dalgaların yayılmasını konu edinen bilim dalına denir. Aeroakustik ise havanın akustik etkisine verilen isimdir. Bir başka ifadeyle aeroakustik aerodinamik temelli ses oluşumunun konu edinildiği bilim dalıdır. Aerodinamik temelli ses oluşumu istenmeyen şekillerde olduğunda gürültü adını alır. Gürültü olgusu akışın düzensizliklerinden ve akışkanın cisimler ile aerodinamik olarak etkileşmesinden kaynaklanabilir. Günlük hayatımızda taşıtlardan havalandırma sistemlerine temizlik aletlerinden bilgisayarlarımızda dahi bulunan fan sistemlerine kadar her alanda sıklıkla karşımıza çıkan aerodinamik gürültü mühendislik temel bilimleri için üstünde durulması ve giderilmesi gereken önemli bir problemdir.

Sunulan bu çalışmada, savaş uçaklarında mühimmat saklama kısımlarındaki gibi mühendislik çalışmalarında ve tasarımlarında fazlaca karşımıza çıkan kavite olarak betimlenen basit geometrilerin oluşturduğu aeroakustik etki üzerine çalışılmıştır. Kavite akışlarında aerodinamik temelli ses oluşum fenomenini temel ve basit bir şekilde açıklayacak olursak, serbest akış ön duvara gelip çarpar. Serbest akışın barındırdığı sınır tabaka ön duvarda kopar ve kayma tabakası ayrılmasını, başka bir ifade ile kesme tabakasını, oluşturur. Bu oluşan kayma tabakasının ayrılması olayı zaman geçtikçe kavite geometrisi içerisinde girdaplı yapı oluşmasına neden olur. Meydana gelen girdaplar arka duvara çarparak basınç dalgalanmaları oluşturur. Bu basınç salınımları akustik dalgalanmaların oluşumunu tetiklemektedir. Oluşan girdaplı yapının arka duvarla buluşması ses oluşumunun gerçekleşmesine yol açmaktadır. Arka duvara akışın çarpması ve yansıyarak ön duvara yol almasının ardından ön duvardan ayrılan kesme tabakasıyla etkileşir. Bu durum kayma tabakası tarafından yeni girdaplı yapılar oluşmasını besler. Kavite bölgesi akış fiziğini aydınlatmada önemli katkıları bulunan Rossiter, bu amaçla çeşitli deneyler yapmıştır ve bu kavite akış fenomeni Rossiter mekanizması olarak tanımlanmaktadır.

Kavite akışlarının işleyişini ve akış parametrelerini nasıl etkilediğini açıklayabilmek için başlayan çalışmalar daha sonraları kavite akışlarının oluşturduğu istenmeyen etkileri azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmak amacıyla belirli kontrol teknikleri geliştirilmesi çalışmalarıyla devam etmiştir. Bu kontrol teknikleri aktif akış kontrol yöntemleri ve pasif akış kontrol yöntemleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Pasif yöntemlerin en önemli artısı harici bir güce ihtiyaç duymadan akışın istenilen özelliğine etki edebilmesidir. Genellikle tasarım aşamasında akış alanına uygulanan biçimsel değişikliklerle uygulanırlar. Pasif akış kontrol yöntemlerinin müdahaleye açık olmaması, tasarım şartları dışında istenilen verimliliği sağlamaması ve gereksiz sürüklenme kuvveti doğurmaları gibi olumsuzlukları beraberinde getirmektedir. Pasif yöntemlere göre aktif yöntemler daha verimli çalışıyor olmasına rağmen harici enerji ihtiyacı sebebiyle avantajını yitirmektedir.

Bu çalışmada, transonik hız alanında bulunan kavite akışının sayısal yöntemlerle aeroakustik incelemesi yapılmıştır. İncelenen ve deneysel sonuçlarla doğrulanan açık kavite akışı çalışmasının devamında akış alanına uygulanan pasif kontrol tekniklerinin kavite geometrisi üzerindeki zamanla değişen akış alanı parametrelerinin akustik oluşuma etkisi incelenmiştir. Çalışmada üç boyutlu kavite geometrisinde aerodinamik etkiler nedeniyle oluşan gürültü seviyesi akustik analogi yaklaşımı yardımıyla hesaplanacaktır.

Çalışmada kullanılan kavite, literatürde M-219 olarak bilinen, uzunluk/derinlik oranı 5, genişlik/derinlik oranı 1 olan geometrik ölçülere sahiptir. Çalışmalar ticari sonlu hacim çözücüsü Fluent kullanılarak incelenmiştir. Analizlerde IDDES (Geliştirilmiş Gecikmeli Ayrılmış Girdap Benzeşimi) türbülans modeli akışı simüle etmek için kullanılmıştır. Hesaplama koşulları test koşullarıyla aynı kalacak şekilde çalışılmıştır. Bu koşullar Sıcaklık(T) = 267K, Basınç(P) = $6.21 \times 10^4 Pa$, $Re = 13.5 \times 10^6/m$ ve (M_∞) = 0.85 olacak şekilde tasarlanmıştır. Hesaplamalarda zaman adımı $2 \times 10^{-5} s$ ve örneklem zamanı 0.2 s olarak tanımlanmıştır. Deneysel çalışmada kavite içine yerleştirilenler ile aynı konumda olacak şekilde konumlandırılan mikrofonlar yardımıyla Ffowcs Williams-Hawking denklemi kullanılarak genel ortalama ses basıncı seviyesi (Overall Sound Pressure Level (OASPL)) ve Ses Basınç Seviyesi (SPL) belirlenmiştir. SPL-Frekans grafikleri üzerinden de ses seviyeleri karşılaştırılmıştır. Ayrıntılı ölçümlerle deneysel anlamda geniş çapta belgelenmiş transonik kavite akışı, M219, mevcut sayısal yöntemler ve türbülans çözme modelinin

verileri ile karşılaştırmak ve doğrulamak için kullanılmıştır. Çalışmada önerilen sayısal çözüm yönteminin doğrulama çalışması Rossiter modları cinsinden, OASPL değerleri kıyaslamasından ve SPL-Frekans spektrumu çıktıları karşılaştırmaları sonucu ortaya konulmuştur. Mevcut yaklaşımın, kavite fiziğinin etkilediği akış alanında aerodinamik temelli ses oluşumu incelenmiş olup, deneysel verileri başarıyla yakalayabildiği gösterilmiştir. Hesaplamadan elde edilen basınç numunesindeki frekans ve karakter özellikleri, deneysel sonuç ölçümleriyle iyi bir uyum göstermektedir. OASPL değerleri, ölçümler ve simülasyonlar arasında 3 dB'den daha az farklılık göstermektedir. Yapılan analizler sonucunda temiz kavite için akış alanını 2.5×10^6 nokta sayısında ayırklaştırmak, deneysel verilerle uyum açısından tutarlı sonuçlar vermektedir. Ağ sayısından bağımsızlık çalışması yapılmasından sonra ağ yapısının kalite açısından sorun teşkil etmemesi amacıyla y^+ değeri çalışması üzerinde durulmuştur. Yapılan çalışmalarda bulunan sonuçlar ışığında ve daha önceki çalışmalardan da yola çıkarak $y^+ = 200$ değerinde karar kılınmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında kavite akışına 16 farklı pasif kontrol yöntemi uygulanmadan önce ayırklaştırmanın daha kolay şekilde sağlanabilmesi için yapısal ve yapısal olmayan ayırklaştırma kıyaslaması yapılmıştır. Bütün değerler aynı tutularak yapılan karşılaştırma sonucu yapısal olmayan ağ ayırklaştırması kabul edilebilir sonuçlar vermiştir. Çalışmanın her aşamasında deneysel sonuçlar referans olarak alınmıştır. Analizler sonucu elde edilen veriler deneysel sonuçlarla kıyaslanmış ve doğrulanmıştır.

Çalışmanın ikinci kısmında temiz kavite geometrisinden yola çıkılarak kavite geometrisine 16 farklı pasif kontrol yöntemi uygulamaları yapılmıştır. Bu pasif kontrol yöntemleri kavite ön duvarına ve arka duvarına eğimler verilmesini ve bu iki duvarın belirli ölçülerde kısaltılmasını kapsamaktadır. Bu kontrol yöntemlerinin akustik etkileri irdelenmiştir. Beklendiği üzere ön duvara yakın konumlandırılan mikrofondan alınan SPL değerleri ile arka duvara yakın konumlandırılan mikrofondan alınan verilerine göre 15 dB daha az olduğu saptanmıştır. Ayrıca kavite arka duvarına verilen eğimlerin, kavite ön duvarına verilen eğimlerine göre gürültü seviyesini düşürmede daha başarılı oldukları ortaya konulmuştur. Bu çıktılarına göre ses oluşumunda arka duvar etkisinin önemini, diğer bir ifade ile arka duvara çarpan akışın daha fazla gürültüye sebep olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar arka duvara eğim verilerek gürültü seviyesini azaltılabileceği sonucuna varmamızı sağlamaktadır. Bütün durumlar irdelendiğinde en kötü sonuçları kavite ön duvarına verilen 30 ve 60 derecelik eğimlere sahip olan durum 5 ve durum 7'nin verdiği, en iyi sonucu ise iki farklı kontrol yönteminin birleşimi olan kavite ön duvar 1 inç boyunca kesildiği ve arka duvar tabanından 60 derece eğim verildiği durumun sağladığı söylenebilmektedir. Bu pasif kontrol yöntemi, yaklaşık 13 dB'lik bir aerodinamik temelli gürültü seviyesindeki azaltıcı yönde çalışıyor olması bu hususta uygulanan kontrol yöntemleri arasında öne çıkmasını sağlamaktadır. Genel itibarıyla aerodinamik temelli gürültüyü azaltıcı yönde etki gösteren durumların tamamında arka duvar eğim etkisinin önemi açığa çıkmaktadır.



AEROACUSTIC INVESTIGATION OF TRANSONIC CAVITY FLOW

SUMMARY

Cavity structures, which are the basis of this study, are the geometries that are frequently encountered in various designs in the field of engineering. Cavity flows, on the other hand, can be defined as flow types that deal with the flow fields that these geometries affect or affect these geometries. Cavity flows are one of the most important engineering problems that attract the attention of different engineering fields, due to the simplicity of their geometry, and the fact that the variable interactions that occur depending on time create irregular and highly random flow areas. In order to examine the effects of warplanes on weapon compartments and the equipment contained in these compartments, research on void flows that began in the mid-20th century under the leadership of military companies has been examined in a wide range from the automotive industry to the construction sector, especially aircraft landing gear and ammunition slots in attack aircraft. In the fifth generation attack type aircraft, payloads have started to be carried inside the fuselage for various reasons, especially reducing the radar visibility. These slots in which warplanes carry ammunition in the fuselage are called cavities in aviation. Despite its simplicity, cavity flows can have negative effects that need to be addressed. These geometries can be the source of undesirable problems such as drag forces, pressure forces, vibration problems and noise in the flow area.

Cavity geometries are structures open to study and research because they create strong acoustic effects, randomness and turbulence by disrupting the aerodynamic surface with the flow fields they create. As it is well known, the necessary lifting force for aircraft to fly is achieved by accelerating to high speeds. At high speeds, environments that disrupt the aerodynamic structure such as cavity are extremely challenging. Ammunition separation inconsistency can lead to negative results such as unstable flow field, severe pressure swings, unwanted acoustic loads, which is also the subject of this study. Therefore, it is of great importance to control or at least minimize these effects.

It is called the science of reverberation, which deals with the propagation of waves in areas where acoustic materiality exists. Aeroacoustics is the name given to the acoustic effect of air. In other words, aeroacoustic is the science that deals with aerodynamic-based sound formation. When aerodynamically based sound formation is in an undesirable shape, it is called noise. The noise phenomenon can be caused by the irregularities of the flow and the aerodynamic interaction of the fluid with the bodies. Aerodynamic noise, which is frequently encountered in every field in our daily lives, from vehicles to ventilation systems, from cleaning tools to fan systems even in our

computers, is an important problem that needs to be emphasized and eliminated for engineering fundamental sciences.

In this study, the aeroacoustic effect created by simple geometries described as cavities, which is frequently encountered in engineering studies and designs, as in the ammunition storage parts of warplanes has been studied. If we explain the aerodynamically based sound generation phenomenon in cavity flows in a basic and simple way, the free flow comes and hits the front wall. The boundary layer of the free flow separates at the front wall and forms the shear layer. The separation of this shear layer causes the formation of a vortex shedding in the cavity geometry as time passes. The eddies that occur hit the back wall, creating pressure fluctuations. These pressure oscillations trigger the formation of acoustic fluctuations. The meeting of the formed swirl flow with the rear wall leads to the occurrence of sound formation. After the flow hits the rear wall and is reflected back to the front wall, it interacts with the shear layer separated from the front wall. This situation fosters the formation of new vortex sheddings by the shear layer. Rossiter, who has made important contributions to clarify the physics of cavity flow, has made various experiments for this purpose and this cavity flow phenomenon is defined as the Rossiter mechanism.

The studies that started to explain the operation of cavity flows and how they affect flow parameters continued with the development of certain control techniques in order to reduce or completely eliminate the undesirable effects of cavity flows. These control techniques are divided into two as active flow control methods and passive flow control methods. The most important advantage of passive methods is that they can affect the desired feature of the flow without the need for an external power. They are usually applied with formal changes applied to the flow field at the design stage. Passive flow control methods bring with them the negativities such as not being open to intervention, not providing the desired efficiency outside the design conditions and creating unnecessary drag force. Although active methods work more efficiently than passive methods, they lose their advantage due to the need for external energy.

In this study, aeroacoustic analysis of the cavity flow in the transonic velocity field was performed using numerical methods. In the continuation of the open cavity flow study, which was examined and confirmed by experimental results, the effect of the passive control techniques applied to the flow field on the cavity geometry and the time-varying flow field parameters on the acoustic formation was investigated. In the study, the noise level due to aerodynamic effects in the three-dimensional cavity geometry will be calculated with the help of acoustic analogy approach.

The cavity used in the study has geometric dimensions known as M-219 in the literature, with a length/depth ratio of 5 and a width/depth ratio of 1. Studies were examined using the commercial finite volume solvent Fluent. In the analyses, the IDDES (Improved Delayed Separated Eddy Simulation) turbulence model was used to simulate the flow. Calculation conditions were studied in such a way that they remained the same as the test conditions. These conditions are designed to be Temperature(T) = 267K, Pressure(P) = $6.21 \times 10^4 Pa$, $Re = 13.5 \times 10^6/m$ and (M_∞) = 0.85. In the calculations, the time step is defined as $2 \times 10^{-5} s$ and the sampling time as 0.2 s. In the experimental study, the overall average sound pressure level (OASPL) and Sound Pressure Level (SPL) were determined by using the Ffowcs

Williams-Hawking equation with the help of microphones positioned in the same position as those placed in the cavity. Sound levels were also compared over SPL-Frequency graphs. Experimentally widely documented transonic cavity flow with detailed measurements, M219 was used to compare and validate with data from existing numerical methods and turbulence resolution model. The validation study of the numerical solution method proposed in the study is presented in terms of Rossiter modes, from the comparison of OASPL values and the comparison of SPL-Frequency spectrum outputs. The aerodynamic-based sound generation in the flow area affected by the cavity physics of the current approach has been investigated and it has been shown that it can successfully capture the experimental data. The frequency and character properties in the pressure sample obtained from the calculation show good agreement with the experimental outcome measurements. OASPL values differ by less than 3 dB between measurements and simulations. As a result of the analyzes made, discretizing the flow field for a clean cavity at the number of 2.5×10^6 points gives consistent results in terms of agreement with the experimental data.

After the study of independence from the number of nets, the study of y^+ value was emphasized so that the network structure would not pose a problem in terms of quality. In the light of the results of the studies and based on the previous studies, the value of $y^+ = 200$ was decided. In the second part of the study, before applying 16 different passive control methods to the cavity flow, a comparison of structural and non-structural discretization was made in order to provide discretization more easily. As a result of the comparison made by keeping all values the same, the unstructured network discretization gave acceptable results. Experimental results were taken as reference at each stage of the study. The data obtained as a result of the analyzes were compared with the experimental results and verified.

In the second part of the study, 16 different passive control methods were applied to the cavity geometry, starting from the clean cavity geometry. These passive control methods include inclining the front wall and rear wall of the cavity and shortening these two walls to a certain extent. The acoustic effects of these control methods are examined. As expected, the SPL values obtained from the microphone positioned close to the front wall were found to be 15 dB less than the data obtained from the microphone positioned close to the rear wall. In addition, it has been revealed that the slopes given to the cavity rear wall are more successful in reducing the noise level than the slopes given to the cavity front wall. According to these outputs, it reveals the importance of the rear wall effect in sound formation, in other words, the flow hitting the back wall causes more noise. These results allow us to conclude that the noise level can be reduced by inclining the rear wall. When all cases are examined, it can be said that case 5 and case 7, which have 30 and 60 degree slopes given to the front wall of the cavity, give the worst results. In addition, it can be said that the best result is provided by the combination of two different control methods, where the front wall of the cavity is cut along 1 inch and a slope of 60 degrees is given from the base of the rear wall. The fact that this passive control method works in the direction of reducing an aerodynamic-based noise level of approximately 13 dB makes it stand out among the control methods applied in this study. In general, when all the cases are examined, the inclined structure of the cavity rear wall is important because it has an aerodynamic-based noise-reducing effect.



1. GİRİŞ

Kavite akışları farklı mühendislik alanlarının ilgisini çeken, geometrilerinin basitliğine rağmen zamana bağlı olarak oluşturduğu değişken etkileşimlerinin düzensiz ve rastgeleliği yüksek akış alanları oluşturması sebebiyle üzerinde sıklıkla durulan önemli mühendislik problemlerinden biridir. Kavite akışları üzerine araştırmalar, 1940’larda askeri şirketler tarafından, savaş uçaklarının silah bölmeleri ve bu bölmeler içindeki ekipmanların üzerindeki etkilerini incelemek için başlanmış olup, hava araçları iniş takımları ve taarruz uçaklarındaki mühimmat yuvaları başta olmak üzere otomotiv sanayisinden inşaat sektörüne kadar geniş bir yelpazede irdelenmektedir [1]. Uçaklarda kavite çalışmalarının yanı sıra, otomobil içindeki aeroakustik bozulmaların kontrolü gibi endüstriyel uygulamalarda da kavite akışları görülebilir [2]. F-35 gibi beşinci nesil olarak adlandırılan savaş uçaklarında taarruz ekipmanları önceki nesillerden farklı olarak gövde içerisinde taşınmaktadır. Şekil 1.1’de faydalı yükün gövde içerisinde taşınmasına bir örnek teşkil eden F-35B’nin gövde içerisinde bulunan faydalı yükler gösterilmiştir. Ayrılma esnasında kapaklar açılır ve bu oluşan basit geometri kavite olarak adlandırılmaktadır. Şekil 1.2’de ise mühimmatın gövde dışında taşındığı F-16 gösterilmiştir. Gövde dışında faydalı yük taşımanın ortaya koymuş olduğu olumsuzluklar sebebiyle yeni nesil avcı uçaklarında gövde içi taşımaya yönelinmiştir. Özellikle avcı savaş uçaklarında faydalı yüklerin gövde dışından gövde içine alınmasının başlıca sebepleri uçağın radar görünürlüğüne düşürmek ve uçağın dışında mühimmat taşımanın aracın aerodinamik yüzeyini bozmasının önüne geçmek olarak ifade edilebilmektedir. Savaş uçaklarının gövde içinde mühimmat taşıdıkları bu yuvalar havacılıkta kavite olarak isimlendirilmektedir. Kaviteler üzerlerini kapatan kapaklarının açılmaları ardından oluşturdukları yeni akış alanı ile aerodinamik yüzeyi bozarak güçlü akustik etkiler, rastgelelik ve türbülans oluşturmaları sebebiyle incelenmeye ve araştırılmaya açık yapılardır [3]. İyi bilindiği üzere hava araçlarının uçabilmesi için gerekli kaldırma kuvvetinin eldesi yüksek hızlara çıkmasıyla sağlanır. Yüksek hızlarda, kavite gibi aerodinamik yapıyı bozan ortamlar son derece zorludur. Mühimmat ayrımı, kararsız akış alanı, şiddetli basınç salınımları, büyük akustik yük gibi istenmeyen sonuçlara yol açabilir. Dolayısıyla bu etkilerin kontrol altına alınması veya en azından en aza indirilmesi büyük önem taşımaktadır [4].



Şekil 1. 1: Kapakları açıkken F-35B'nin silah bölmesi [5].



Şekil 1. 2: F-16 gövde dışı faydalı yük taşıması [6].

Modern zamanların görünmezlik gibi yeni ihtiyaçları beraberinde getirmesiyle birlikte modern savaş uçakları ve İnsansız Muharebe Hava Araçları bomba ve füzelerini görünmezlik için kavite olarak bilinen silah bölmelerinde taşıma eğilimindedir. Transonik ve süpersonik gibi yüksek hızlarda, kavite içindeki akış gerçekten kararsız hale gelir ve bu da gövdede fiziksel hasara ve ayrıca uçağın gizlilik karakterizasyonu üzerinde istenmeyen bir etkiye neden olabilir. Ayrıca, uçak gövdesi tarafından üretilen gürültüye kritik bir katkıda bulunur, dolayısıyla bu tür akış olaylarını anlamak ve tahmin etmek çok önemli bir önceliktir [7] [8].

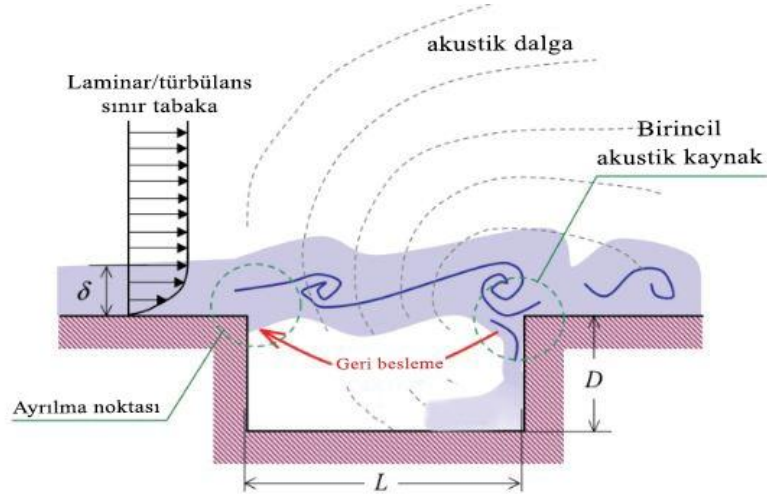
Akustik; yankı bilimi diye de adlandırılan fiziksel ortamlarda (katı, sıvı ve gaz) dalga yayılımını inceleyen bilim dalıdır. Havanın etkileşimleri sonucu üretilen ses ise hava-akustiği “aeroakustik” ismiyle ifade edilebilmektedir. Bir başka ifadeyle aeroakustik aerodinamik temelli ses oluşumunun konu edinildiği bilim dalıdır [9]. Aerodinamik temelli ses oluşumu istenmeyen şekillerde olduğunda gürültü adını alır. Gürültü zamana bağlı olarak değişen akışın fiziksel yapısındaki düzensizliklerden ve bu akışın yüzeylerle veya cisimlerle arasındaki aerodinamik iletişimlerinden kaynaklanabilir. Günlük hayatımızda taşıtlardan havalandırma sistemlerine temizlik aletlerinden bilgisayarlarımızda dahi bulunan fan sistemlerine kadar her alanda sıklıkla karşımıza çıkan aerodinamik gürültü mühendislik temel bilimleri için üstünde durulması ve giderilmesi gereken önemli bir problemdir. Kara araçları cam kenarları ve hava araçlarında bulunan kavite olarak tanımladığımız silah bölmeleri ile iniş takımı kısımları aerodinamik sebepli gürültünün sıklıkla karşımıza çıktığı sorunlu bölgelerdir. Bu bölgelerde oluşan aerodinamik gürültü sağlık ve konfor şartlarını tehdit etmesinin yanı sıra araçlarda yapısal sorunlara da yol açmaktadır [10]. Bunlarla birlikte havaalanları etrafı gürültü seviyesi dikkate değer bir konudur. Havaalanları daha çok şehir dışlarına yapılmış olsa da günümüzde çoğunlukla şehirler havaalanlarını çevrelemiş durumdadır. Buna ek olarak ulaşımda hava araçlarının kullanımında da ciddi artışlar söz konusudur. Bu durumlara bağlı olarak havaalanı etrafındaki yerleşkeleri etkileyen uçak gürültüleri son yıllarda üzerinde durulan tartışma ve araştırma konusu haline gelmiştir [11]. Bu kavite geometrisi kaynaklı meydana gelen aeroakustik olgunun anlaşılması ve gürültü azaltıcı kontrol tekniklerinin geliştirilmesi hem sayısal hem deneysel olarak eğilimlerin olduğu bir çalışma alanıdır [10].

1.1 Kavite Akışı

1.1.1 Kavite akış fiziği

Sunulan bu çalışmada, taarruz uçaklarının faydalı yük depolama bölmelerindeki gibi havacılık uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan kavitelerin meydana getirdiği aeroakustik etki üzerine çalışılmıştır.

Kavite akışını temel ve basit bir şekilde açıklayacak olursak içinde sınır tabaka oluşmuş vaziyette kaviteye gelen serbest akım kavite ön duvarında kopar ve kayma tabakası ayrılmasını, başka bir ifade ile kesme tabakası, oluşturur. Meydana gelen kayma tabakası ayrılması zamanla kavite içinde girdaplar oluşturur ve kavite arka duvarına çarpar. Bu girdaplı akışın arka duvara çarpması sebebiyle basınç değişimleri meydana gelir. Bu basınç salınımları akustik dalgalanmaların oluşumunu tetiklemektedir. Basınç salınımlarının artışı ele alındığında zamana bağlı olarak akışın etki ettiği bölgede istenmeyen sürüklenme kuvveti ve gürültü seviyesindeki yükselmeye sebep olmaktadır. Akış hızının ses hızından fazla olduğu akış problemlerinde bu etki şiddetli basınç değişimleri olarak karşımıza çıkmaktadır ve yapı üzerinde yorulmaya bağlı hasarlar bile oluşturabilmektedir [12]. Hava araçları mühimmat bölmesinden çıkış yapan bir cismin istenilen hedefe belirlenen yörüngeyi takip ederek ulaşması önemli bir konudur. Ama bu yüksek basınç salınımları çıkış yapan cismin istenilen hedeften sapmasına ve dahası uçak yapısında hiç istenmeyecek kaza kırılmalarına neden olabilmektedir [13]. Kavite akış fiziği temel hatlarıyla Şekil 1.3'te ifade edilmiştir [14].



Şekil 1. 3: Kavite akışı şematik gösterimi [14].

Kavite geometrisi akış fiziğini anlayabilmek ile başlayan ve daha sonra içinde barındırdığı olumsuz etkilere çözüm sunabilmek adına yapılan çalışmalar neticesinde görece bu basit geometrinin barındırdığı karmaşık akış etkileşimlerini zarar verici etkilerinden uzakta tutabilmek için belirli kontrol teknikleri geliştirilmiştir. Bu teknikler genel olarak aktif ve pasif akış kontrolleri olarak iki kısma ayrılır [15]. Bu kontrol yöntemleri uygulamalarda ve araştırmalarda sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Pasif akış kontrol yöntemlerini ele alacak olursak en önemli özelliği bir enerji kaynağına ihtiyaç duymaksızın karmaşık akıştan doğan fiziksel özellikleri istenilen değerlerde tutmasıdır. Çoğunlukla tasarım aşamasında karşımıza geometri üzerinde yapılan karmaşık olmayan değişiklikler ile çıkmaktadır. Pasif akış kontrol yöntemlerinin müdahaleye açık olmaması, tasarım şartları dışında istenilen verimliliği sağlamaması ve gereksiz sürüklenme kuvveti doğurmaları gibi olumsuzlukları beraberinde getirmektedir. Aktif akış kontrol yöntemleri araştırmaları konusunda çalışmalar ilerletilmiş durumdadır. Ancak aktif akış kontrol yöntemlerinin tam anlamıyla verimli bir şekilde çalışabilmesi için yüksek enerjiye ihtiyaç duyması sebebiyle uygulamalarda çok fazla karşılık bulamamıştır [16].

1.1.2 Kavite akışı sınıflandırılması

Her konuda olduğu gibi kavite akışı da daha kolay ayırt edilebilmesi adına tasnif edilmiş ve birtakım hususlar altında benzer özellikleri gelecek şekilde toplanmıştır. Bu sınıflandırma boyutsuz sayılara ve kavitenin geometrik özelliklerine göre oluşturulanları, literatürde daha sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Serbest akım hızının

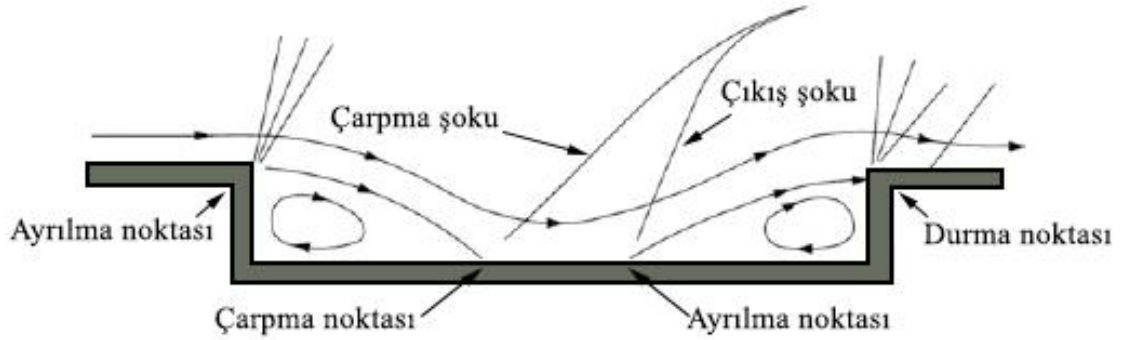
ses hızına oranını belirten Mach sayısına göre, kavite geometrisinin uzunluk/derinlik (L/D) oranına ve kavite geometrisinin uzunluk/genişlik (L/W) oranına göre sınıflandırmalar yapılabilmektedir [17] [18].

Literatürde kavitenin akış yönündeki kısmını ifade eden mesafe parametresi olan uzunluğun derinliğe oranının 1'den küçük olma durumuna derin kavite, 1'den büyük olma durumuna ise sığ kavite denilmektedir. Ancak bu oran Rossiter tarafından 0,4 olarak ifade edilmiştir. Derin kavitelerde iki devir daim bölgesi oluşurken sığ kavitelerdeki oluşumları kavitenin uzunluk ve derinlik parametreleri yönetmektedir [17] [19].

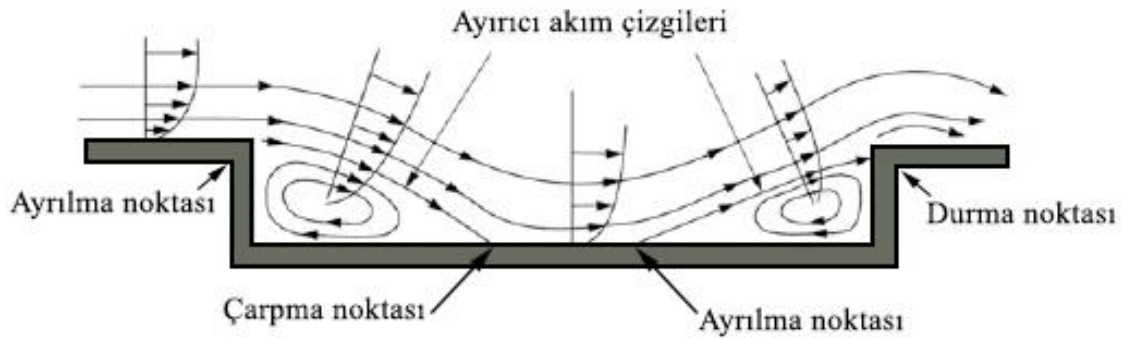
Tracy ve Plentovich ses altı ve ses hızı civarında yani subsonik ve transonik bölgede kavite derinliği sabit kalacak şekilde, kavite genişliğini değiştirerek çalışmalar yapmışlardır. Çalışma sonunda ulaşılanlara göre kavite genişliğine bağlı olarak basınç salınımları farklılık göstermekte ve akış fiziğinin genişlik parametresinden etkilenmektedir sonucunu ortaya koymuşlardır. Block'un ve Ahuja ile Mendoza ikilisinin kavite uzunluk/genişlik oranı üzerinde yaptıkları çalışmalarda, akustik alan oluşumu L/W oranına göre şekillenmektedir. Kavite uzunluk/genişlik oranının 1'in altında olduğu akışlarda iki boyutlu akustik alan oluşumu gözlemlenirken, L/W 'nin 1'in üzerinde kaldığı kavite akışlarında üç boyutlu bir akustik alan meydana gelmektedir. Kavitenin genişliği frekans değerinin tepe noktasını değiştirmemekle birlikte etkisini değiştirmektedir. Yani meydana gelen basınç kuvveti değerini etkilemektedir [20] [21] [22].

Kavite akışı uzunluk/derinlik ve uzunluk/genişlik sınıflandırmaları önemli olsa da genel itibariyle L/D oranı ve serbest akım hızının ses hızına oranı olarak ifade edilen Mach sayısı temelinde yapılan sınıflandırmalarla daha sıklıkla karşılaşılmaktadır. Bu bağlamda kavite bölgesindeki basınç dalgalanmalarının deneysel çalışmalarla incelenmesi sonucunda kavite akışları kapalı kavite akışları, açık kavite akışları ve geçiş bölgesi kavite akışları olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Süpersonik akış alanı içerisindeki kavitelerde, uzunluk/derinlik oranı 13 değerine eşit veya büyük olduğu takdirde kapalı kavite akışları olarak adlandırılır. Kapalı kavite akışları sığ kavitelerde gerçekleşen akışlardır. L/D ölçeğinin 10'dan az olduğu akışlar ise açık kavite akışları olarak adlandırılmaktadır. Eğer L/D değeri 10'dan büyük 13 değerinden küçük ise bu tip akışlara geçiş bölgesi kavite akışları denilmektedir [23] [24].

Kapalı kavite akışlarında, L/D oranı 13' e eşit veya büyük olan kavite akışlarında, serbest akışın meydana getirdiği sınır tabaka kavite ön duvarında ayrılır, sonra kavitenin alt yüzeyine çarpar ve ardından kavitenin arka bölgesinde serbest akışla tekrar birleşir. Şekil 1.4 ve şekil 1.5'te ses üstü ve ses altı hızlar için kapalı kavite akışı şematik gösterimi verilmiştir. Kayma tabakasının ayrıldığı duvara hücum duvarı ya da kenarı, birleşimin gerçekleştiği durma noktasının olduğu arka duvara da firar kenarı denilmektedir. Kapalı kavite akışında akustik tonlar gelişmez. Ancak kavitenin ön duvarına yakın alçak basınç bölgesi ve arka duvarına yakın yüksek basınç bölgesi nedeniyle, akış yunuslama anı yaşama eğilimindedir. Kavite tabanıyla etkileşime giren kesme tabakası, kavite içerisindeki akış alanında iki farklı girdap bölgesi oluşturur. Ses hızından yüksek hızlarda akışa maruz kalan kapalı kavitelerde kayma tabakasının kavite tabanına çarpması ve ayrılması şok dalgalarının meydana gelmesini tetiklemektedir [25] [17] [26].



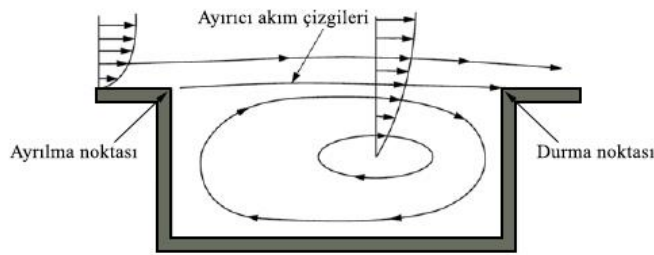
Şekil 1. 4: Ses üstü hızlarda kapalı kavite akışı [10].



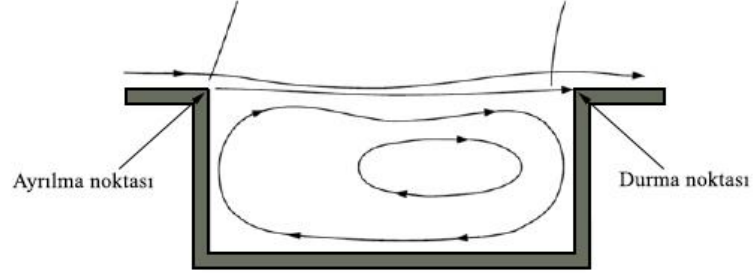
Şekil 1. 5: Ses altı hızlarda kapalı kavite akışı [10].

Açık kavite akışları yani derin olan kavitelerde meydana gelen akışlar, ses hızının üzerinde seyreden akışkan tesirinde uzunluk/derinlik oranının 10'dan küçük olan

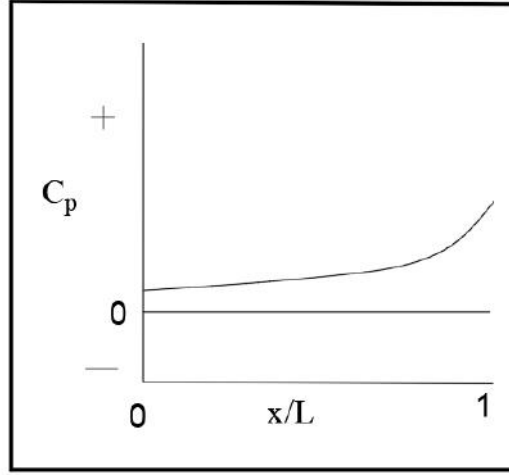
kavitelerde oluşmaktadır. Şekil 1.6'da ve Şekil 1.7'de gösterildiği üzere, $L/D < 10$ olduğu kavitelerde serbest akım sınır tabakası kavite ön duvarında kapalı kavitelerde olduğu gibi ayrılır. Bu ayrılan kayma tabakası, kavitenin uzunluğu boyunca uzanır ve arka duvara çarpar. Bir diğer ifadeyle kavite tabanına çarpmadan kavite arka duvarında tekrar serbest akım ile birleşir. Bu şekilde akış alanı kavite içi ve kavite dışı olarak iki bölgeye ayrılır. Bu bölgeler arasında bir basınç farkı meydana gelerek kavite içi ve dışı arasında bir kütle transferi oluşumunu meydana getirir. Yani bu iki kısım arasında sirkülasyon oluşur. Kavite arka duvarına çarpan kesme tabakası sadece hafif bir artışla, kavite zemini boyunca statik basınç dağılımını neredeyse tekdüze hale getirerek, açık kavitelerde geniş tek bir sirkülasyon bölgeleri oluşturulur. Oluşan bu basınç dağılımı güvenli faydalı yük ayrılmasına izin verdiği için arzu edilir. Şekil 1.8'de bu basınç dağılımı gösterilmiştir [10]. Kesme tabakasının arka duvarla teması güvenli ayırma için istense de sadece silah yuvasına değil diğer yapısal parçalara da zarar verebilecek büyük akustik tonlar üretebilmektedir [1]. Bununla birlikte, kesme tabakasının arka duvara çarpması, yalnızca depoda değil, aynı zamanda kaviteyi çevreleyen yapıda da titreşimlere neden olabilen yüksek yoğunluklu akustik tonların gelişmesine neden olur. L/D oranının değişimine göre kavite içerisinde meydana gelen girdap yapıları da farklılıklar göstermektedir. Süpersonik açık kavite akışlarında hücum ve firar kenarlarında eğik şoklar oluşmaktadır. Kayma tabakası kavite arka duvarına çarpması yüksek basınç dalgalanmalarını meydana getirir ve bu durum da kavite içine akustik dalgalanmalara sebep olur. Bu çalışmanın konusu olan açık kavite akışları mühendislik çalışmaların daha çok kendine yer bulmaktadır [10] [17] [25] [19].



Şekil 1. 6: Ses altı hızlarda açık kavite akışı [1].



Şekil 1. 7: Ses üstü hızlarda açık kavite akışı [1].



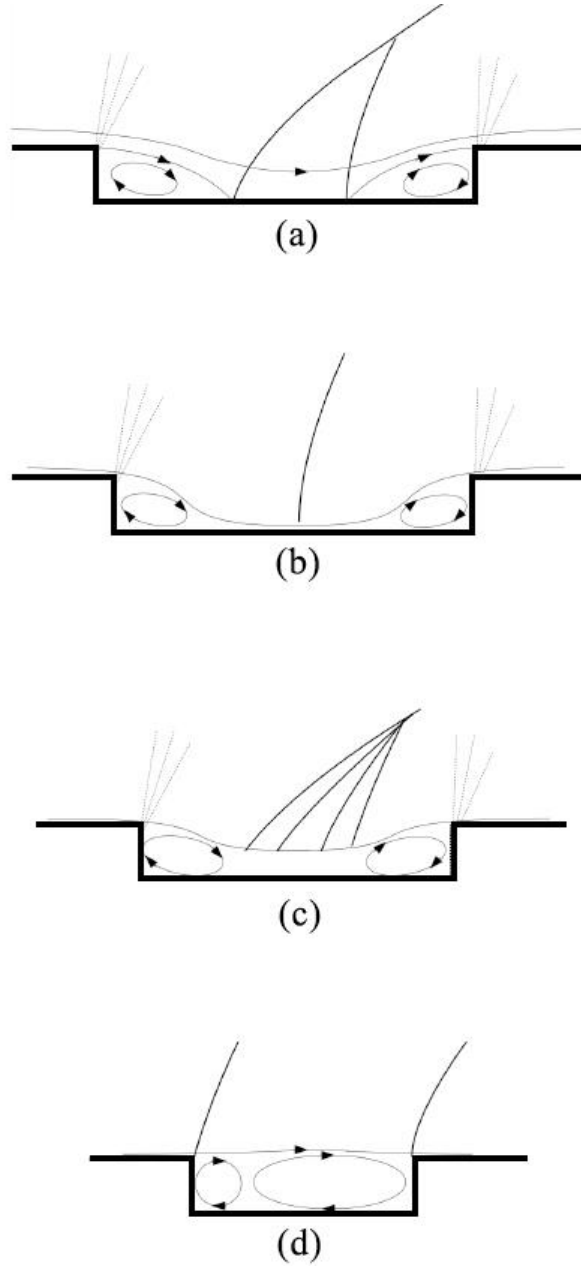
Şekil 1. 8: Açık kavitelerde Transonik ve subsonik hızlarda basınç katsayısı dağılımı [10] [18].

Açık kavite akışlarında kayma tabakası kavite içerisinde tabana çarpmadan yeterli enerjiyi toplayarak kavite arka duvarına ulaşabilmektedir. Kavite akışı zamana bağlı ve oldukça kararsız bir akış türü olduğundan, üretilen kesme tabakası kavite üst kısmı üzerinde salınır ve dengesizlikler yaratır. Kavite ön duvarından ayrılan kesme tabakası kavite üzerinde salınımlar gerçekleştirir ve dengesizliklere yol açar. Bu dengesiz dalgalanmalar periyodik olarak oluşmaya başlar. Kararsızlık dalgaları da denilen bu oluşumlar Kelvin-Helmholtz kararsızlığı tarafından üretilen Kelvin-Helmholtz girdaplarını oluşturur. Bulutlarda görülen Kelvin-Helmholtz dengesizliklerinin temsili bir görseli Şekil 1.9'da sunulmuştur.



Şekil 1. 9: Bulutlarda görülen Kelvin-Helmholtz kararsızlıkları [27].

Geçiş bölgesi kavite akışları yukarıda belirtilen açık ve kapalı kavite akışları arasında kalan, uzunluk/genişlik oranının 10 ile 13 arasında olduğu kavite akışlarına verilen isimdir. Kavite içerisindeki akışı yönlendiren birçok değişken olduğu için geçiş bölgesi akışları hakkında net ifadeler kullanmak oldukça zordur. Şekil 1.10'de kapalıdan açığa doğru olacak şekilde geçiş bölgesindeki kavite akışları belirtilmiştir. Geçiş bölgesinde L/D oranı 10 değerine yaklaştıkça akış, açık kavite akışı özellikleri gösterirken, L/D oranı 13 değerine doğru gittikçe kapalı kavite akışı benzerlikleri oluşmaktadır. Akış kapalı kavite aralığında iken, yani L/D oranı 13'ten büyük olduğu durumlarda, bu oran azaldıkça kayma tabakasının meydana getirdiği şoklar birbirine yaklaşır ve açık kavite akışı bölgesine geçişle birlikte bu şoklar tek bir şok dalgası oluşturur [17] [25] [26].

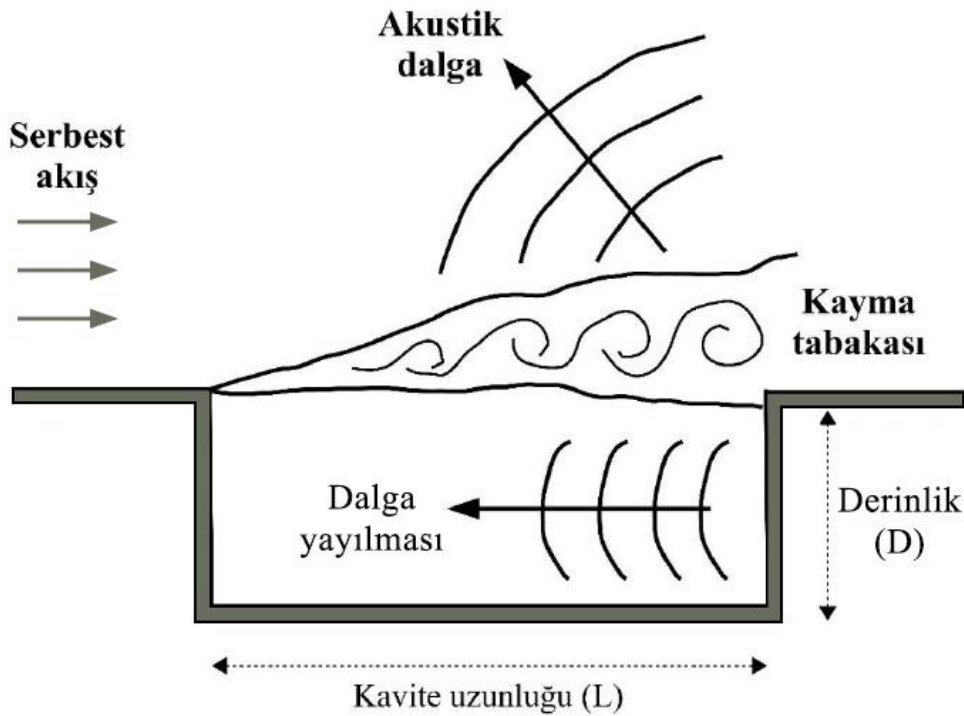


Şekil 1. 10: (a) Kapalı kavite akışı, (b) Kapalıya yakın geçişli kavite akışı, (c) Açığa yakın geçişli kavite akışı, (d) Açık kavite akışı [28].

1.2 Rossiter Mekanizması

Kavite bölgesi akış fiziğini aydınlatmada önemli katkıları bulunan Rossiter, bu amaçla çeşitli deneyler yapmıştır [19] [29] [30]. Bu deneyler ışığında kavite akışını dört ana mekanizma ile belirtmiştir. İlk olarak serbest akım kavite ön duvarı ile buluşur, akım ayrılması neticesinde girdaplar oluşur ve bu girdaplar arka duvara doğru hareketine devam eder. İkinci bölümde bu girdaplar arka duvarla etkileşerek akustik dalgaların oluşumunu sağlar. Üçüncü olarak oluşan akustik dalgalar iki kısma ayrılır. Kavite

uzağına doğru yönelen dalgalar akustik alanı meydana getirirken, kavite içinde kalan akustik dalgalar basınç salınımlarını oluşturur. Dördüncü ve son bölümde ise kavitenin içinde ön duvar bölgesine giden dalgalanmalar, ön duvar etkileşimi sonrasında kayma tabakasında yeni girdap oluşumunu besler. Geri besleme mekanizması veya Rossiter mekanizması olarak isimlendirilen bu süreç akış enerji barındırmaya devam ettiği sürece kendini tekrar ederek devam eder [19] [22] [31]. Oluşan geri besleme mekanizması (Rossiter mekanizması) Şekil 1.11’de şematik olarak gösterilmiştir.

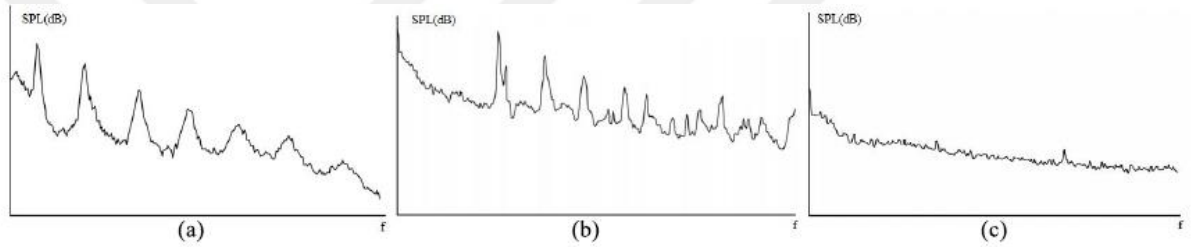


Şekil 1. 11: Rossiter Mekanizması [22].

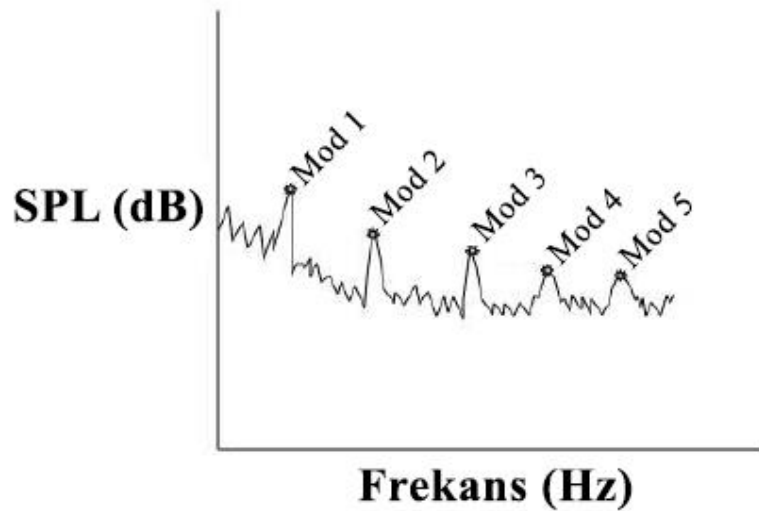
Bir diğer ifadeyle kavite arka duvardan gelen basınç salınımı bir karşı akış gibi davranarak kavite ön duvarı etkisiyle oluşan kayma tabakası ile birleşerek girdap kopma frekansını etkilemektedir. Rossiter'in kavite akışının son bölümü olarak ifade ettiği bu olayı zamana bağlı değişimi akustik sinyali meydana getirir. Bu değişim kavite içinde zamanla bağlaşıklık-alan fiziğinin meydana gelmesini sağlar. İlk etapta zorlayıcı olmayacak gibi düşünülen basit kavite geometrisi bu çift yönlü bağlaşıklık-alan fiziğinin etkisiyle zorlayıcı ve kompleks bir mühendislik problemine dönüşmektedir. Kavite akış geometrilerinde çift yönlü etkileşim yapısının anlaşılabilmesi ve tesir alanının belirlenmesi önem arz etmektedir [32].

1.2.1 Rossiter modları

Rossiter, kavite akışları üzerine yapmış olduğu çeşitli çalışmalardan elde ettiği bilgilere dayanarak kavite salınım modlarını tahmin etmek için bir model geliştirmiştir. Bu modların, akışın akustik etkisi hakkında deneylere gerek kalmadan bilgi verebilme kabiliyeti açısından belirlenmesi önem teşkil etmektedir. Rossiter tarafından önerilen yarı ampirik model, kavite arka duvarından geçen girdapların neden olduğu akustik radyasyon ile girdap saçılması ve akustik dalgalar arasında bir geri besleme döngüsü olduğunu ortaya koymaktadır. Salınım modları, Şekil 1.12’de görüldüğü gibi, açık ve geçiş kavite akışlarında kapalı olanlara göre daha belirgindir. Rossiter’in yarı ampirik modeli kullanılarak hesaplanan Rossiter modları, Şekil 1.13’te verilen akustik spektrumda, zirvelerle temsil edilmektedir [19].



Şekil 1. 12: Açık, geçişli ve kapalı kavite akışlarında akustik tonlar [25].



Şekil 1. 13: Rossiter modları [28].

1.2.2 Rossiter formülasyonu

Rossiter, önceki kısımlarda da ifade edildiği üzere ses altı hızlardan ses üstü hızlara kadar birçok deneysel çalışma ortaya koymuştur. Kavite akışı üzerine yaptığı bu çalışmalarda kavitenin basınç hareketlerinin frekanslarını hesaplamak için yarı ampirik bir formül ortaya koymuştur. Rossiter hipotezinde, akustik radyasyonun girdaplardan kaynaklandığını iddia etmektedir. Rossiter'in ifade ettiği ampirik formül aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [19] [29] [30] [31].

$$f_m = \frac{U_\infty}{L} \frac{(m - \alpha)}{\left[\left(\frac{1}{K_v}\right) + M_\infty\right]}$$

Burada U_∞ kavite üzerine gelen serbest akımın hızıdır. M_∞ , serbest akış hızının ses hızına oranı olan, serbest akış Mach sayısı olarak ifade edilir, m ifadesi mod sayısını belirtirken f_m ise belirli m modundaki frekansı söylemektedir. $\alpha = 0,25$ bir sabittir ve kesme tabakası çarpması ile arka kavite duvarının ucundaki akustik dalga emisyonu arasındaki faz gecikmesini yansıtmaktadır. $K_v = 0,57$ da bir başka sabittir ve ortalama girdap yayılım hızının serbest akış hızına oranını gösterir. α , ampirik bir sabittir ve kayma tabakasındaki kararsızlıklar ile yukarı yönde hareket eden basınç dalgaları arasındaki faz gecikmesine bağlıdır.

K_v , kayma tabakası ile serbest akış hızları arasındaki ilişkiyi temsil eden, önde olan dalganın yayılım hızının serbest akış hızına oranı olarak ifade edilmektedir. $K_v = 0.57$ değeri ince olan başlangıç sınır tabakaları için geçerlidir. Sınır tabakası kalınlığı arttıkça K_v değeri düşmektedir [33]. Rossiter'in yaklaşımı, 0.4 ile 1.4 arasında değişen Mach değerlerini kapsayan deneysel verilere ve değişen boşluk en-boy oranlarına dayanır. Rossiter'in mod tahminlerinin doğruluğu 0.4 ile 1.4 Mach sayısı aralığının dışına düşmektedir ve bu nedenle Heller ve diğerleri 1971 yılında modları daha geniş bir aralıkta tatmin etmek için ilk yöntemi genişletmişlerdir [34]. Rossiter formülünün güncellenmiş hali aşağıda gösterilmiştir.

$$f_m = \frac{U_\infty}{L} \frac{(m - \alpha)}{\frac{M_\infty}{\left(1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M_\infty^2\right)^{0.5}} + \frac{1}{K_v}}$$

Burada γ özgül ısı oranıdır. Rossiter'in bu formülü, frekans değerleri serbest akım hızıyla doğru bir orantı gösterirken, kavitenin boy uzunluğu ile ters bir orantı içerisindedir. Bu etki ilişkisi denklem 3'te verilen Strouhal sayısı (St) olarak ifade edilmektedir.

$$St = \frac{f_m L}{U_\infty} \frac{(m - \alpha)}{\frac{M_\infty}{\left(1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M_\infty^2\right)^{0.5}} + \frac{1}{K_v}}$$

Rossiter çok sayıda araştırmadan sonra, serbest akış hızı ile periyodik basınç dalgalanmaları arasındaki orantılı ilişkiyi ve ayrıca kavite bölmesinin uzunluğu ile periyodik basınç dalgalanmaları arasındaki ters orantılı ilişkiyi Strouhal sayısı terimi ile açıklamıştır [1].

Temel anlamda Strouhal sayısı, serbest akış ivmesinden kaynaklanan atalet kuvvetlerinin konvektif ivmeden kaynaklanan atalet kuvvetlerine oranı olarak tanımlanır. Şöyle ki serbest hızın lokal değişimi nedeniyle oluşan kuvvet etkisinin, taşınımından dolayı meydana gelen kuvvete oranı şeklinde de ifade edilebilir. Strouhal sayısı, periyodik bir hareketle tanımlanan akışlarda akış alanının konvektif ivmesinden kaynaklanan hızdaki değişikliklere kıyasla atalet kuvvetleri nedeniyle akışın dalgalanmalarıyla bağlantılıdır ve bu nedenle Strouhal sayısı gerçekten de periyodik akışlar için uygundur.

1.3 Literatür Araştırması

Kavite akış fiziğinin aeroakustik çerçevede incelenmesi ve oluşan, istenmeyen olumsuzluklara yol açan, ses seviyesinin istenilen limitlere çekilmesi deneysel ve sayısal olarak üzerinde durulan çalışma alanlarından biridir [35]. Düzenli olan serbest akışa, kavite geometrisinin sebep olduğu bozucu etkilerinin azaltılması amaçlı çözümler sunabilmek adına, kavite akışlarına pasif ya da aktif akış kontrol yaklaşımları uygulanmaktadır [14]. Genellikle bu kontrol yaklaşımlarının hedefleri, akış karakterini

zamana bağılı halden çıkarmaktır. Ancak bu amaç farklılıklar gösterebilmektedir. Güçlü titreşimlerin diğer bant aralığındaki tonlara göre spektrumda baskın rol oynadığı durumlarda, akışa uygulanacak kontrolün asıl amacı bu titreşim değerlerinin düşürülmesidir. Böyle baskın karakter gösterilen akışlarda güçlü titreşim değerlerini düşürmek isabetli bir hedefi ortaya koyarken, geniş bant çerçevesinde güçlü etkiler söz konusu olduğu durumlarda ise ortalama ses seviyesinin azaltılması esas hedef olarak karşımıza çıkabilmektedir [12].

Akış fiziği içinde aerodinamik basınç dalgalanmaları akışı sürükleyen ana akımı oluşturmaktadır. Aerodinamik basınç salınımlarına göre akustik basınç alanı çok küçük seviyelerde olduğu için 20. yüzyılın sonuna kadar sayısal olarak üzerinde fazlaca durulmamıştır. Bunun başlıca sebepleri, görece küçük ölçekli basınç salınımlarını yakalayabilmek için hesaplamalı yöntemlerde hem ayrıklaştırma şemalarında yüksek mertebelere çıkılması gerekliliği hem de ayrıklaştırma ağ yapısının sıklaştırılması gerekliliğini doğurmasıdır [36]. Bu durum Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD/CFD) yaklaşımı üzerine Hesaplamalı Aeroakustik (HAA/CAA) yaklaşımının gelişmesinin önünü açmıştır [37]. Aeroakustik konusunda akla ilk gelen isimlerden biri olan James Lighthill tarafından 1950'li yıllarda aerodinamik temelli ses üretiminin anlaşılması ve teorisinin oluşturulması açısından büyük önem arz eden Akustik Analoji olarak bilinen yaklaşım ortaya atılmıştır. James Lighthill, sıkıştırılabilir momentum ve süreklilik bağıntılarını yeniden organize ederek akış alanının içinde türbülans nedeniyle meydana gelen ses basıncını veren non-lineer kaynak terimine sahip bir dalga denklemi ortaya koymuştur [38]. Akustik dalgalar kaynak ve yayılma alanlarında oluşmaktadır. Akustik Analojinin temelinde bu kaynak ve yayılma alanını ayırmak vardır. Bu ayırma sayesinde, zamana bağılı değişen gürültüyü oluşturan akışın büyüklükleri ile sesin yayıldığı alandaki akış nitelikleri birbirinden bağımsız hale getirilebilmektedir [39]. Lighthill ortaya koyduğu denklemde katı yüzeyden bağımsız ses oluşumunu kabul etmiştir. Daha sonra Curle akış alanında katı yüzey olduğunda ses oluşumunu incelemiştir [40]. Ffowcs William ve Hawkings ise bir adım daha ileri götürerek çalışmaları katı bir yüzeyin hareketi neticesinde ses oluşumuna etkisini incelemişlerdir [41].

Uçaklarda faydalı yük taşıma bölümleri, bu faydalı yükü emniyetli olarak üzerinde barındırma ve istenmeyen kazaları önleyerek hedefine ulaştırma yolları uzun zamandır dikkat çeken bir çalışma alanıdır [1] [17]. Bilim insanları hem numerik hem de

deneysel olarak kavite bölgesi akışları üzerinde birçok çalışmada bulunmuşlardır. Kavite akışları ile ilgili deneysel yaklaşımlar, rüzgâr tünelleri yardımıyla sağlanan deneysel sonuçlar ve uçuş testlerini temel almaktadır. Kavite akışlarının numerik olarak çalışılması deneysel incelemelerin ardından hesaplamalı akışkanlar dinamiği alanındaki gelişmelerle 20. yüzyılın ortalarından sonra hareketlenmeye başlamıştır denilebilmektedir. Günümüzde rüzgâr tünellerinden elde edilen deney temelli çıkarımlar, HAD çözücülerinden alınan sonuçlarla karşılaştırma ve doğrulamaların yapılması için kullanılmaktadır. Bu tarz uygulamaların esas amacı, HAD çözümlerinin doğrulaması yapıldıktan sonra artık deneysel çalışmalara gerek kalmaması ve bu sayede de deneysel incelemelerin yüksek maliyetinden kurtulmanın önünü açmasıdır. Gerek sayısal gerekse deneysel çalışmaların büyük bir bölümünde ortalama basınç dağılımları ve ses basınç seviyeleri irdelenmesi üzerinde durulmuştur. İncelemeler çoğunlukla hava araçlarının çalışma hızlarını kapsayan ses üstü ve oldukça kritik olan transonik bölgedeki hızlarda gerçekleştirilmiştir.

Hesaplamalı olarak kavite akışının meydana getirdiği ses etkisinin incelenmesi, türbülans temelli havanın akış fizikinden kaynaklanmaktadır. Bu sebepten kavite geometrisinin ve çözüm için seçilen türbülans modelinin önemli olduğu sonucu çıkarılabilmektedir. Bu çalışmada seçilen kavite akışı farklı türbülans modellemesiyle geniş çapta araştırılmıştır. URANS [42] [43] [7], LES [44] [45] [46] ve hibrit RANS-LES [47] [48] [49] modelleri kullanılarak yapılan çalışmalar örnek olarak verilebilir. Dahası çalışmanın merkez aldığı kavite geometrisi Avrupa projesi olarak DESider'de ana test durumu olarak seçilmiştir [49]. Bu nedenle, mevcut çalışma için doğrulama ve kontrol yöntemi önerme test durumu olarak seçilmiştir.

1.3.1 Sayısal çalışmalar

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte HAD (CFD) çözümleri genişledi. Sayısal çözümler genellikle rüzgâr tüneli testlerini doğrulamak için kullanılır. HAD çözümlerinin deneysel çözümlerden daha fazla tercih edilmesinin ana nedeni maliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Maliyete ek olarak, rahat değişiklik yapılabilmesi gibi başka avantajlar da vardır.

Ren ve diğerleri (2018), uzunluk/genişlik oranı 5.82 ve Mach sayısı 1.75 olan süpersonik bölgedeki kavite geometrisinde LES türbülans modelinden faydalanarak sayısal bir çalışma yürütmüşlerdir. Araştırmada pasif kontrol yöntemlerinden olan

arka duvara eğim verilmiştir ve sonucunda alt duvarda okunan statik basınçlarda düşüşler saptanmıştır. Bununla birlikte kayma tabakası ile değiştirilmiş arka duvar etkileşimlerin azaldığı gözlemlenmiş ve kavitenin içi basınç dalgalarında düşüşler tespit edilmiştir [50].

Luo ve diğerleri tarafından 2018 yılında açık tip kavite akışında basınç dalgalanmalarının bastırılma mekanizmalarını araştırmak için ön kenar testere dişli rüzgarlık ve eğimli arka duvarın sayısal araştırmaları, basınç dalgalanma spektrumları ve bunların uzamsal dağılımlarına odaklanarak yapıldı. Dikdörtgen kavitenin uzunluk-derinlik oranı altıdır ve serbest akış Mach sayısı 1.5'tir. Kararsız kavite akışlarını ve basınç dalgalanmalarını tahmin etmek için bu çalışmada da kullanılan geliştirilmiş gecikmeli ayrılmış girdap benzeşimi (IDDES) kullanıldı. Farklı mekanizmalarla olsa da her iki kontrol yöntemi de basınç dalgalanmalarının bastırılmasında etkinlik sergiledi. Ön duvar testere dişli hız kesici kanadın kesme katmanını kaldırdığı ve arka duvarla etkileşimini azalttığı gözlemlendi. Rossiter modlarının enerji dağılımı önemli ölçüde değişmiştir ve bu durum kavite içindeki basınç dalgalanması geri besleme döngüsünün değiştiğini gösterir. Bununla birlikte, eğimli arka duvarı yalnızca kavite akış alanını değiştirir. Ön duvara uygulanan pasif kontrol yöntemi aksine, Rossiter modu dağılımı ve geri bildirim mekanizması değişmeden kalır. Eğimli arka duvar, esas olarak, kavite arka kenarı tarafından üretilen yukarı doğru hareket eden bozuntuyu bastırır, ancak aşağı yönde hareket eden bozuntu üzerinde çok az etkiye sahiptir [51].

Fadıl ve Zafer (2023), Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) kullanılarak, uzunluk-derinlik oranı 5, Mach sayısı 0.85 ve Reynolds sayısı yaklaşık 6.5×10^6 olan açık dikdörtgen, kararsız bir transonik kavite akışını simüle etmişlerdir. Aynı şekilde, gerçek bir silah bölmesini modellemek için kapalı kavite kullanılmıştır. DES türbülans modeli, akış alanındaki türbülanslı özellikleri çözmek için kullanılır. Sonlu hacim yöntemine dayalı açık kaynaklı bir CFD kodu olan Open-FOAM ile deneysel verilerle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir [52].

Aradağ ve diğerleri (2017), Mach sayısı 1.5'te kavite geometrisi üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmanın amacı, basınç salınımlarını azaltmak veya ortadan kaldırmak için ses üstü kavite akışı üzerinde aktif ve pasif kontrol yöntemlerini sayısal olarak irdelemektir. Kavite konfigürasyonunun ön ve arka duvarlarında çeşitli noktalarda jet üfleme aktif kontrol yöntemi olarak kullanılmaktadır. Pasif kontrol için, boşluğun içindeki ve dışındaki akış dinamiklerini ayırmak için bir kapak plakası

kullanmak, arka kenarın eğimi gibi arka kenar duvarı modifikasyonları ve arka kenar duvarına eğrilik sağlamak gibi çeşitli teknikler kullanılır. Aktif ve pasif kontrol tekniklerinin sonuçları, basınç dalgalanmaları, ön kenardaki ses basınç seviyeleri, arka kenar duvarları ve boşluk zemini ve akış yapılarının oluşumu açısından mevcut durumla karşılaştırıldı ve sonuçlarına göre arka kenar duvarının modifikasyonunun, kavite tonlarında 40 dB'ye varan azalmalara yol açan test edilen kontrol yöntemlerinin en etkili olduğu görülmektedir [53].

Lawson ve Barakos (2009), pasif kontrol yöntemlerini kullanarak sayısal bir simülasyon gerçekleştirmiş ve DES kullanarak geometrinin akış alanı ve akustik tonlar üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Sonuçları, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içerisinde olduğunu ortaya koymuşlardır. Enine çubuk, düz tepeli rüzgarlık ve testere dişli rüzgarlık olan çeşitli kontrol yöntemleri denendi ve arka duvarda OASPL'de benzer bir azalma elde edildi. Eğimli bir arka duvar, kavitenin ön yarısında daha fazla düşüş sağlarken, bölmenin yarısını yarıya indirdi. Bu kontrol yöntemleri, Rossiter modlarının hiçbirini ortadan kaldıramadı, ayrıca modlar, enerjileri bastırılırken biraz daha yüksek frekans seviyelerine taşındı [54].

Merrick ve Reeder (2015), uzunluk/derinlik oranı 4.5 olarak seçilen farklı ses üstü hızlarla ve durma basınçlarında kavite geometrisi üzerinde deneysel ve sayısal olarak çalışmışlardır. Çalışma kapsamı küresel buz-model mühimmat için düşme deney testi ve buna paralel olarak OVERFLOW HAD yazılımıyla çift başlı bir çalışma yürütülmüştür. Durma basıncı 1 psia deney ve numerik sonuçlar uyumludur ancak durma basıncı 3.5 psia değerinde iken rüzgâr tüneline alınan buz model küre düşmesi testinin sonuçlarına göre, kaviteden ayrılma esnasından önce modelin kavite önüne hareketlendiği sonrasında ise kavite arkasına doğru hareketliği gözlemlenmiştir. Sayısal çözümde ön tarafa doru hareketlenmenin görülmediği saptanmıştır. Bu değişik çalışma mekanizmasına rağmen modelin kavite geometrisi etrafında genel hareketinin uyumluluk gösterdiğini belirtmişlerdir. Ek olarak bu benzeşmeme durumunun kavitenin sahip olduğu akışın kararsız olması nedeniyle ayrılma zamanının farkından kaynaklanabileceğini ortaya koymuşlardır [55].

Güleren ve diğerleri (2018), açık kaynaklı akış çözücüler, havacılık ve makine mühendisliği uygulamalarındaki zorlu akış problemlerinin analizi için giderek daha popüler hale gelmesiyle birlikte HAD çözücülerin kıyaslanması içeren bir çalışma yürütmüşleridir. GNU, yani Genel Kamu Lisansı, altında sunulan ve kullanıcının

gereksinimlerine göre çalıştırılabilir, incelenebilir, paylaşılabilir ve değiştirilebilir olan açık kaynak kodlu HAD çözücülerinden SU^2 ve OpenFOAM, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği topluluğundaki en popüler iki açık kaynaklı çözücüdür. Çalışmalarında, yüksek hızlı kavite akışları üzerindeki bazı pasif kontrol yöntemleri, bu açık kaynaklı akış çözücüler ve ANSYS/Fluent adlı bir ticari akış çözücü kullanılarak sayısal olarak simüle edilmiştir. Sonuçlar mevcut deneysel verilerle karşılaştırılır. Çözücü SU^2 , ortalama akış hattı hızını tahmin ettiği, ancak türbülanslı kinetik enerjiyi ve genel ortalama ses basıncı seviyesini (OASPL) tahmin etmediği görülmektedir. Ancak OpenFOAM, tüm bu parametreleri neredeyse aynı ANSYS/Fluent seviyeleri kadar tahmin eder [56].

Nayyar ve diğerleri (2005), her iki kapağı açık ve kapalı için $L/D=5$ ve $W/D=1$ ile sayısal analiz gerçekleştirmişlerdir. Serbest akış olarak sırasıyla $M_\infty = 0.85$ ve $Re_L = 6.7 \times 10^6$ kullanılmıştır. URANS, LES, DES türbülans modelleri kullanılarak simülasyonlar yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Akış alanını kontrol etmek ve akustik ses oluşumlarını bastırmak için aktif ve pasif kontrol yöntemleri kullanmışlardır. Bunlar sabit jet üfleme aktif kontrol yöntemi ve rüzgarlık ile eğimli kavite duvarları pasif kontrol yöntemleridir. Daha sonra sayısal çözümler yapılmış hem kapı açık hem de kapalı konfigürasyonlar için URANS'tan farklı olarak DES ve LES sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Sonuç, URANS'ın kapalı durumda sunulan artan momentum, taşıma ve yayılmayı açıklamakta zorlandığıdır. Rüzgârlık kavitenin yukarı akışına yerleştirildiğinde yaklaşık 30 dB azalma sağlandı ve rüzgarlık bölmenin arka duvarına yerleştirildiğinde OASPL yükseltildi. Eğimli bir ön duvar kullanmak, büyük bir ayrıma neden oldu ve bu nedenle yüksek OASPL'ye sebep oldu. Sabit jet üfleme, tüm kontrol yöntemlerinin en etkilisi olarak öne çıktı. Ön duvar jeti, 35 dB'ye kadar OASPL düşüşü sağladı [57].

Babu ve diğerleri 2016 yılındaki çalışmaları, kavite içindeki karmaşık ve türbülanslı akışın bir füze ile akışkan-yapı etkileşimini daha iyi ayırt edebilmek için bir simülasyonu kapsamaktadır. Kavitenin L/D oranı, Mach sayısı ve füze çapına göre Re sayısı sırasıyla 7, 0,85 ve 326000'dir. Bomba kavite içerisine yerleştirildiğinde 7 dB gürültü azaltımı elde edildiği gözlemlendi. Füze taşıma pozisyonuna yaklaştıkça kavitenin daha tutarlı ve sessiz olduğu bulundu ve bu durum, daha zayıf bir kavite rezonansı ve daha düşük geniş bant içeriği ile sonuçlanan bir kesme tabakası bozulmasıyla açıklandı. Ayrıca PSD değerlerinin içerisinde füze bulunmayan kavite

geometrisi ile aynı özelliklere sahip olduğu görüldü. Kavitenin içinde füze bulunan PSD değerlerinin yanı sıra, bomba kavite dışındayken akış ve gürültü alanı temiz kaviteye benzemektedir [58].

Babu ve diğerleri (2016b) tarafından URANS, DES ve SAS kullanılarak kapılı ve kapısız uzunluk/derinlik oranı 5 ve 7 olan kaviteler için transonik silah bölmelerine yönelik simülasyonlar yapılmıştır. Sonuçlar, kapısız silah bölmesi için kavite zemini boyunca kararsız basınç salınımlarının birinci, ikinci ve üçüncü modlar gibi çeşitli tepe noktalarından etkilendiğini, 90° konumlandırılmış kapılara sahip bölmede ise sadece birinci tepe noktasının baskın olduğunu ortaya çıkardı. Uzunluk/derinlik oranı 5 olan kapısı olmayan kavitenin akustik modları bölmenin ön ve arkasını oluştururken, L/D oranı 7'ye çıkarıldığında baskın piklerin 2. ve 3. modlardan diğer iki moda geçtiği görülmüştür. Kapı ekleme durumunda L/D oranı 5'ten 7'ye değiştirildiğinde, bahsedilen akustik modların yer değiştirmesi ortadan kalkmış ve her iki durumda da sadece ikinci modun baskın olduğu görülmüştür. Bununla birlikte uzunluk/derinlik oranı 7 olan kavitenin 5'e göre 10 dB daha sessizdi [59].

Kavite içindeki yüksek basınç dalgalanmalarını engellemek için jet üfleme uygulaması ile kavite akışı, Lamp ve Chokani (1997) tarafından 1.75 mach sayısı ve 4.33 L/D oranında hesaplamalı olarak incelenmiştir. Kavitenin ön kenarının biraz altına yerleştirilen küçük jet sayesinde, kayma tabakası çeşitli frekans ve genliklerle zorlandı. Bu uygulama sonucunda basınç salınımları başarıyla bastırılmıştır. Jetin basınç dalgalanmalarını bastırmadaki başarısının, jetin frekansına ve genliğine önemli ölçüde bağlı olduğu gözlemlendi [60].

Barakos ve diğerleri (2009) tarafından, DES türbülans modeli yaklaşımı ve yaklaşık beş milyon hücre kullanılarak $M_{\infty} = 0.85$ ve $Re_L = 10^6$ olarak, kapısız temiz kavite akışları için akış simülasyonları yapılmıştır. Spektral analiz sonucunda DES yaklaşımının her durum için Rossiter modlarının frekanslarını yakalayabildiği görülmüştür. Bu çalışmada eğimli duvar konfigürasyonu da kullanılmış ve eğimli arka duvar üzerinde ayrılan kesme tabakasının etkisinin büyük akustik ses üretmediği gösterilmiştir. Eğimli duvar ayrıca uzak alandaki ses basıncı seviyesinin düşmesine neden oldu. Simülasyonlar, kavite kapılarının eklenmesinin kayma tabakasını stabilize ettiğini ortaya çıkardı [54].

Peng ve Leicher (2008), DES ve hibrit RANS-LES modelini kullanarak $M_{\infty} = 0.85$ olduğu kavite üzerinde hesaplamalar yaptı. Çalışma, kavitedeki akış davranışını basınç dalgaları açısından incelemeyi ve deneysel verilerle karşılaştırmayı amaçladı. Her iki modelleme tekniğinin de deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olan benzer sonuçlar ürettiği gösterilmiştir. DES yaklaşımı, kavite zemininde hafifçe düşen bir gürültü seviyesi üretti [47].

Loupy ve Barakos (2017) tarafından M219 kavitesi için gürültü kaynaklarının azaltılmasına odaklanan bir araştırma yapılmıştır. Kapılı ve kapısız olmak üzere iki farklı durum için hesaplamalar yapılmıştır. Gürültü kaynaklarının sınırlandırılmasının yanı sıra mikrofona dizisi yerleşiminin, yoğunluğunun ve şeklinin akustik basıncın yakalanması üzerindeki etkisi araştırıldı. Sonuç olarak, mikrofonların bölmeden yeterince uzağa konumlandırılması durumunda elde edilen sonuçların makul olacağı ve kullanılan yöntemin deney ortamına kolayca uyarlanabileceği belirtilmiştir [61].

Bacci ve diğerleri (2019), transonik hızlarda DES modelini kullanarak, bir SIHA'daki silah bölmesinin aeroakustik özellikleri üzerindeki hücum açısının etkisini araştırdı. Hücum açıları 0, 3, 4.5 ve 6 derecedir. Hücum açısı 0 dereceden 3 dereceye çıkarıldığında akustik etkilerin arttığı bulundu [62].

1.3.2 Deneysel çalışmalar

Kavite akışı ile ilgili deneysel çalışmalar genellikle rüzgâr tüneli yardımıyla ve uçuş testleri çıktılarına dayanmaktadır. Deneysel incelemelerde bilgi toplamak için farklı tiplerde basınç sensörlerinden, Schlieren fotoğraf çekim düzeneğinden, akış içi partikül takip mekanizmalarından faydalanılmaktadır. Bu testler oldukça maliyetli olduğundan günümüzde kavite akışı ile ilgili çalışmalar ağırlıklı olarak sayısal yöntemlerle yapılmaktadır. Bu sebeple görece az sayılarda bulunan deneysel araştırmalar önem arz etmektedir.

Maurya ve diğerleri (2015), uzunluk/genişlik oranı 3 ve serbest akış Mach sayısı 1.65 olan kavite akışında farklı arka duvar açısı ve yükseklik etkisinin üzerinde deneysel çalışmalarda bulunmuşlardır. Akış fiziği hakkında fikir edinmek için kararsız basınç ölçümü ve schlieren akış görselleştirmesi kullanılır. Arka duvarın derinliği, ilk boyunun çeyreği kadar bırakılıp ve arka duvarın kalanına 90-60-30 derecelerde rampalar eklenmiştir. Deneysel araştırmalar, test bölümüne göre kavite boyutunun, kavite üzerindeki akış alanının doğası ve ayrıca kavite içindeki akustik salınımlar

üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini doğruladı. Arka duvar derinliğinin azaltılmasıyla baskın modun ikinci moddan üçüncü moda kaydığı belirtilmiştir. Arka duvara açının eklenmesi ile kavite içerisindeki akış, daha kararlı hale geldiği belirtilmiştir [63].

Thagmani (2019), uzunluk/derinlik oranı 2 birim olan Mach sayısının 1.58 olarak seçildiği süpersonik hız altındaki kavite geometrisinin basınç salınımlarının modlarını irdelemek için deneysel bir çalışma tasarlamıştır. Araştırmada ortaya çıkan sonuçlara göre, kavitenin ön ve arka duvarlarında meydana gelen şokların ilk modları özelinde birbiriyle zıt fazda olduğu tespit edilmiş olup, kavite akışında genellenecek olunursa hâkim olan mod, ikinci mod olarak ifade edilmiştir. Buna ek olarak, belirlenen fazdaki fark, kavitenin akustik rezonansı devinimleri üzerinde kuvvetli etkilere sahiptir ifadesiyle açıklanmıştır [64].

Malhotra ve Vaidyanathan (2016), açık kavitelerde deneysel olarak yürüttükleri, uzunluk/derinlik oranının 2 ile 3 olduğu 1.71 Mach sayısında kavite arka duvarının kesilmesi sonucunun kaviteye etkilerini saptamayı amaçlamışlardır. Schlieren fotoğraf çekim düzeneğinden faydalanılarak akış görselleştirilmiş olup kayma tabakası ve oluşan şoklar akış bölgesinde gözlemlenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda L/D oranı 2 ve 3 için de arkadaki duvarın boyunun kısaltılması genliklerde de kısaltmaya sebep olmuştur. Uzunluk/derinlik oranı 2 olan kavite geometrisinde toplam ses basıncı 3 dB düşüş gösterirken, 3 uzunluk/derinlik oranına sahip kavitede 10 dB azalma gözlemlenmiştir [65].

Gautam ve diğerleri (2017), yaptıkları deneysel çalışmada pasif ve aktif kontrol yöntemlerini kullanarak ses basınç seviyesini düşürmek için bu kontrol yöntemlerinin en uygunlarını eşleştirmeyi amaçlamışlardır. Sunulan incelemede kavite arka duvarının boyunu değiştirmek olarak pasif bir kontrol yöntemi kullanmışlardır, aktif kontrol yöntemi olarak da içeri kütle transfer etme yöntemini seçmişlerdir. Kütle katılım yeri kavite arka duvarından %25 önde olup, bu yöntem akışı düzenlemede ve SPL değerini azaltmada en iyi kontrol durumu olduğu sonucunu belirtmişlerdir [66].

Chin ve arkadaşları (2019), uzunluk/genişlik değeri 4.5 olarak belirlenen kavite geometrisinden Mach sayısının 2.22 Mach olduğu süpersonik hızda ve çeşitli hücum açıları değerinde mühimmat bırakma testi yapmışlardır. Mühimmatın yörüngesini yüksek hızlara sahip kameralar yardımıyla görüntüleyerek yüksek serbestlik dereceli

(4) hareket çıktıları almışlardır. Çeşitli hücum açıları ile serbest bırakılan mühimmatın kavitenin içinde benzer davranışlar gösterdiğini ama kesme tabakası oluşumu sonrası farklılıklar meydana geldiğini belirtmişlerdir. Ek olarak kararsız aerodinamik etkiler mühimmatın yörüngesini önemli derece değiştirebildiğinin saptandığı belirtilmiştir [67].

Barone ve Arunajatesan (2016), kavite geometrisi içine konumlandıkları silindir şeklinde mühimmata etkileyen kuvvet, moment ve ses basıncını incelemek amacıyla rüzgâr tüneli testleriyle deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışma çeşitli Mach sayılarında için ses altı ve transonik hızlarda gerçekleştirilmiş olup numerik çalışmalarıyla kıyaslanmıştır. Sayısal çalışma RANS/LES hibrit türbülans modeliyle yapılmıştır ve simülasyon sonucuna göre ses altı ve transonik hızlarda kavite duvarından belli bir mesafede meydana gelen basınç dalgalanmasının % 5 farkla doğru bir şekilde belirlendiğini ifade etmişlerdir. Bu sayısal yaklaşımla çözümde, kavitenin içine mühimmatın konumlandırılması sonucunda basınç spektrum değişimini tutarlı olarak saptadığını belirlemişlerdir. Silindir olarak konumlandırılan mühimmata etkileyen kuvvetin ve momentin çıktıları ile kavite geometrisinde meydana gelen rezonans modlarının karmaşık bir etkileşim içinde bulunduğunu belirtmişlerdir. Bu durumun mühimmat ve kavite kesme tabası ile etkileşiminden ötürü olduğunu düşünmüşlerdir ve bu konuda daha fazla çalışma yapılması gerektiğini dile getirmişlerdir [68].

Merrick ve Reeder (2015), uzunluk/derinlik oranı 4.5 olarak seçilen farklı ses üstü hızlarla ve durma basınçlarında kavite geometrisi üzerinde deneysel ve sayısal olarak çalışmışlardır. Çalışma kapsamı küresel buz-model mühimmat için düşme deney testi ve buna paralel olarak OVERFLOW HAD yazılımıyla çift başlı bir çalışma yürütülmüştür. Durma basıncı 1 psia deney ve numerik sonuçlar uyumludur ancak durma basıncı 3.5 psia değerinde iken rüzgâr tüneline alının buz model küre düşmesi testinin sonuçlarına göre, kaviteden ayrılma esnasından önce modelin kavite önüne hareketlendiği sonrasında ise kavite arkasına doğru hareketliği gözlemlenmiştir. Sayısal çözümde ön tarafa doru hareketlenmenin görülmediği saptanmıştır. Bu değişik çalışma mekanizmasına rağmen modelin kavite geometrisi etrafında genel hareketinin uyumluluk gösterdiğini belirtmişlerdir. Ek olarak bu benzeşme durumunun kavitenin sahip olduğu akışın kararsız olması nedeniyle ayrılma zamanının farkından kaynaklanabileceğini ortaya koymuşlardır [55].

Xiansheng ve diğerleri (2020), yüksek hızlı yukarı akış enjeksiyonu kullanılarak süpersonik boşluk akışının neden olduğu basınç salınımlarını bastırmak için bir kontrol yöntemi geliştirmişlerdir. Enjeksiyon, boşluğun ön kenarından üflenerek hava akışını yönlendiren bir kanal aracılığıyla büyük bir üfleme katsayısı ile üretilir. Uzunluğun derinliğe oranı 6 olan kavite üzerinde, Mach 1.8 ve 2.0 hızlardaki akışlar, yöntemi doğrulamak için rüzgâr tüneli deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kavite salınımını karakterize etmek için altı dinamik basınç transdüseri kullanılır. Kontrollü kavite akışında, basınç dalgalanmasının kayda değer bir şekilde bastırılması gerçekleştirilmiştir. Genel ses basıncı seviyesi, her iki konfigürasyonda da 10 dB'den daha fazla azaltılabilir olduğunu ortaya koymuşlardır. Basınç dalgalanmasındaki en dikkate değer azalma, akış kaynaklı salınımın en güçlü olduğu kavite arka kenarı yakınında meydana gelir. Kontrol altındaki kavite arka kenarı yakınında neredeyse hiç kavite tonu gözlenmez. Ayrıca, kontrol yönteminin etkili olduğu ve zaman içinde kararlı olduğu kanıtlanmıştır. Geri besleme döngüsü, kavite kış duvarı üzerindeki kesme girdaplarının zayıf bir etkisi ile kontrollü kavite akışında kesintiye uğrar. Kontrol yöntemi, kontrol sisteminde ek gaz beslemesine ihtiyaç duymadığından, mühendislik uygulamalarında kullanım için pratik ve potansiyel bir aday olabileceği sonucuna varılmıştır [69].

Tracy 1993 yılında, ses altı ve transonik hızlarda kavitelerin neden olduğu akustik alanları araştırmak ve ayrıca Re_L sayısı ve sapma açısının etkisini değerlendirmek için transonik rüzgâr tüneline bir deney yaptı. Kavitenin L/D oranı değeri olarak 4.4, 6.70, 12.67, 20 ve serbest akışlı M_∞ sayısı 0.20 ila 0.90 aralığında ve Re_L sayısı 2×10^6 'dan 2×10^8 'e kadar olan aralıkta ve 0° ve 15° lik iki sapma açısı kullanıldı. Deneyler yapıldıktan sonra sonuçlar, Re_L sayısının akustik alan üzerinde çok az etkiye sahip olduğunu ve M_∞ sayısı düşürülürken tonların genliği ve frekansının değiştiğini gösterdi [25].

Atvars ve diğerlerinin 2009 yılında yürüttükleri deneysel çalışmada, transonik hızlarda kavite L/D oranının 5 olması üzerinde durulmuştur. Ölçümler kavite merkez düzleminde yapılmıştır. Ölçümlerin yanı sıra, yüzey akış görselleştirmesini de kullanmışlardır. Aynı özelliklere sahip akış, deneysel çalışmalar sonrasında Kararsız Reynolds-Averaged Navier Stokes (URANS) yöntemleri kullanılarak da simüle edilmiş ve sonuçlar, URANS HAD yönteminin akış alanının tüm davranışını yakalayamadığını göstermiştir. Bunun nedeninin neredeyse kavite derinliğinin

yarısına kadar çıkan sınır tabakası olduğu düşünülmüştür ve kullanılan HAD yöntemi sınır tabakası kalınlığını tahmin edememektedir [33].

Zhuang ve arkadaşları tarafından 2006'da ses üstü hızlarda L/D oranı 5.16 ve W/D oranı 0.87 olan bir deney yürütülmüştür. Çalışmada, kavite geometrisi içindeki akış alanını etkileyen geri besleme döngüsünü gözlemleyebildiler ve ayrıca Rossiter modlarını doğru bir şekilde tahmin ettiler. Kavitenin içindeki basınç salınımlarının bir sonucu olarak, tutarlı dinamik basınçlar ölçülür. Ek olarak, Ses Basınç Seviyesinin (SPL) değerini ön uçta düşürmek için aktif kontrol yöntemleri de kullandılar. Mikro jetlerin aktivasyonları, genel ses basıncı seviyesinde 9 dB'den fazla azalttığını belirtmişlerdir [70].

Long 2006 yılında pasif kontrol yöntemlerini kullanarak transonik hızlarda 6.1'den 20.8'e kadar bir L/D oranı ve 1.8'den 6.25'e kadar bir W/D oranı deneyler gerçekleştirdi. Kavite bölmesinin çapraz akış modunun, yüksek frekanslı düşük dalga sayısı moduyla bağlantılı olduğu gözlemlendi ve kavite önündeki pasif kontrol mekanizmaları dalgalanmaların genliğini önemli ölçüde azaltabilse de geri besleme döngüsünün ve geniş frekansın ana davranışı hala devam ediyor sonucunu ortaya koymuştur [71].

Saddington ve diğerleri tarafından 2016 yılında farklı pasif kontrol tekniklerinin karşılaştırmalı bir çalışması, uzunluk-derinlik oranı 5 ve uzunluk-genişlik oranı 2 olan 320 mm uzunluğundaki bir kavite üzerinde gerçekleştirilmiştir. Testler, 0.71'lik bir serbest akış Mach sayısında gerçekleştirildi. Çalışmalara hem kavite önüne hem de kavite arkasına pasif kontrol mekanizmaları dahil edildi. Yüzey basıncı ölçümlerinden elde edilen sonuçlar, kavite önüne yerleştirilen kontrol tekniklerinin kavite tonu genliklerini bastırmada arka kenar modifikasyonlarından daha etkili olduğunu gösterdi. Kare dişli bir rüzgarlık, yani hava deflektörü, bir diğer ifadeyle hız kesici kanat, tonal genlikte 8.8 dB en büyük düşüşü gösterdi; bununla birlikte, bir testere dişli rüzgarlık, genel ses basıncı seviyesinde 8.13 dB ile en büyük düşüşü gösterdi. Kavite içindeki hız ölçümleri, temiz kavite ve testere dişli rüzgârlıkla kavite için parçacık görüntülü hız ölçer kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar, hız kesici kanat kullanıldığında serbest akış ile kavite arasındaki momentum değişiminde bir azalma olduğunu gösterdi. Bu, azaltılmış ton genliklerinin ana nedeni olarak önerilmektedir [72].

Shaw ve diğerkleri tarafından pasif kontrol yöntemleri kullanılarak F-111 silah bölmesi üzerinde bir deney yapılmıştır. 6.79 ve 10.27 olmak üzere iki farklı L/D oranı kullanılmıştır. Ayrıca içinde 3 füze bulunan silah bölmesini de incelediler. Akustik sesleri bastırmak için pasif bir kontrol yöntemi olarak, testere dişli baskılayıcılar ve eğimli bir arka duvar kullanıldı. Eğimli arka duvar ile karşılaştırıldığında, testere dişli baskılayıcıların daha az etkili olduğu görülmüştür. Füzeler, gövde ile kayma tabakası arasındaki etkileşim nedeniyle kavitedeki akustik sesleri genellikle azalttı. Gözlemlenen değerler, kırılğan füzeler ve bileşenler için ciddi yorgunluk sorunlarına yol açacak kadar yüksekti [73]. Chaplin ve Birch 2012 yılında hayata geçirdikleri deneysel çalışmalarında, bir Silahlı İnsansız Hava Aracının (SİHA'nın) silah bölmesi içindeki aeroakustik ortamı araştırmışlardır. Boş bir silah bölmesi için arka duvarda 175 dB'ye kadar OASPL ölçülmüştür. Shaw ve arkadaşlarına 1988'deki çalışmalarına benzer şekilde uçak gövdesine veya diğerk hassas bileşenlere zarar verebilecek şiddetli basınç salınımları gözlemladiler. 60° eğimli arka duvar kullanımının kavite boyunca 5-6 dB OASPL baskısına yol açabileceğini gözlemladiler [74].

Baysal ve Stallings'in çalışmasında, sıfır hücum açısında bir kavite için deney gerçekleştirdi. Serbest akışın Mach sayısı ve Reynold sayısı sırasıyla $M_{\infty} = 1.5$ ve $Re_D = 8.3 \times 10^4$ ile bir deney yapılmıştır. Üç tip kavite akış özelliği gözlemlendi. Deneyler, L/D oranının sürüklenme kuvvetleri açısından çok önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. L/D oranları 6, 12 ve 16 olan boşluklar için sürüklenme katsayıları sırasıyla 0.13, 0.27 ve 0.88 olarak belirtildi [43].

2021 yılında yürütölen Huang ve diğerklerinin çalışması, 10° , 30° , 45° sapma açılarında M_{∞} sayısı 0.83 ve L/D oranı 6.14 ve 21.5 olan kavite akışlarının deneysel olarak araştırılmasını kapsamaktadır. Görselleştirme yöntemi olarak basınca duyarlı boya (PSP) kullanıldı. PSP ölçümlerinden elde edilen C_p değerlerinin, Kutile transdüserleri ile aynı tesis kullanılarak daha önce yayınlanan C_p verileriyle iyi bir uyum içinde olduğu, ek olarak açık ve kavite akışı arasındaki farkların PSP ölçümlerinden kolayca fark edilebildiği kaydedilmiştir [75].

1.4 Tezin Amacı

Bu çalışmada transonik kavite akışının modellenerek kavite akış fizliğini anlamlandırmak ve akustik basınç verileriyle aeroakustik incelemektir. Akabinde akış

alanına uygulanan pasif kontrol tekniklerinin kavite geometrisi üzerindeki zamanla değişen akış alanı parametrelerinin akustik oluşuma etkisi incelenmiştir. Üç boyutlu kavite geometrisi üzerindeki transonik ve sabit hızdaki akışın, akışın gerçekleştiği bölgede meydana gelen zamanla bağlaşıklık değişkenlere olan etkisi ve buna bağlı olarak aerodinamik etkiler nedeniyle oluşan gürültü seviyesi akustik analogi yaklaşımı yardımıyla hesaplanacaktır. Transonik bölgede Reynolds(Re) = $13.5 \times 10^6/m$ ve Mach sayıları(M_∞) = 0.85 için ses basınç seviyesinin (Sound Pressure Level) nasıl etkilendiğinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Ticari sonlu hacim çözücüsü Fluent kullanılarak türbülanslı sıkıştırılabilir kavite akışının zamana bağlı IDDES türbülans modeliyle akış alanı incelemesi yapılmıştır. Deneysel çalışmada kavite içine yerleştirilenler ile aynı konumda olacak şekilde konumlandırılan mikrofonlar sayesinde Ses Basınç Seviyesi (SPL) belirlenmiştir. Pasif kontrol tekniklerinden olan geometri değişimi kaviteye uygulanmadan hesaplanan sayısal bulgular ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır ve doğrulanmıştır. Bununla birlikte geometriye uygulanan kontrol teknikleri sayesinde gürültü seviyesindeki değişimler kıyaslanmıştır. Ffowcs William-Hawkins (FW-H) yaklaşımıyla HAD ve Akustik Analogi (AA) birlikte çalışarak bütün akışkan bölgesinin çözümüne gerek duyulmadan kavite akışındaki akustik basıncın ses oluşum etkisi gözlemlenmiştir. Açık kaviteler, Rossiter modları olarak adlandırılan muazzam akustik yoğunluktaki tonlarla ilişkilidir ve bu modların farklı büyüklük değerlerine sahip olması, akış olayları arasında bazı etkileşimlere neden olabilir. Bu tezde, sayısal ve ampirik sonuçları karşılaştırmak için SPL grafiklerinde Rossiter modları kullanılmıştır. Sonuçlar sayısal çözüm yöntemi doğrulaması bölümünde sunuldu [1]. Daha önce açıklanan geri bildirim mekanizması, gürültüye neden olan akustik dalgalar oluşturur. Gürültü oluşumu SPL ile OASPL açısından incelenmiştir. Ayrıca deneysel verilerle kontrol aşamasında Rossiter modlarından da faydalanılmıştır. SPL, yerel basıncın denge atmosfer basıncından sapması olarak tanımlanabilir [9]. Başka bir deyişle, bir kaynağın neden olduğu gürültünün bir göstergesidir. Desibel (dB) cinsinden ölçülür. Desibel iki değer arasındaki karşılaştırmadan meydana gelir. Deneysel olarak, SPL ölçeği kullanılarak ölçülebilir. Bu tez çalışması gibi sayısal çalışmalarda kararsız basıncın sapması kullanılarak hesaplanır. OASPL, çözümlenmiş frekansların tamamında bütünleşmiş SPL'dir ve gürültü oluşumunu not etmek için kullanılır. Bu çalışmada gürültü OASPL cinsinden de irdelenmiştir [18] [76].

1.5 Tezin Planı

Genel olarak, bu çalışma M_{∞} sayısı 0.85 olan ortamda L/D oranı 5 olan açık kavite üzerinde aeroakustik incelemeyi içerir. Araştırma sayısal olarak yürütülmüş olup deneysel karşılığı ile kıyaslanmıştır. Temiz kavite üzerinde doğrulama çalışmaları akabinde, kavite geometrisine uygulanan çeşitli pasif kontrol tekniklerinin akustik etkileri irdelenmektedir.

Bölüm 1’de sırasıyla çalışmanın kapsamı ve önemi hakkında genel bilgiler verilmiş olup, kavite akış fiziğinin açıklanmış, Rossiter modları ve mekanizmasından bahsedilerek, son olarak konuyla alakalı deneysel ve sayısal yöntemlerle yapılan literatürdeki çalışmalara değinilmiştir.

Bölüm 2’de kullanılan sayısal yaklaşım ile çözüm yönteminden bahsedilmiştir ve çözümde kullanılan başlangıç koşulları, sınır koşulları, ağ özellikleri, akış özellikleri gibi HAD özellikleri tariflenmiştir.

Bölüm 3’te bir önceki bölümde anlatılan sayısal çözüm yönteminin doğrulaması amacıyla HAD analizleriyle deneysel verilerin karşılaştırılması yapılmış ve tartışılmıştır.

Bölüm 4’te ise kavite geometrisine uygulanan pasif kontrol yaklaşımlarıyla elde edilen aeroakustik bulgular ortaya konulmuştur.

5. ve son bölümde ise ortaya konulan bulgular ışığında çıkarımlara yer verilerek gelecekte yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.



2. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Bu tezin kapsamındaki kavite akışındaki zamana bağlı denklemlerin numerik ayrıklaştırılması ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsü olan Fluent yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Mekân ayrıklaştırmaları için sonlu hacim yaklaşımı kullanılmış olup, zaman ayrıklaştırmaları için kapalı zaman şeması kullanılmıştır [77]. Sıkıştırılamaz akışın çözümleri, basınç ve hızın daha önceki bölümde ifade edilen bağımlılığının ayrıklaştırması için sonlu hacim çözücüsünde bulunan coupled algoritmasından faydalanılmıştır. Mekân ayrıklaştırmada, momentum denklem çözümleri için ikinci mertebe ileri gidişli şema ile çalışılmıştır. Zaman alanının ayrıklaştırmada ise, çalışmalarda sınırlandırılmış ikinci mertebeden ileri gidişli şema ile çalışılmıştır. Yapılan bu çalışmada türbülans modeli olarak SST k- ω tabanlı IDDES (Geliştirilmiş Gecikmeli Ayrılmış Girdap Benzeşimi) türbülans modeli kullanılmıştır.

İlk bakıldığında basit geometrisi göze çarpan kavite geometrisi, akışkanla girdiği etkileşimler sonucu oluşan, rastgelelik ve karmaşa barındıran, akış özelliklerinden dolayı çözüm sunması zorlayıcı bir hale gelmektedir. Kavite geometrisi akışı içinde barındırdığı irili ufaklı birçok vorteks yapıları, kayma tabakası ve burada oluşan dengesizler kavitelerdeki akış fiziğini anlamlandırmayı güçleştirmektedir. Bu kısım Navier Stokes denklemlerini, türbülans modellemelerini, sıkıştırılabilir akış özelliklerini ve kavite akış simülasyonlarında kullanılan sayısal çözüm yöntemini içermektedir.

2.1 Navier-Stokes Denklemleri

Navier-Stokes (N-S) denklemleri, kütle korunumu ve momentum korunumunu kapsayan akışkanlar dinamiğinin yönetici denklemleridir. N-S denklemleri kaynak terimlerinin yokluğunda, kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemi Denklem 2.1'de Kartezyen koordinatlarda verilmiştir. Navier-Stokes denklemleri, en genel haliyle, Newton akışkanları için sıkıştırılabilir, zamana bağlı ve viskoz akışkan dinamiklerini kapsar. Transonik hızlardaki kavite akışı, zamana bağlı, sıkıştırılabilir ve viskoz akış fiziğinden oluşur. Bu nedenle, Navier-Stokes denklemlerini yöneten Navier-Stokes denklemleri, mevcut problem için çözüm alanında herhangi bir kaynak terim olmaksızın en genel formlarında ele alınır.

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j H) = \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i \tau_{ij}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(k \frac{\partial T}{\partial x_j})$$

u_i kartezyen koordinatlardaki hız vektörünü, x_i koordinat vektörünü ve t zamanı belirtirken, P ifadesi basıncı ve ρ yoğunluğu ifade etmektedir. Momentum denkleminin korunumundaki τ_{ij} , şu şekilde tanımlanan viskoz gerilim tensörüdür:

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} + \lambda \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} = 2\mu S_{ij} - \left(\frac{2\mu}{3}\right) \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

Burada, Stoke'un viskozite hipotezine göre $\lambda + \frac{2}{3}\mu = 0$, μ dinamik viskozite katsayısı, λ ikinci viskozite katsayısı, δ_{ij} kronecker delta ve S_{ij} , şu şekilde verilen gerilim oranı tensörüdür:

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

Enerjinin korunumu denkleminde, T sıcaklık, E toplam enerji, H toplam entalpi ve k termal iletkenliktir. Toplam enerji ve toplam entalpi şu şekilde verilir:

$$E = e + \frac{1}{2} u_i u_i \quad \text{ve} \quad H = h + \frac{1}{2} u_i u_i$$

Burada e iç enerjiyi betimlerken ve h entalpiyi ifade etmektedir.

Vizkozite ifadesi işin içine girdiği taktirde ortam koşullarından etkilenmemesi hava gibi ideal gazlarda göz ardı edilemez bir değişim beklenmektedir. Bu yüzden farklı vizkozite teorileri geliştirilmiş olup bunlardan kabul görenler uygulamalarda karşımıza sıklıkla çıkmaktadır. Kullanılan akışkan hava olduğu için viskozite değerinin hesaplanmasında Sutherland'ın viskozite formülasyonu kullanılmıştır. Bu

yasaya göre vizkoziteyi sıcaklıktan ayrı ele almak imkansızdır ve vizkozite sıcaklığın bir fonksiyonu olarak betimlenmiştir.

Sutherland'ın dinamik viskozite yasası, havanın dinamik viskozitesinin hava molekülleri arasındaki moleküller arası kuvvetlere bağlı olarak hava sıcaklığına bağlı olduğunu belirten Sutherland'ın (1893) kinetik teorisine dayanmaktadır. Sutherland yasası şu şekilde verilir:

$$\mu = \mu_{ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{3/2} \frac{T_{ref} + S}{T + S}$$

Buradaki değerler aşağıdaki şekildedir.

$T_{ref} = 273.11 \text{ K}$; *referans statik sıcaklık değeri*

$\mu_{ref} = 1.716 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$; T_{ref} sıcaklığındaki dinamik viskozite değeri

$S = 110.56 \text{ K}$; *Etkili bir sıcaklık anlamına gelen Sutherland sabiti*

Tıpkı vizkozite gibi havanın ses hızı da sıcaklığına ve yoğunluğuna bağımlı olarak değişir. Frekansa bağlı olarak ise değişmez. Ses, her frekansta aynı hızda hareket eder. Atmosferik basınçtaki hava ideal bir gaz gibi davranır. İdeal bir gaz için durum bağıntısı aşağıdaki gibidir.

$$p = \rho \cdot R \cdot T$$

T mutlak sıcaklığı gösterirken, p basınç ve ρ yoğunluğu ifade etmektedir. R, Boltzmann sabiti ve Avogadro sayısı ile ilişkili olan spesifik gaz sabitidir. Boltzmann sabitinin $k_B = 1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ve Avogadro sayısının $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ olduğunu göz önünde bulundurursak;

$$R = k_B N_A / M$$

Formülde görülen M gazın molar kütlesi (Kg/Mol) olarak açıklanabilir. Hava için $R = 286.73 \text{ J/kg.K}$ 'dır. Hava gibi ideal gazlarda spesifik gaz sabitinin aşağıdaki gibi bir ilişki ile de ifade edebiliriz.

$$R = c_p - c_v$$

Burada c_p sabit basınçtaki spesifik ısıyı belirtirken, c_v ise sabit hacimde spesifik ısı ifadesidir.

Özgöl ısının oranı da sabit basınçtaki spesifik ısının, sabit hacimdeki spesifik ısıya oranı olduğu bilgisi ($\gamma = c_p/c_v$) ile aşağıdaki ses hızı denklemi yazılabilmektedir [78];

$$c = (\gamma R T)^{1/2}$$

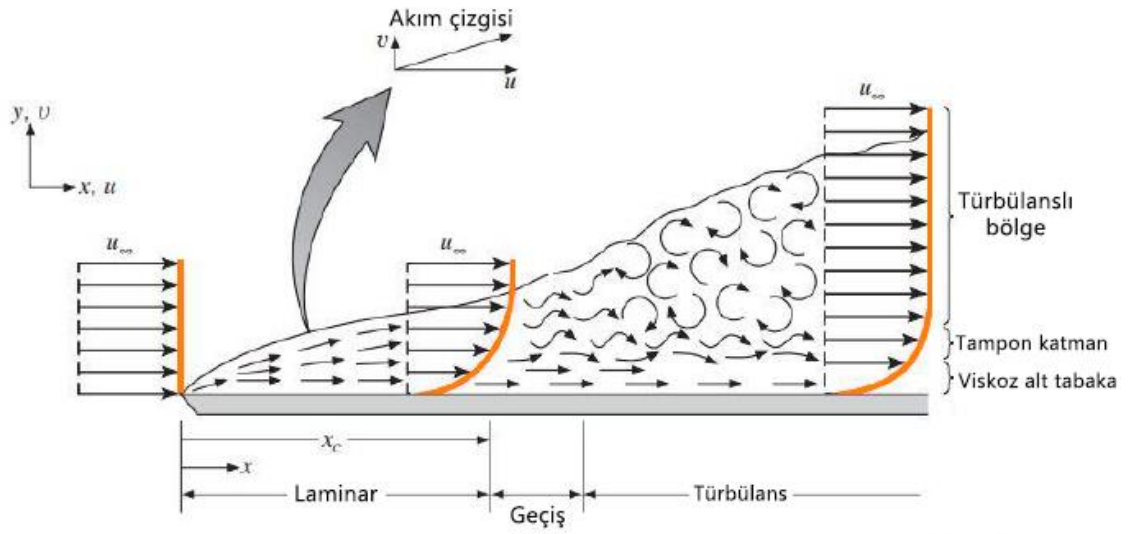
2.2 Türbülans Modellemesi

Mühendislik uygulamalarında, akışkan akışlarının çoğu türbülanslı akış özelliklerine sahiptir. Bir akışın laminar veya türbülanslı olması, akışkan hareketinde bulunan atalet ve viskoz kuvvetlerin göreceli önemi ile belirlenir. Çoğu doğal veya mühendislik akışı türbülanslı olduğundan türbülansın modellenmesi bir zorunluluktur. Türbülans, çevresindeki diğer tüm akış olaylarına hâkim olan kaotik ve üç boyutlu bir girdap hareketi olarak tanımlanmaktadır. Ancak sadece zamana değil uzaya da bağlı olduğu için türbülans tam olarak kaos değildir [79]. Türbülans modellemesinin temel amacı, zamana dayalı ortalama basınç, hız ve sıcaklık alanlarını tahmin eden yaklaşımlar yaratmaktır. Evrensel bir türbülans modeli yoktur ancak farklı sınırlamalar içeren bazı türbülans modelleri vardır. Bir CFD kodunda türbülanslı akışları simüle etmek için bu türbülans modellerinden birini seçmek, başlangıç ve sınır koşullarını belirlemek ve zaman parametrelerini tanımlamak gerekir. Bir akışın türbülanslı olup olmadığı, Re sayısı ile karakterize edilir. Reynolds sayısı (Re), aşağıda belirtildiği şekilde atalet ve viskoz kuvvetlerin birbirine karşı üstünlüğü ifade eden parametredir. En basit manada akışkan hızlandığı takdirde, belirli bir limit üstünde, akış düzenli rejimden türbülanslı hale geçer [80]. Dış akışlarda Reynolds sayısı 500000'i geçerse akış türbülanslı hale gelir. Şekil 2.1'de düz bir plaka üzerindeki akışın laminardan türbülanslı akışa geçişi gösterilmektedir. Akışın laminardan türbülanslı akışa geçiş limitini belirlemek için Reynolds, aşağıdaki ifadeyi ortaya koymuştur.

$$Re = \frac{\text{Atalet kuvvetleri}}{\text{Viskoz kuvvetler}} = \frac{\rho V L}{\mu}$$

Yukardaki denklemde ρ hava yoğunluğu, V akışın ya da akışkanın hızı, L karakteristik uzunluk ve μ havanın dinamik viskozitesidir. Viskoz kuvvetler baskınsa (yani düşük Re), akış laminardır. Eylemsizlik kuvvetleri viskoz kuvvetlerden çok daha büyükse

(yani yüksek Re), akış türbülanslıdır. Yüksek Reynolds sayısı akışları genellikle yüksek hızlı akışların bir sonucudur. Havacılık uygulamalarında, hemen hemen tüm hava akışları türbülanslıdır ve bu çalışmamızın temelinde bulunan kavite akışlarında da söz konusudur. Türbülanslı akışlar, akışkan parçacıklarının düzensiz, kaotik, dağınık, dönüşlü ve dağıtıcı doğası ile karakterize edilirler. Türbülans tamamen stokastik yani rastlantısal bir fenomen değildir [81] [82].

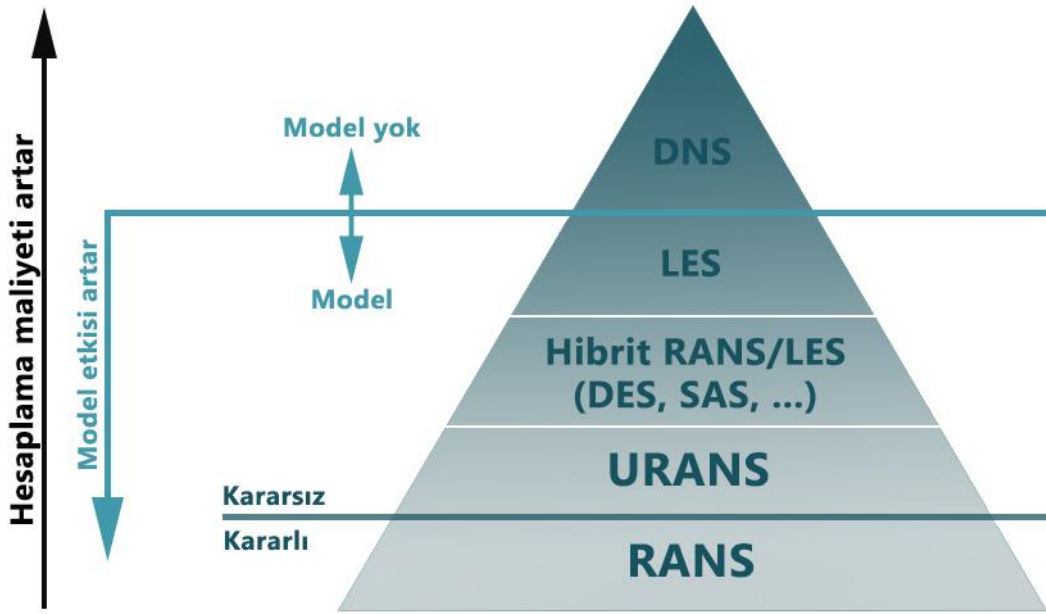


Şekil 2.1: Düz plaka üzerinde laminar, geçiş bölgesi ve türbülanslı bölge sınır tabaka akışı [83].

Türbülanslı akışlar, aynı zamanda, oluşumu akış enerjisinin büyük bir kısmını alan çeşitli boyutlardaki girdaplardan oluşan oldukça dönel akışlardır. Bu enerji, daha büyük girdaplardan türbülanslı akışta bulunan daha küçük girdaplara aktarılır. Söz konusu enerji transfer işlemine enerji dökümü veya enerji kaskadı denilebilir. Bu enerji aktarımının bir sonucu olarak, akıştaki girdap enerjisi sonunda dağılma yoluyla ısıya dönüşür.

Türbülans, akışkanlar dinamiğinin henüz çözülmemiş sorunlarından biridir. Akışkan akışlarındaki türbülanslı çözmenin kesin veya genel olarak kabul edilmiş bir yolu yoktur. Ancak türbülanslı akış çözümleri için geliştirilmiş modeller ve teknikler vardır ki bunların bir kısmı tamamen URANS modelleri gibi istatistiksel modellemeye dayalıyken, DNS türbülans modelleri gibi bir kısmı da akıştaki türbülanslı ölçeklerin tamamını veya DES-LES türbülans modelleri örnekleri gibi bir kısmını kapsayan

türbülans ölçekleriyle çözmeyi amaçlamaktadır. Şekil 2.2, türbülans modellerini hem modellenmiş akış fiziğinde hem de her modelin hesaplama maliyetinde karşılaştırır.



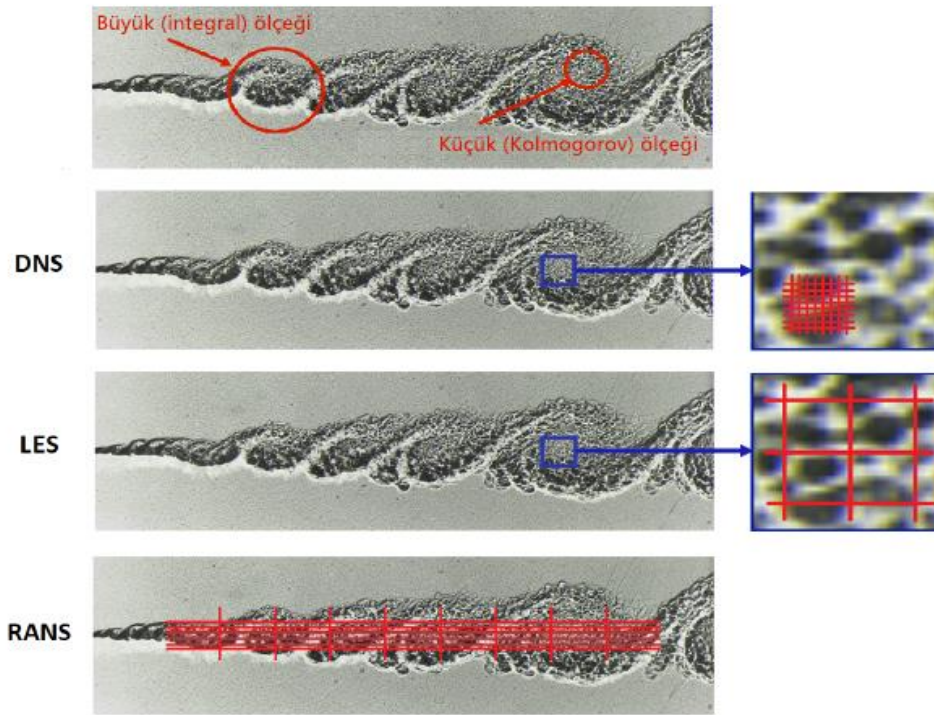
Şekil 2.2: Türbülans model sınıflandırması [84].

RANS türbülans modelleri tamamen akış fiziğini modellemeye dayalıyken, DNS modeli ise tüm akış fiziğini çözmeye yönelik çalışır. RANS modelleri temel olarak tüm akış fiziğini modelleyen istatistiksel modellere dayanmaktadır. Modellemenin doğası gereği, RANS türbülans modelleri çözüm konusunda nispeten düşük hesaplama maliyetleri sağlasa da tüm akış fiziğinin modellenmesinden kaynaklanan belirsizlik, modelin ciddi bir dezavantajıdır.

DNS, N-S denklemlerinin ötesinde modellemeyi ortadan kaldırarak akışta bulunan tüm ölçekleri viskoz dağılım ölçeğine kadar çözmeyi amaçlar. DNS, tüm ölçekleri tam olarak çözmek için hem zaman (Δt) hem de uzay (Δx) açısından hesaplama ızgarasında katı kısıtlamalara sahiptir. Bu, özellikle havacılık uygulamalarında yüksek hızlardan dolayı yüksek olan Reynolds sayılı akışlar için önemli ölçüde artan hesaplama maliyetiyle sonuçlanır. DNS yönteminin grid gereksiniminin mevcut kaynaklarla karşılanması zordur. Bu nedenle, DNS şu anda yüksek Re akışları için uygun değildir.

Türbülanslı akışlar, uzunluk ve zaman ölçeklerinin çeşitli aralıklarından oluşur. Türbülanslı bir akıştaki en büyük ölçekler, enerji ve momentum taşınmasının

çoğundan sorumlu olan en büyük girdapların boyutları olan L ile gösterilen, integral uzunluk ölçekleri olarak adlandırılır. İntegral uzunluk ölçekleri, akışın fiziksel alanına bağlıdır. Türbülanslı bir akıştaki en küçük hidrodinamik ölçekler, boyutları viskozite ile belirlenen η ile gösterilen Kolmogorov ölçekleri olarak adlandırılır. Enerji kademesi, türbülanslı akışta bulunan daha büyük ölçeklerden daha küçük ölçeklere doğru gerçekleşir. Uzunluk skalasının boyutu küçüldükçe ve Kolmogorov skalasına yaklaştıkça viskozitenin etkisi artar ve sönüm önem kazanır ki bu da kinetik enerjinin enerji sönümlemesi ile ısıya dönüşmesine neden olur. Türbülans modellerinin, türbülanslı uzunluk ölçeklerinin çözünürlüğüne yönelik farklı yaklaşımları vardır. Örneğin, DNS, Kolmogorov ölçeklerini çözmeyi hedeflerken, RANS, modelleme yapısı nedeniyle girdapların çözülmesiyle ilgilenmez. Şekil 2.3'te DNS, LES ve RANS türbülans modellerinin ızgara çözünürlüğü gereksinimleri gösterilmiştir.



Şekil 2. 3: DNS, LES ve RANS türbülans yöntemlerinin ızgara ölçeği [81]

Boyutsuz duvar mesafesi, aşağıdaki denklem ile belirlenen y^+ değeri ile temsil edilir.

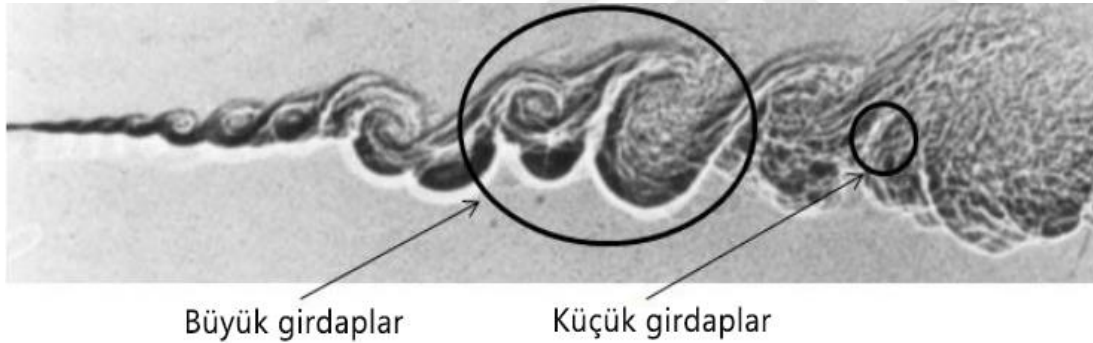
$$y^+ = \frac{\rho u_{\tau} y}{\mu} = \frac{u_{\tau} y}{\nu}$$

y^+ değeri, türbülans modellemesi ile başa çıkmak için çok önemlidir. Burada y^+ , y yönündeki duvara dik olan mesafeyi temsil eder, u_τ ise kayma hızıdır ve ifadesi şu şekildedir;

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

2.2.1 Large eddy simulation (LES)

Büyük Girdap Simülasyonu (LES), hem hesaplama maliyeti hem de doğruluk sırası açısından DNS ve RANS türbülans çözüm yöntemleri arasında kalan bir yöntemdir. LES'in arkasındaki fikir, daha küçük alt ızgara ölçekli yapılar modellenirken, akışta bulunan enerji taşıyan büyük girdapları çözmektir. Küçük girdapların türbülanslı akış alanından bağımsız olarak her zaman istatistiksel olarak benzer ve öngörülebilir bir şekilde davrandığını varsayarsak, LES modelinde küçük ölçekli enerji tüketen girdaplar modellenirken türbülanslı girdapların büyük durağan olmayan özellikleri çözülmektedir [85]. Şekil 2.4'te büyük ve küçük ölçekli girdaplar gösterilmektedir.



Şekil 2.4: Büyük ve küçük girdaplar [86].

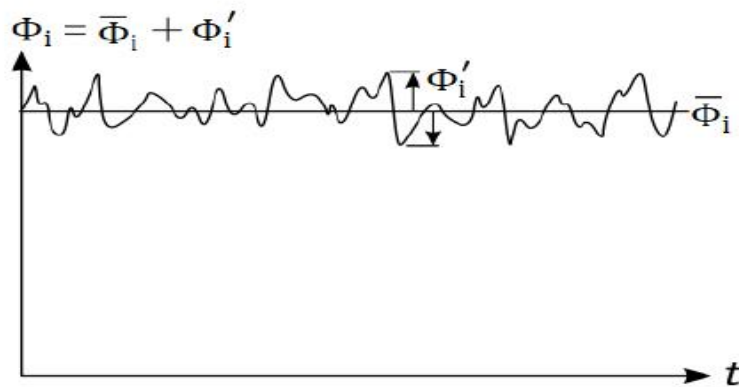
Büyük ve küçük girdaplar sürekli etkileşim halinde olduğundan ve enerji akışı büyük girdaplardan küçük girdaplara doğru gerçekleştiğinden, LES'te modellenen küçük ölçeklerin etkisi dikkate alınmalıdır. LES yönteminin DNS'den temel farkı, küçük ölçekli türbülanslı yapıların modellenmesidir. Tüm akışı modelleyen RANS modellerinin aksine, LES yalnızca küçük ölçekleri modeller ve bu da LES'in doğruluk derecesini artırır. Türbülanslı bir akıştaki en küçük ölçeklerin izotropik ve evrensel olduğu varsayıldığından, bu küçük ölçeklerin modellenmesinin toplam akış fiziği üzerinde önemli olumsuz etkileri yoktur [87] [81].

DNS'nin şu anda karşılanamayan hesaplama maliyetleri, araştırmayı LES gibi akış fiziğinin geliştirilmiş simülasyonu ile alternatif yöntemlere yönlendirmiştir. LES yönteminin hesaplama gereksinimleri DNS'ye göre daha uygun olmasına rağmen, yüksek Reynolds sayılı akışlar için LES hala pahalıdır.

2.2.2 SST k- ω türbülans modeli

Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) modelleri, karmaşık mühendislik problemlerinin çoğu için belirli bir doğruluk düzeyi ile ekonomik ve uygun bir yaklaşım sağlar. RANS modelleri belirli bir doğruluk düzeyi ile gelse de modellerin hiçbiri sınırsız değildir. Bazı modeller, belirli bir sorun için daha iyi bir doğrulukla hizmet verebilir. Bu nedenle, ilgilenilen problem için en uygun URANS modelinin araştırılması gerekmektedir. Yapılan bu çalışmada türbülans modeli olarak SST k- ω tabanlı IDDES (Geliştirilmiş Gecikmeli Ayrılmış Girdap Benzeşimi) türbülans modeli kullanıldığı için SST k- ω türbülans modeli gelişimi hakkında bir bilgilendirme yapmamız gerekmektedir.

Türbülanslı parametrelerin istatistiksel modellemesine dayanan RANS modelleri, akış parametrelerini zaman ortalamalı ve anlık bileşenlere ayırır. Bu, esas olarak türbülans alanının türbülanslı büyüklükler üzerinden zaman ortalamasıyla istatistiksel olarak sabit olduğu varsayımına dayanan Reynolds ayrışımı yoluyla elde edilir. Reynolds ayrıştırmada Şekil 2.5'te gösterildiği gibi türbülanslı akış miktarları ortalama ve dalgalanan bileşenler olmak üzere iki kısma ayrılır.



Şekil 2.5: Türbülans niceliklerinin Reynolds ayrışımı.

Şekil 2.5'teki grafikte de belirtilen bir türbülans niceliği aşağıdaki şekilde ifade edilir.

Bu akış özelliği hız, basınç, entalpi olabilmektedir.

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

Φ burada bir akış miktarını ifade etmektedir. $\bar{\Phi}$ niceliğin zaman ortalaması değerini belirtirken, Φ' ise anlık dalgalanmaları belirtmektedir. Diğer bir ifadeyle $\bar{\Phi}$, büyük ölçekli veya çözümlenmiş kısmı belirtirken, Φ' , akışın çözümlenmemiş veya alt ızgara ölçeği (SGS) bileşeni anlamına gelen küçük ölçeği ifade eder. Akış laminar olduğunda zaman çizgisinin tamamında nicelik değeri ortalama nicelik eşit durumdadır. Türbülanslı durumlarda ortalama özellik, tüm değerlerin zaman integrali alınmasıyla hesaplanabilir.

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi(t) dt$$

Gerekli düzenlemeler ve yerine koymalar yapılarak, Reynolds ayrışımına sahip türbülanslı büyüklükler N-S denklemlerine ikame edildiğinde, URANS denklemleri şu şekilde elde edilir:

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

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{E})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{H})}{\partial x_j} = \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{\sigma}_{ij})}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{q}_j}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{Q}_j}{\partial x_j}$$

$\bar{\sigma}_{ij}$ viskoz stres tensörü ve R_{ij} de Reynolds stres tensörüdür.

$$\bar{\sigma}_{ij} = \overline{2\mu \left(S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right)} \approx 2\tilde{\mu} \left(\tilde{S}_{ij} - \frac{1}{3} \tilde{S}_{kk} \delta_{ij} \right)$$

δ_{ij} kronecker delta ve S_{ij} gerinim tensörüdür. R_{ij} Reynolds gerilme tensörü URANS denkleminde aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$R_{ij} = \overline{\rho u_i u_j} - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j = \bar{\rho} (\tilde{u}_i \tilde{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j)$$

Kütlenin korunumunda alt ızgara ölçeği terimlerini kullanmaktan kaçınmak için, Favre filtrelemeyi kullanmak oldukça uygundur [88] [89]

Favre (yoğunluk ağırlıklı) ortalaması şu şekilde verilir:

$$\tilde{\Phi} = \frac{\overline{\rho\Phi}}{\bar{\rho}} \text{ ve } \Phi = \bar{\Phi} + \Phi' = \tilde{\Phi} + \Phi''$$

Burada $\bar{\Phi}$ ve $\tilde{\Phi}$ büyük ölçekli bileşenlerdir ve Φ' ve Φ'' çözülmemiş küçük ölçekli bileşenlerdir.

URANS denklemlerinde toplam enerji ve toplam entalpi formülasyonları şu şekilde verilir:

$$\tilde{E} = c_v \tilde{T} + \frac{\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_i}{2} + \frac{R_{ii}}{2\bar{\rho}}$$

$$\tilde{H} = c_p \tilde{T} + \frac{\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_i}{2} + \frac{R_{ii}}{2\bar{\rho}}$$

URANS'ın enerji denkleminde ısı akıları şu şekilde verilir:

$$\bar{q}_j = -\overline{k_T \frac{\partial T}{\partial x_j}} \approx -\tilde{k}_T \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j}$$

$$\bar{Q}_j = \bar{\rho} c_p (\tilde{u}_j \tilde{T}_t - \tilde{u}_j \tilde{T}_t)$$

T_t toplam sıcaklık ifadesidir.

Termodinamik, fizik ve kimya gibi temel bilimlerde, durum denklemi, basınç, sıcaklık, hacim veya iç enerji gibi belli bir fizikî durumlar topluluğu içinde maddenin hâlini ifade eden durum değişkenleri ile alakalı termodinamikle alakalı denkleme verilen isimdir [90].

Durum denklemi şu şekilde verilir:

$$\bar{p} = (\gamma - 1) \left[\bar{p} \tilde{E} - \frac{1}{2} \bar{\rho} (\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2 + \tilde{w}^2) - \bar{\rho} k \right]$$

Burada havanın ısı kapasitesi olan γ , 1.4 olarak sabit alınır ve k, aşağıdaki şekilde elde edilen türbülans kinetik enerjisidir:

$$k = \left[(\tilde{u}_1'')^2 + (\tilde{v}_1'')^2 + (\tilde{w}_1'')^2 \right] / 2$$

Yapılan bu çalışmada türbülans yaklaşımı olarak SST k- ω tabanlı IDDES (Geliştirilmiş Gecikmeli Ayrılmış Girdap Benzeşimi) türbülans yöntemi kullanıldığı için ve bu türbülans yaklaşımının Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) olarak

modellenen kısmı SST $k-\omega$ olması sebebiyle, bu türbülans modeli gelişimi hakkında bilgilendirme yapmamız gerekmektedir.

$k-\omega$ türbülans modeli iki denklemlidir. İlk kez Kolmogorov tarafından ortaya atılmıştır ve zaman içinde farklı araştırmacıların katkılarıyla günümüze ulaşmıştır. Kolmogorov tanıttığı yeni türbülans modelinde türbülans kinetik enerjisi olarak adlandırılan k için modellenmiş bir denklem vardır. Bununla birlikte “birim hacimde ve zamanda enerjinin dağılma oranı” olarak adlandırdığı bir diğer ifadeyle spesifik yitim (birim türbülans kinetik enerjisindeki yitim) olarak bilinen ikinci bir ω parametresi getirmiştir. $k-\omega$ modeli olarak bilinen bu modelde ω , k denklemine benzer bir diferansiyel denklemi karşılamaktadır. Bu nedenle model, iki denklemlidir bir türbülans modeli olarak adlandırılmıştır [91]. Bu modelin geliştirilmesiyle 1994’te Menter tarafından $k-\omega$ SST (Kayma Gerilimi Taşınması) türbülans modeli daha etkili bir yöntem ortaya çıkarmak amacıyla $k-\epsilon$ ve $k-\omega$ modellerinin olumlu yönlerini birleştirir [92]. Bu birleştirmeyi Wilcox’un $k-\omega$ modelini duvar yakınında $k-\epsilon$ modelini de duvardan uzakta etkinleştirmek için bir harmanlama fonksiyonu yardımıyla yapar [93] [94]. SST $k-\omega$ türbülans modeli aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

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

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{v_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\partial \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

Burada k türbülans kinetik enerjisi ifadesi iken, ω spesifik dağılma oranı, yitim oranıdır. SST $k-\omega$ türbülans modelinde bulunan sabitler ve içindeki ifadelerin hesaplanması aşağıda ifade edilmiştir.

Türbülans girdap viskozitesi, μ_t , şu şekilde hesaplanır;

$$\mu_t = \frac{\rho \alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, \Omega F_2)}$$

Her sabit, bir iç (1) ve bir dış (2) sabitten oluşur;

$$\Phi = F_1 \Phi_1 + (1 - F_1) \Phi_2$$

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4)$$

$$arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} d^2} \right]$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right)$$

$$F_2 = \tanh(arg_2^2)$$

$$arg_2 = \max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right)$$

Sınır tabaka iç kısmında kalan SST modeli ve sınır tabaka dış kısmında kalan k-ε modeli için model sabitleri çizelge 2.1’de verildiği gibidir.

Çizelge 2. 1 : k-ω türbülans modelinde bulunan sabitler.

$\sigma_{k1} = 0.85$	$\sigma_{k2} = 1.0$	$\beta^* = 0.009$
$\sigma_{\omega 1} = 0.5$	$\sigma_{\omega 2} = 0.856$	k=0.41
$\beta_1 = 0.075$	$\beta_2 = 0.0828$	$\alpha_1 = 0.31$

2.2.3 IDDES türbülans modeli

Sunulan bu çalışmada türbülans yaklaşımı olarak SST k-ω tabanlı IDDES (Geliştirilmiş Gecikmeli Ayrılmış Girdap Benzeşimi) türbülans yöntemi kullanılmaktadır. RANS modeli hakkında bir önceki başlıkta bilgilendirme yapılmıştır. IDDES türbülans yöntemine değinmeden önce gelişim aşamasını irdeleyecek olursak, ilk etapta karşımıza DES (Ayrık Girdap Benzeşimi yöntemi) olarak çıkmaktadır. Daha sonra DES yöntemindeki sorunlara çözüm bulmak amacıyla DDES (Gecikmeli Ayrılmış Girdap Benzeşimi) sunulmuştur. DES ve DDES modelinde duvar katmanı uyumsuzluk sorunu sebebiyle ve bunun sorunun üzerine çalışmalar gerçekleştirilerek IDDES türbülans yöntemi literatüre kazandırılmıştır. Bu bölümde bu üç türbülans modeli gelişimi, altyapısı, mevcut sorunları ve sunulan çözüm önerileri hakkında bilgilendirme yapılmaktadır.

Ayrık girdap benzeşim yöntemi (DES) genellikle hibrit LES/RANS (Büyük ölçekli benzeşim yöntemi/ Reynolds ortalamalı Navier-Stokes) modeli şeklinde de literatürde karşımıza çıkmaktadır. Zamanla akış fiziğine bağlı değişim gösteren RANS ve LES yöntemlerinin birleşimi ile elde edilir. Bu yöntem RANS’a göre daha etkili ve LES

kadar maliyetli olmayan bir yöntemdir. LES yöntemi büyük ölçekli olayların baskın olduğu kısımda kullanılmakta, duvar yakını viskoz etkilerin hâkim olduğu yerlerde ise RANS modeli kullanılmaktadır. Bu çözüm Spalart ve diğerleri tarafından kullanılmaya başlanmıştır. DES metodu bilgisayar gücüne LES metodundan daha az ihtiyaç duyarken RANS modeline göre daha uzun zaman gerektirir [39] [95] [96]. DES, hibrit olması sebebiyle, akış alanında hem RANS hem de LES ağ gereksinimlerini karşılayan, dikkatle tasarlanmış bir ağ yapısına gerek duymaktadır. DES türbülans modelinde üstesinden gelinmesi gereken ağ yapısı kaynaklı ayrılma (Grid induced separation (GIS)), LES modunda girdap viskozitesinin fiziksel olmayan sönümlenmesi, duvar katmanı uyumsuzluğu, gri alan sorunu (kayma katmanlarında LES moduna geçiş gecikmesi) gibi problemler mevcuttur [97] [98] [99] [100].

Klasik DES yöntemindeki temel sorunlardan biri, ağ boyutu sınır tabakası kalınlığı δ mertebesinde olan, duvara paralel ayırıklaştırmadaki belirsiz ağların ele alınmasıyla ilgilidir. Menter ve Kuntz bitişik sınır tabakalarda LES modunun etkinleştirilmesinin engellenmesi için, sınır tabakayı korumak üzere bir fonksiyon uygulamıştır. Bitişik sınır tabakalar içerisinde LES'in aktivasyonunu geciktirdiği için yöntem gecikmeli DES (DDES) olarak adlandırılır. Bu sayede DDES, klasik DES'te sorun olan ağ yapısı kaynaklı ayrılmayı iyileştirir. DDES yöntemi, belirsiz ağ sorununu çözmede başarılı olmasına ve klasik DES'in sağlamlığını artırmasına rağmen, DDES modelinde duvar katmanı uyumsuzluk sorunu hala mevcuttur [101].

Duvar katmanı uyuşmazlığı, iç tarafta RANS modellemesi ve dış tarafta LES çözülmesi nedeniyle hem DES hem de DDES yöntemlerinde ortaktır. Yani her iki taraftaki modelleme ve çözme yaklaşımları nedeniyle uyumsuzluk ortaya çıkmaktadır. Duvar katmanı uyuşmazlığı, yüzey sürtünme katsayısının yaklaşık %15 oranında eksik tahmin edilmesine neden olabilmektedir [102] [103]. Bu duvar katmanı uyuşmazlığını çözmek için Shur ve ark., Geliştirilmiş DDES (IDDES) olarak adlandırılan yeni bir model önermişlerdir [102]. Geliştirilmiş kelimesi, modelin geliştirilmiş duvar modelleme kabiliyetini ifade eder. IDDES modelinin DDES yönteminden en büyük farkı, giriş (veya başlangıç) koşullarına bağlı olarak hem DDES hem de Duvar Modelli LES (WMLES) kullanmasıdır [101] [102]. Giriş, türbülanslı yapıda ise, IDDES, WMLES gibi çalışır, aksi halde DDES olarak çalışır. Shur ve diğerleri tarafından IDDES modelinin orijinal önerisi S-A tek denklemlili RANS modelini temel alır. Gritskevich, mevcut çalışmada kullanılan SST $k-\omega$ modeline dayalı modeli

uygulamıştır [104]. SST k- ω tabanlı IDDES modelinin formülasyonunun türbülans kinetik enerji denkleminde hibrit uzunluk ölçeği aşağıdaki şekilde kullanılır:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \widetilde{P}_k - \frac{\rho k^{3/2}}{L_{hibrit}} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right]$$

Buradaki hibrit uzunluk ölçeği şu şekilde tanımlanır:

$$L_{hibrit} = L_{IDDES} = \widetilde{f}_d (1 + f_e) \times L_{RANS} + (1 - \widetilde{f}_d) \times L_{LES}$$

L_{IDDES} , IDDES uzunluk ölçeği iken, L_{LES} terimi LES uzunluk ölçeğidir:

$$L_{LES} = C_{DES} \times \Delta$$

Buradaki $C_{DES} = 0.65$ ve DES'in temel ampirik sabitidir. $\widetilde{f}_d$ (geciktirme fonksiyonu) aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\widetilde{f}_d = \max[(1 - f_{dt}), f_B]$$

$\widetilde{f}_d$, hem geometrinin (f_B), hem de akışın ($1 - f_{dt}$) bir fonksiyonudur. f_B ampirik bir fonksiyondur. $f_B = 0 - 1$ arasında değişir ve RANS modundan $f_B = 1$, LES moduna $f_B = 0$ olur. Yukarıda yer alan ikinci ampirik fonksiyon, yükseltme fonksiyonu f_e , arayüzlerinin yakınında RANS ve LES bölgelerinin etkileşiminde gözlenen RANS Reynolds gerilmelerinin aşırı azalmasını önlemeyi amaçlamaktadır. IDDES modelinde, sadece ayrıklaştırma mesafesine bağlı değil, aynı zamanda $\widetilde{f}_d$ aracılığıyla modele daha fazla hassasiyet sağlayan duvar mesafesine de bağlıdır.

$f_e = 0$ ise hibrit uzunluk ölçeği şu hale gelir:

$$L_{hibrit} = L_{IDDES} = L_{DDES} = \widetilde{f}_d \times L_{RANS} + (1 - \widetilde{f}_d) \times L_{LES}$$

IDDES türbülans modeli DDES türbülans modeline döner.

$f_e > 0$ ve $f_B = \widetilde{f}_d$ ise, IDDES modeli WMLES modunda çalışır:

$$L_{hibrit} = L_{IDDES} = f_B (1 + f_e) \times L_{RANS} + (1 - f_B) \times L_{LES}$$

$$\Delta = \min[\max(C_W \Delta_{max}, C_W d, \Delta_{min}), \Delta_{max}]$$

$C_W = 0.15$ sabit ve d duvardan olan uzaklıktır. En az (Δ_{min}) ve en çok (Δ_{max}) ayırıklaştırma boyutu ölçüğü sırasıyla:

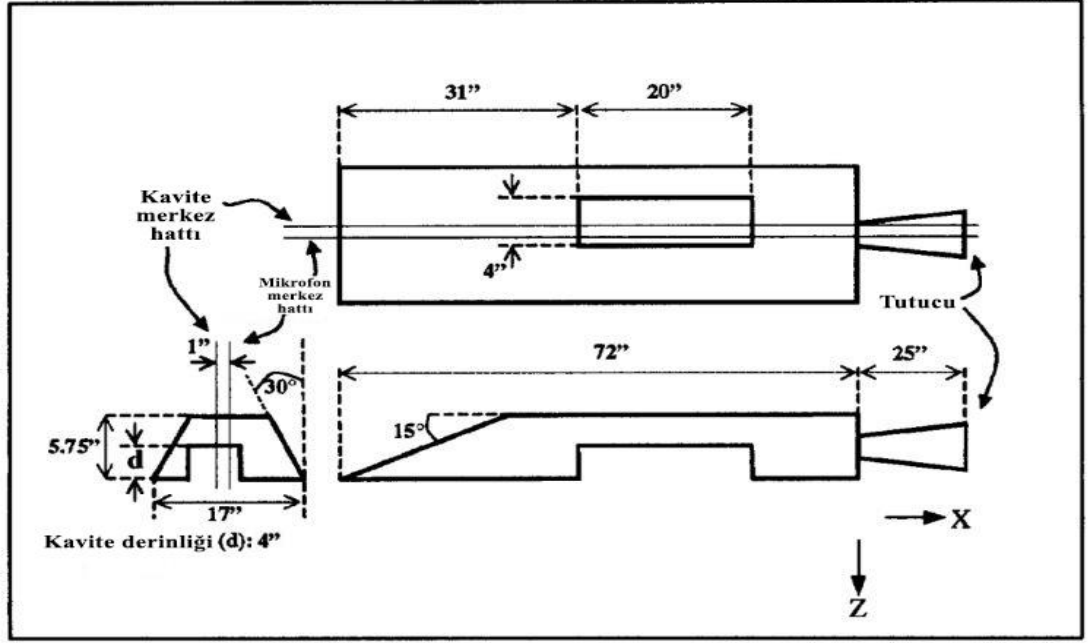
$$\Delta_{min} = \min(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z)$$

$$\Delta_{max} = \max(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z)$$

2015 yılında Xiao ve arkadaşları tarafından kavite geometrisi üzerinde çalışmada, M219'un sayısal sonuçları, mevcut IDDES metodolojisinin kesme tabakası kararsızlığını, küçük ölçekli yapılara parçalanmayı, kavite duvarına akışın çarpmalarını ve girdaplar arasındaki etkileşimleri iyi bir şekilde çözebileceğini göstermektedir. Mevcut yaklaşımın kavite tarafından indüklenen akış geçişini simüle etmek için uygulanabileceği sonucuna varılabilir [105].

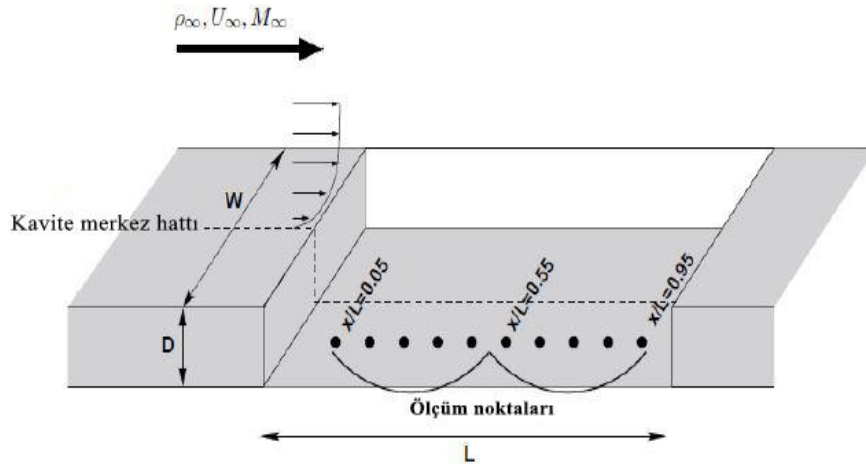
2.3 Hesaplama Alanı ve Sınır Şartları

Bu bölümde, hesaplamalarda kullanılan durumlar için geometri, hesaplama alanı ve sınır koşulları hakkında ayrıntılar sunulmaktadır. M219 kavite akışı problemi yukarıda belirtilmiş olan SST $k-\omega$ tabanlı IDDES türbülans modeli ile akustik etkilerinin incelenmesi için seçilmiştir. Kavite geometrisinin boyutları deneysel çalışmada belirtildiği gibi $D = 4 \text{ in} = 0.1016 \text{ m}$ karakteristik uzunluğunda olup, Genişlik- Derinlik-Uzunluk oranı 1D:1D:5D olacak şekilde alınmıştır. Akustik etkilerin incelendiği deneyde kullanılan kavite geometri şeması Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

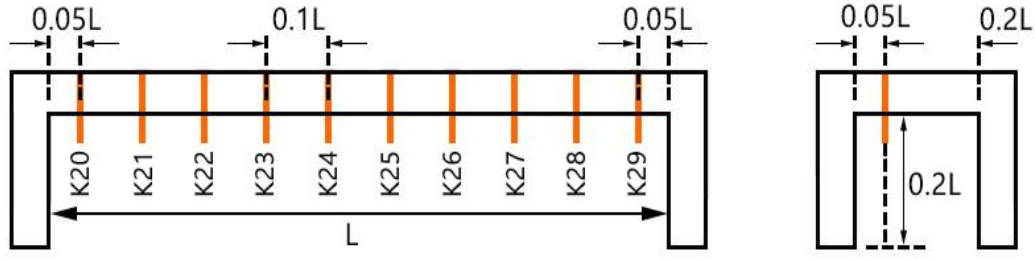


Şekil 2.6: Deney kavite geometrisi.

Şekil 2.6’da verilen deneysel çalışmada kullanılan şemadaki ölçüler inçtir. Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de gösterildiği gibi deneyde kavite geometrisinin tabanına yerleştirilen mikrofonlar yardımıyla ses basınç seviyesi verilerine ulaşılmıştır. Mikrofonlar deney ile paralel şekilde k20-k29 olarak isimlendirilmiştir [106].



Şekil 2.7: Kavite mikrofon konumları.



Şekil 2.8: Kavite mikrofon konumlarının yan görünüşü.

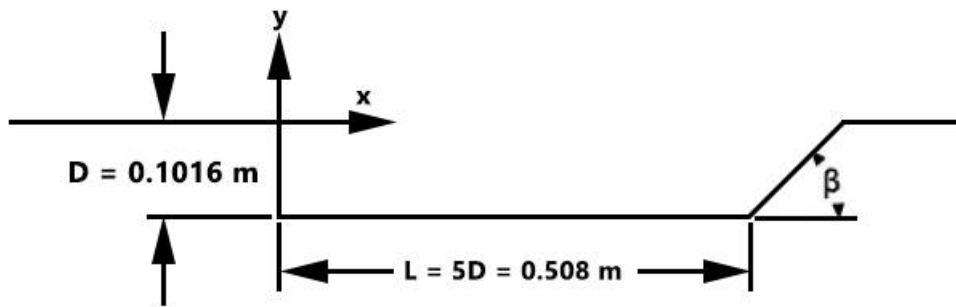
Şekil 2.8’de açıkça görüldüğü üzere, kavite boyunun L olduğu bilgisiyle, mikrofonlar kavite ön ve arka duvarından $0.05L$ uzakta başlayıp bitecek şekilde yerleştirilmiştir. Her iki ardışık mikrofon arası $0.1L$ olacak şekilde organize edilmiştir. Mikrofonlar kavite dik yönünden bakıldığı zaman bir duvara daha yakın olarak konumlandırılmış olduğu gözükmemektedir. Kavite geometrisine akış gelen yönden bakıldığında mikrofonların neden ortalı değil de bir duvara daha yakın yerleştirildiği bilinmemektedir.

Kavite içindeki zamana bağlı fiziksel parametrelerde sınır şartına bağlı olarak meydana gelen hatalarının önüne geçmek için, Peng’in M219 kavite geometrisi üzerinde farklı türbülans modelleri ve farklı ticari yazılımları karşılaştırdığı çalışmasında oldukça tutarlı sonuçlar veren hesaplama alanı içine kavite geometrisi yerleştirilmiştir [107]. Hesaplama alanı $L_x \times L_y \times L_z = 18D \times 9D \times 17D$ olup, kavite geometrisi uzunluğu yönünde girişten $7.75D$ uzağa yerleştirilmiştir. Kavite geometrisi genişliği yönünde $4.5D$ olacak şekilde alanın ortasına yerleştirilmiştir. Sayısal çözüm için oluşturulan hesaplama alanı yapısal olmayan ağ yapısı için Şekil 2.9’da gösterilmiştir.

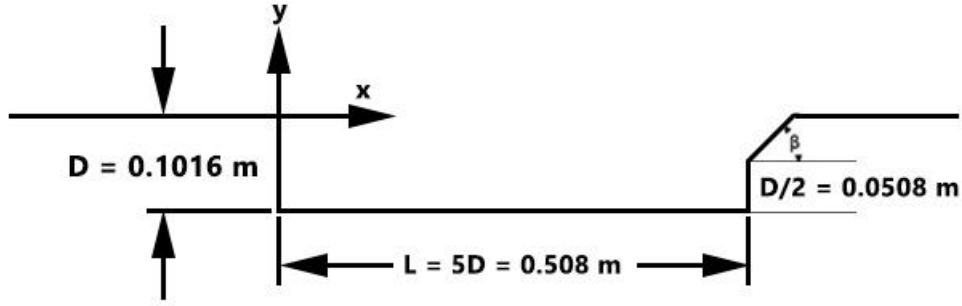


Şekil 2.9: Kavite geometrisinin yapısal olmayan sayısal ağ yapısı örneği.

Üç boyutlu hesaplama alanı çözümünde deneysel durum incelemesi yapılmış ve devamında çizelge 2.2’de belirtilen on iki farklı durum daha araştırılmıştır. Bu durumlar kavite geometri değişikliğini temel alan pasif kontrol yöntemleridir. Bu kontrol yöntemlerinin şematik gösterimi şekil 2.10 ve şekil 2.11’de gösterilmiştir. Ardından bunlara ek olarak dört durum daha, bu durumların birleştirilmiş halleri olarak incelenmiştir. Çizelge 2.3’te belirtildiği şekilde ön duvara başka bir kontrol yöntemi uygulanırken arka duvara başka bir değişiklik yapılmıştır.



Şekil 2.10: Arka duvara uygulanan pasif kontrol gösterimi.



Şekil 2.11: Arka duvar ortasından itibaren eğim olarak uygulanan pasif kontrol gösterimi

İncelenen toplamda on yedi farklı durum için de mikrofon yerleri ve kavite taban uzunluğu aynı kalacak şekilde çalışılmıştır. Ağ yapısının analiz etkilemesi istenmediğinden dolayı, ağ yapısından bağımsızlık çalışması yapılmıştır ve sayısal çözüm yöntemi doğrulaması bölümünde irdelenmiştir. Hesaplama alanımız kavite içi ve dışı olmak üzere akış alanı iki temel alana bölünmüş durumdadır. Kavite içine yoğunlaşmak üzere, ön ve arka duvarlarının yakın bölgelerinde meydana gelen girdap oluşumlarının doğru bir şekilde saptanabilmesi için kavite içi ve yakını bölgelerde sıkılaştırılmış bir ağ yapısı kullanılmıştır. Ayrıca kavite taban kısmında oluşan basınç dalgalanmalarının doğru belirlenmesi ses basınç seviyesi ölçümlerinde önem teşkil ettiği için y^+ değeri çalışması yapılmış ve ağ yapısı saptanan y^+ değerinde sıkılaştırılmıştır. Bu değer belirlenmesi için yapılan çalışma sayısal çözüm yöntemi doğrulaması kısmında açıklanmıştır.

Çizelge 2. 2: Pasif kontrol yöntemleri.

Durumlar		Durum Açıklaması
Ön duvar	Arka duvar	
1	2	Duvar ortasından 30 derece eğim
3	4	Duvar ortasından 60 derece eğim
5	6	Duvar tabanından 30 derece eğim
7	8	Duvar tabanından 60 derece eğim
9	10	Duvar 1 in kesildi
11	12	Duvar 2 in kesildi

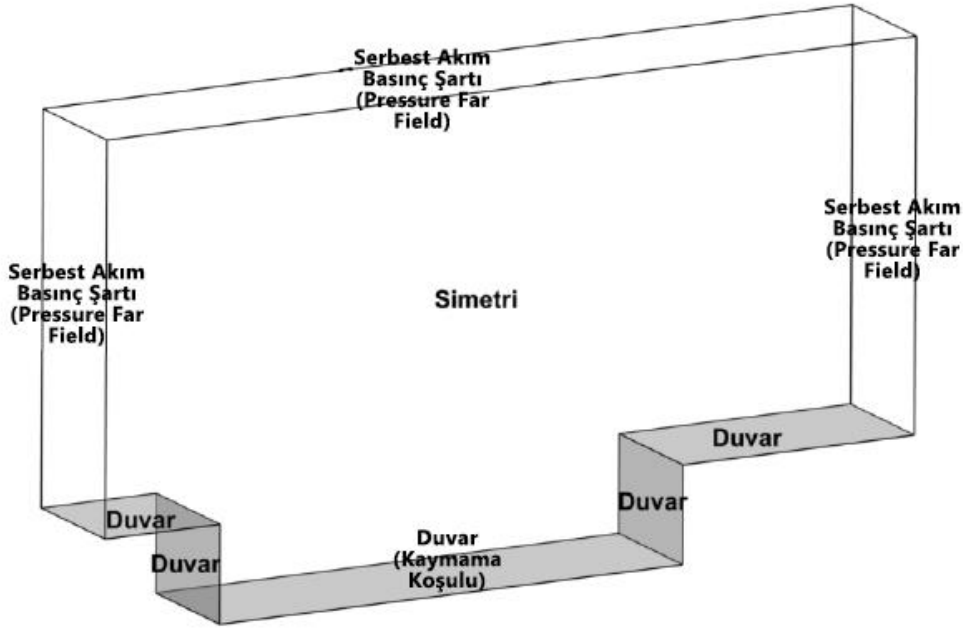
Çizelge 2. 3: Birleştirilmiş pasif kontrol yöntemleri.

Birleşik Durumlar	Ön duvar	Arka duvar	Durum Açıklaması
13	11	8	Ön duvar 2 in kesildi ve arka duvar tabanından 60 derece eğim verildi
14	11	4	Ön duvar 2 in kesildi ve arka duvar ortasından 60 derece eğim verildi
15	9	4	Ön duvar 1 in kesildi ve arka duvar ortasından 60 derece eğim verildi
16	9	8	Ön duvar 1 in kesildi ve arka duvar tabanından 60 derece eğim verildi

FLUENT çözücüsü içerisinde farklı sınır koşulu çeşitliliği barındırmaktadır. Doğrulanmış çıktılar elde etmek için sonuçlar için doğru sınır koşulu seçimi önemli bir konudur. Bu incelemede yapılan analizlerde, uzak alan basıncı (pressure-far-field), simetri ve adyabatik duvar sınır şartları ile çalışılmıştır. Hesaplama alanına uygulanan sınır koşulları Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Şematik olan bu gösterime göre hesaplama alanı girişleri ve çıkışları pressure far field sınır koşulu verilmişken kavite ön ve arkasındaki açık alanda dahil olmak üzere kavite bölgesine de adyabatik duvar koşulu tanımlanmıştır. Simetri sınır koşulu üç boyutlu yapılan çalışmalarda hesaplama alanının akışa göre sağ ve sol yan duvarları diyebileceğimiz kısımlarına verilmiştir. Hesaplamalarda zaman adımı $2 \times 10^{-5} s$ ve örnekleme zamanı 0.2 s olarak tanımlanmıştır. Hesaplama koşulları test koşullarıyla aynı kalacak şekilde çalışılmıştır. Bu koşullar çizelge 2.4’te verilmiştir.

Çizelge 2. 4: Deneysel çalışma koşulları.

Toplam Basıncı	$6.21 \times 10^4 Pa$
Toplam Sıcaklık	267 K
Mach Sayısı	0.85
Reynolds Sayısı	$13.5 \times 10^6 / m$
Kavite Uzunluğu	0.508 m
Kavite Derinliği	0.1016 m
Kavite Genişliği	0.1016 m
Zaman Adımı	$2 \times 10^{-5} s$



Şekil 2.12: Hesaplama Alanı Sınır Koşulları.

2.4 Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) Akustik Analoji

Aerodinamik temelli gürültü tahmini, hesaplamalı aeroakustik (HAA/CAA) topluluğunda ortak ilgi alanıdır. Bir gözlemci konumundaki aerodinamik gürültüyü hem aerodinamik gürültü kaynaklarını hem de hesaplama alanındaki gözlemciyi kapsayan ilgi alanındaki kararsız akış fenomeninin HAD çözümleri ile hesaplamak mümkündür. Ancak, gözlemcinin gürültü kaynağına olan mesafesi büyüdükçe, HAD'ın hesaplama maliyeti karşılanamaz hale gelir. Bu nedenle araştırmalar, uzak alan gürültüsü üretimi ve aerodinamik gürültünün yayılması hesaplamaları için HAD'ı akustik analoji yöntemleriyle birleştirmeye odaklanmışlardır. Aerodinamik kaynaklı gürültünün anlaşılabilmesi amacıyla 1952 yılında James Lighthill tarafından ortaya konulan çalışma, Akustik Analoji teorisinin temellini oluşturmaktadır. Lighthill, yayınladığı çalışmada, süreklilik ve momentum denklemlerini homojen olmayan bir dalga denklemi olarak yeniden biçimlendirmiştir. Lighthill, hesaplama hacmi içinde küçük bir hacme karşılık gelen akış alanını konu edinerek, Lighthill'in Denklemi şeklinde de ifade edilen, uzak alandaki (akustik alan) basınç dağılımına karşılık gelen, non-homojen dalga denklemini ortaya koymuştur. Akış alanı yani kuvvetli

aerodinamik etkiler altındaki alan, gürültü oluşturmada önem arz eden bir kaynak konumundadır. Bu bölge haricindeki alan, yani uzaktaki bölge, akustik bölge olarak ifade edilebilir. Yüksek hız ve basınç etkilerine sebep oluşan gürültü ifadesi kapsamlı olarak bu bölgeyle ilişkilidir [108]. Bu yaklaşıma göre, uzak akış alanı ile yakın akış alanı birbirinden ayrılmaktadır. Ses oluşumunu sağlayan kaynak ile ses dalgalarının yayılım sağladığı ortamın hiçbir etkileşmeye girmedikini kabul etmektedir. Ayrıca aynı çalışmada hareket enerjisinin akustik enerjiye doğrudan çevrilebileceğini düşündüğü üç durum ortaya koymuştur:

1. Durağan bir uzayda kütlenin harekete zorlanmasıyla
2. Uzayın durağan kısmındaki momentumu harekete zorlayarak veya sabit yüzeyler boyunca kütle akışı oranlarını değiştirmeye zorlayarak.
3. Durağan katı sınırları içinde, durağan yüzeyler boyunca momentum akışı oranlarını değiştirmeye zorlayarak.

Lighthill'in akustik analojisi sadece herhangi bir katı sınır içermeyen ya da katı yüzeyin etkisi ihmal edilebilenen üçüncü mekanizma ile ilgilidir [38].

Lighthill denklemi, non-homojen ve lineer olan bir dalga denklemidir. Bu denklemin kaynak terimi daha ilerde açıklanacak olan Kuadrupol terimidir ki bu kaynak terim türbülans içermeyen akış alanı harici bölgelerde hükümsüz duruma dönüşecektir. Buradan yola çıkarak uzak alanda Lighthill denklemi homojen dalga denklemi formunu sergilemektedir denilebilir. Bu denklem, herhangi bir gerçekleşen akış alanı içinde meydana gelen dalgalanmalarla, akustik alandaki kaynak terimi kuadrupol çalkantısından sebep dar genliklere sahip yoğunluk değişimlerinin kuvvetli bir bağ ile ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Lighthill Akustik Analojisinin anlaşılabilmesi ve çözümlenebilmesi için kaynak terim ifadesinden verilere ulaşabilmemiz önemlidir. Ancak bu kaynak terimi yoğunluk salınım ifadesine sahiptir. Lighthill'in sunduğu denklem, N-S denklemlerinden türetildiği bilgisiyle, bu korunum denklemleri ve kanunlarına uyması gerekmektedir. Bu sebeple karşılaşılan akışların tamamı tarafından doğrulanabilir olması gerekmektedir. Yani kaynak terimini reel olarak tanımlanabilir, kütle ve momentum korunumu denklemlerinin çözülmesiyle aynı yere çıkmaktadır. Toparlayacak olunursa, kaynak terim ifadesinin tanımlanabilmesi gerçekten kompleks bir çalışmayı zorunlu kılmaktadır. Ancak temel hedefimizin açıldığı kapı olan mühendislik açısından ele alırsak ve bununla birlikte insanların sese karşı tepki eşiğinin çok düşük olmaması, bu terimin mutlak hassasiyetle çözüme

ulaşmasının gerekli olmadığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak bu denklemin çalışması, kaynak terimin hassas olarak hesaplanmadığında bile, son derece tatmin edici akustik çıktılar sağlamaktadır [109]. Lighthill denklem ve yaklaşımı, daha önce de ifade edilen, akışkan alanın içinde katı bir yüzey olmadığı veya katı yüzey ses etkisinin çok çok düşük seviyede olması sebebiyle yok sayıldığı zamanlarda geçerli bir analogidir. Fakat akış alanlarına ve mühendislik uygulamalarına baktığımızda genel itibariyle, akış alanı katı yüzeyler barındırmaktadır. Bu sebeple, bir süre sonra Lighthill analojisi yaklaşımı geliştirilme ihtiyacı duyulmuştur.

Curle, 1955 yılında Lighthill analojisini geliştirmesini yaparak literatüre kazandırmıştır. Curle'nin çalışmasının akış alanı içinde katı bir yüzey olmadığı kabulü ile çalışan Lighthill'in yaklaşımından farkı, bu alan içerisinde katı cismin aerodinamik temelli ses oluşumuna etkilerini ele alarak genişletilmiş olmasıdır [40]. Bu çalışmaya göre, katı yüzeyler Lighthill'in analojisindeki Kuadropol kaynağının sebep olduğu aerodinamik nedenli ses oluşumuna iki ayrı şekilde etkilemektedir. Bunlardan ilki akustik dalga yayılımı duvar ile etkileşir, basınç duvardan yansımaya uğrar ve yayılımını devam ettirir. Bir diğeri ise quadropol çalkantıları katıların limitleri haricinde enerjilerini koruyamayacaklardır. Bu enerjilerini kaybetme durumlarında, katı yüzeylerinde meydana gelen yoğunluk değişimleri dipol çalkantıların bir sonucu olduğu ifadesi ortaya konulmaktadır. Bu dipol etkiler, akustik alanda dış kuvvetlerin uygulaması olarak karşılık bulur. Bu tarz bir kuvvet akışkanla katı yüzey sınırları ilişkisinde bulunur. Curle'nin katkılarıyla genel ses oluşumunda iki çeşit etken rol almaktadır. Bunlardan Lighthill'in ortaya koyduğu quadropol etki olarak daha önce açılanan, ses oluşumuna sebep olan akışın içerisinde katı yüzeylerin bulunmadığı ve yalnızca yüksek hızlardaki akış olaylarında karşımıza çıkan etkilerdir. Bir diğeri ise katı yüzeylerin etkisiyle meydana gelen, akışın alanına etki eden aerodinamik kuvvet mekanizmasının oluşturduğu yoğunluk devinimlerini kapsayan dipol etkilerin katkısıdır.

Ffowcs William–Hawkins yaklaşımı, Lighthill'in ortaya koyduğu ses oluşum yaklaşımının en kapsayıcı şeklidir. Curle'nin yaklaşımı, akışkan temelli ses oluşumuna akış alanı içinde durgun halde iken katı yüzey katkısını eklemişken, FW-H yaklaşımı akış alanı içinde bulunan hareketli haldeki katı yüzeyin katkılarını da gürültü hesabına eklemiştir. Ffowcs Williams ve Hawkins, ilk kez akış içerisindeki hareketli katı yüzey etkisiyle oluşan ses için Lighthill akustik analogi yaklaşımını genelleştirerek

ortaya koymuşlardır. FW-H yöntemi, akış alanında keyfî bir hızda hareket eden katı bir cismin varlığını açıklamaktadır. Model, tüm bu kaynakların birbirinden bağımsız olduğu formülasyonda iki yüzey kaynağından (monopol ve dipol kaynakları) ve bir hacim kaynağından (dörtlü kaynak) oluşmaktadır [41]. FW-H analojisinin temelindeki fikri tanımlayacak olursak hesap alanını 2 kısıma ayırır. Bu iki alan, fiziksel olayla doğrudan ilişkili yüzeylerin meydana getirdiği hipotetik bir düzlem şeklinde ayrılır. FW-H akustik analojisinde, ses kaynakları Şekil 2.13'te gösterildiği gibi matematiksel olarak $f(x; t) = 0$ ile temsil edilen bir kontrol yüzeyi tarafından çevrelenir. HAD ve akustik analogi bağlantısında, doğrusal olmayan etkiler için hesaplama alanında N-S denklemleri çözülür ve kontrol yüzeyinde kararsız akış değişkeni verileri toplanır. Daha sonra, FW-H akustik analogi yöntemi ile herhangi bir gözlemci konumuna doğrusal olarak yayılır [110].



Şekil 2.13: FW-H kontrol yüzeyi tanımı.

$f=0$ olduğu durumda, alanın içindeki hareket halinde olan cisim yüzeyini ifade etmektedir. F değeri 0'dan büyük olduğunda akış alanı söz konusuyken, f değerinin 0'dan küçük olması durumunda ise katı cisimlerin içini betimlemektedir.

Ffowcs Williams ve Hawkins denklemleri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$\begin{aligned} \frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' &= \frac{\partial}{\partial t} \{ [\rho_0 v_n + \rho(u_n - v_n)] \delta(f) \} \\ &\quad - \frac{\partial}{\partial x_i} \{ [P_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n)] \delta(f) \} \\ &\quad + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [T_{ij} H(f)] \end{aligned}$$

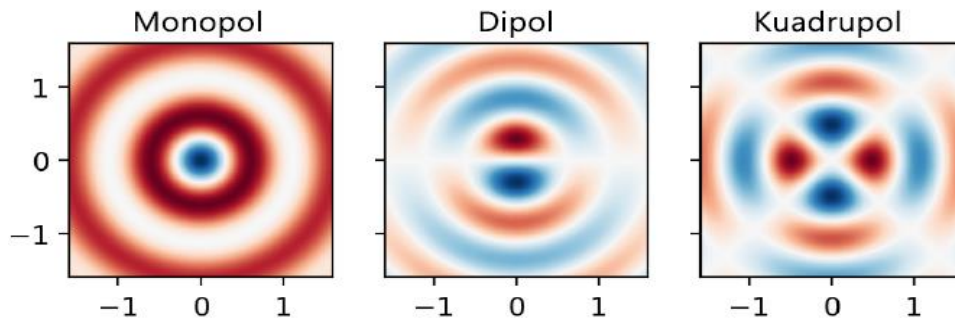
Yukardaki eşitlikte u_i akış hızının x_i yönündeki hız bileşenini u_n ise akış hızının yüzey normali yönündeki kısmını ifade etmektedir. Benzer şekilde v_i ve v_n de sırasıyla, yüzey hızının x_i doğrultusundaki ve yüzey normali doğrultusundaki hız bileşenleridir. $\delta(f)$ ve $H(f)$ fonksiyonları Dirac Delta ve Heaviside fonksiyonu olarak bilinmektedir. p' akustik basınç olarak ifade edilmektedir. T_{ij} Lighthill gerilme tensörü;

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - a_0^2 (\rho - \rho_0) \delta_{ij}$$

P_{ij} ise Stokes akışları için aşağıdaki şekilde verilir.

$$P_{ij} = p \delta_{ij} - \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right)$$

FW-H denkleminin sağ tarafının ilki monopol (kalınlık), ikincisi dipol (yükleme), üçüncüsü ise quadrupol terimidir. Şekil 2.14'te bu üç kaynağın alan üzerinde gösterim şeması mevcuttur. Monopol ve dipol olarak adlandırılan ilk iki terim; kontrol yüzeyi hariç diğer tüm f değerlerinde 0'a eşit olan dirac delta fonksiyonuna sahip olmasından dolayı; yüzey kaynakları olarak belirlenebilirler. Üçüncü terim olan quadrupol terimi; sadece yüzeyin dışındaki bölgede 1 değerine eşit olan $H(f)$ fonksiyonuna sahip olduğu için; bir hacim kaynağı olarak belirlenebilir. Genel maksatlı bir HAD yazılımı sayesinde, içinde kaynak terimi barındıran dalga denklemi çözümü ile ses yayılması için akustik analogi yaklaşımı önerilmiştir. Bu yöntem, katı bir yüzey kaynak olduğu zaman akış alanında ses limitinin belirlenmesinde kullanılır. Şekil 2.8'te görüldüğü üzere deneysel çalışma ile paralel olacak şekilde toplam 10 tane mikrofön yerleştirilmiştir ve kavite akış bölgesi ses basınç seviyeleri açısından incelenmiştir.



Şekil 2.14: Gürültü kaynakları a) Monopol, b) Dipol, c) Kuadrupol. [111]

FW-H formülasyonu, monopol, dipol ve kuadrupol kaynaklar olan basit akustik kaynaklardan yararlanır. Monopol kaynakları, akış alanındaki gövde (kanat profili,

kanat vb.) geometrik özelliklerine doğrudan bağlı olan kalınlık gürültüsünü üretir. Tek kutuplu kaynaklar her yöne akustik dalgalar yayar. Yükleme gürültüsünden dipol kaynakları sorumludur. Bir dipol kaynağı, eşit güçlere ve zıt fazlara sahip iki tek kutuplu kaynağın bir kombinasyonudur. Monopol ve dipol kaynakları, yüzey kaynakları ve lineerleştirilmiş aerodinamiğin sonuçlarıdır. Dörtlü akustik kaynak ise, farklı kuvvetlerde ve fazlarda düzenlenebilen iki dipolden (veya dört monopolden) oluşur. Kuadrupol kaynaklar, doğrusal olmayan etkileri, yani doğrusal olmayan dalga yayılımını, ses değişiminin yerel hızını, şok gürültüsünü ve türbülans, girdap vb. tarafından üretilen gürültüyü hesaba katar. Dörtlü gürültü, özellikle yüksek hızlarda kritiktir [111].

FW-H analojisinin, denklemin kaynak tarafındaki ilk terim olarak gözüken monopol terimi, örnekleyecek olursak bir türbin kanadı döndüğü esnada, oluşan akış alanındaki dengesizlik sebebiyle meydana gelen ses oluşumunu ifade eder. Kanat önündeki havanın süpürülmesi veya itilmesi sebep olarak gösterilmektedir. FW-H yaklaşımında, bu yolla meydana gelen ses oluşumuna " kalınlık gürültüsü (thickness noise)" ismi verilir. Bu tarz bir ses oluşumu sadece geometrinin şekline bağlıdır. Basit mantıkla düşünecek olursak verdiğimiz örnek özelinde daha kalın bir kanata sahip olduğumuzda daha yüksek desibellerde ses oluşumu gözlemlendiğine şahit olunmaktadır. Aksi durumda geçerli olmakla beraber daha ince kanat geometrisi gürültüye daha az neden olmaktadır [112].

FW-H analojisinin, denklemin kaynak tarafındaki ikinci terim olarak gözüken dipol terimi ise, lokal kuvvetlerin yoğunlukları ile orantılı ses oluşum kaynağını belirtmektedir. Bu tarz bir katkı, etkileşimde olduğu basınç alanının sebep olduğu akış alanındaki bozumalar sebebiyle meydana gelmesi nedeniyle dipol gürültü kaynağı olarak ifade edilir. Literatürde karşımıza çıktığı ismiyle ifade edecek olursak; loading term'dir. Bu adlandırmanın sebebi dipol kaynağının içinde barındırdığı P_{ij} teriminden kaynaklanmaktadır. Örneğimizde olduğu gibi türbin kanadı döndüğü anda ileri doğru süpürdüğü hava ile akış alanının bozulmasına sebep olur. Herhangi bir katı yüzeyin varlığında üzerine gelen kuvvet iki farklı tiptir. Yüzeyin normali yönünde gelen kuvvetlere basınç kuvvetleri, yüzeye teğet gelen kuvvetlere ise viskoz kuvvetleri denilmektedir. Bu iki kuvvet toplamı tork ifadesini verir ve bu durumda dik gelen kuvvet yoğunluğu daha çok önem kazanır. Bu kuvvetlerse FW-H analojisinde P_{ij} olarak ifade edilir [112]. Dipol kaynak bir diğer ifadeyle yükleme gürültüsü, hareket

eden bir helikopter rotor kanadının yüzeyi tarafından açığa çıkarılan akışkan üzerindeki ivmelenen kuvvetler vasıtasıyla üretilir. Bıçak girdap etkileşim gürültüsü ve geniş bant gürültüsü, önemli yükleme gürültüsü türleridir. Bıçak girdabı etkileşim gürültüsü, sonraki bir bıçakla etkileşime girdikten sonra açılan bir girdaptan kaynaklanır [113].

FW-H analojisinin, üçüncü ve son terimi ise quadrupol kaynağını belirlemektedir. Bu ifade Lighthill ve Curle yaklaşımlarında da bulunandan başkası değildir. Bu ifade, hacim integrallerinin hesaplaması konusunda yaşanan zorluklar nedeniyle çoğunlukla ihmal edilebilir olarak kabul edilir. Bu nedenle, orijinal FW-H denkleminde, quadrupol gürültü terimini tahmin edilememektedir. Kuadrupol, 4 monopol veya 2 dipolün birleşmesiyle oluşur. Bu ifadeyle eğer iki dipol mevcut durumda bulunuyor ise kuadrupol vardır ya da eğer dört monopol var ise kuadrupol mutlaka vardır gerçeği söz konusudur. İçerdiği; T_{ij} terimi, Lighthill gerilme tensörüdür.

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - a_0^2 (\rho - \rho_0) \delta_{ij}$$

Lighthill gerilme tensöründe bulunan $\rho u_i u_j$ ifadesi Reynolds gerilim tensörü olarak isimlendirilirken türbülans kaynaklı gürültüyü ifade etmektedir [112].

2.5 Spektral Analiz ve Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT)

Akustikte basınç spektrumu veya ses spektrumu, saniyedeki titreşimlerle (Hertz, Hz) ölçülen, bireysel frekansların her birine göre basınç dalgalanmalarının miktarını temsil etmektedir. Spektral analizlerle bir basınç spektrumu elde edilir.

Spektral analizlerde, kararsız basınç veri dizisi, zaman alanından frekans alanına dönüştürülür ve değişen uzunluk ve ölçeklerde salınımlara ayrıştırılır. Ayrıştırılmış veriler frekans alanında toplandığında, frekansın bir fonksiyonu olarak dağıtılmış ortalama gücün konumunu adresleyen kritik frekanslar elde edilir. Buna göre, basınç dalgalanmalarının çok büyük olduğu modal frekansları gösterir. Yoğun akustik ortama maruz kalan yapıların bekası için spektral analiz ile modal frekanslar ve pik büyüklükleri belirlenmektedir.

Zaman alanı verileri, ayrı verileri işleyen Fourier dönüşümünün özel bir biçimi olan Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) aracılığıyla frekans alanına dönüştürülür.

Hızlı Fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform-FFT) titreşimleri analiz etmek için faydalanılan, istatistiksel bazlı, matematik temelli bir işlem olarak ifade edilmektedir. Karmaşık işaret yumaklarını ayrıştırmaya yarar ve kaçınıcı frekansın hangi şiddet ile bir titreşim gösterdiğini ortaya çıkarır. Açıkçası bu dönüşüm, zaman alanındaki sinyalleri frekans alanı olarak bize sunan ve yorum yapmamızı sağlayan bir işlemdir. FFT tekrarı olmayan işaretleri göz önünde bulundurmaz. Karmaşık sinyal topluluğu içerisinde periyodik olarak çalışanları belirleyerek harmonik bileşenlerine ayrıştırır.

Hızlı Fourier dönüşümü (FFT), ayrık zaman alanı verilerini ayrık frekans alanı temsiline dönüştürmek için kullanılan bir sinyal işleme algoritmasıdır. FFT, modal frekansları ve modal zirvelerdeki dalgalanmaların gücünü okumak için aeroakustik çalışmalarda oldukça kullanışlıdır.

Kesinlikle gücü 2 olan verileri gerektiren geleneksel hızlı Fourier dönüşümünün aksine Fluent ticari hesaplama aracında uygulanan FFT, asal faktör algoritmasını kullanır. Prime-faktör FFT algoritması, orijinal verileri daha iyi korumak için algoritmaya esneklik sağlayan 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13 ve 16'nın tüm ürünlerini kabul eder.

Sonlu sayıda veri içeren bir zaman alanı verisinin, $P(t)$, ayrık Fourier dönüşümü, $P(f)$ ile temsil edilir ve şu şekilde verilir:

$$P(f) = \sum_{n=0}^{N-1} \hat{P}_n e^{2\pi i k n / N} \quad k = 0, 1, 2, \dots (N - 1)$$

Buradaki $\hat{P}_n$ Fourier katsayısı olup aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\hat{P}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} P_k e^{2\pi i k n / N} \quad n = 0, 1, 2, \dots (N - 1)$$



3. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ DOĞRULAMASI

Yapılan bu çalışmada, transonik hızdaki ($M_\infty = 0.85$) akış alanında bulunan kavite geometrisi üzerinde zamana bağlı akış niteliklerinin akustik çıktıları irdelenmiştir. Bu araştırmadaki kavite akış çıktıları, Genişlik: Derinlik: Uzunluk oranı 1:1:5 olan deneysel olarak elde edilen M219 kavite akışı sonuçları ile kıyaslanmıştır. Çalışmada deneysel verilerle aynı ortam şartlarını sağlaması açısından $P = 6.21 \times 10^4 \text{ Pa}$, $T = 267 \text{ K}$ ve $Re = 13.5 \times 10^6/m$ olarak alınmıştır. Hesaplamalarda 0.2 s örnekleme süresinde kullanılan zaman adımı $2 \times 10^{-5} \text{ s}$ olarak tanımlanmıştır. Deneysel çalışmanın yapılışı ve yürütülüşüne ait açıklamalar Henshaw'de açıklanmıştır [106].

M-219 Kavite geometrisinin aeroakustik incelemesi yapılırken, deneysel sonuçları da elimizde bulunan SPL ve genel ortalama ses basınç seviyesi (OASPL) önemli bir çıktı olarak karşımıza çıkmaktadır. Genel ses basıncı seviyesi (OASPL), ses dalgalarının yayıldığı bir ortamın ortam basıncına göre bağlı basıncıdır. Akıştaki dalgalanmaların bir göstergesidir. Yani, bir konumdaki OASPL ne kadar yüksekse, dalgalanmaların büyüklüğü de o kadar yüksektir. Ayrıca OASPL, ilgilenilen alandaki gürültü yoğunluğunu gösterir. OASPL formülasyonu aşağıdaki gibidir;

$$\text{OASPL(dB)} = 20 \log \left(\frac{P_{RMS}}{P_{ref}} \right)$$

Burada $P_{ref} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$, insan kulağının duyabileceği en düşük ses seviyesini olan referans basınç değerini ifade ederken, P_{RMS} aşağıdaki gibi kararsız basınç verilerinin integrasyonu ile elde edilir.

$$P_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{anlık} - P_{ort})^2}{N}}$$

Burada N örnekleme veri sayısını ifade etmektedir, $P_{anlık}$ toplanan anlık kararsız basınç verileridir ve P_{ort} ise her bir veri noktasındaki genel kararsız basınç verilerinin ortalamasıdır.

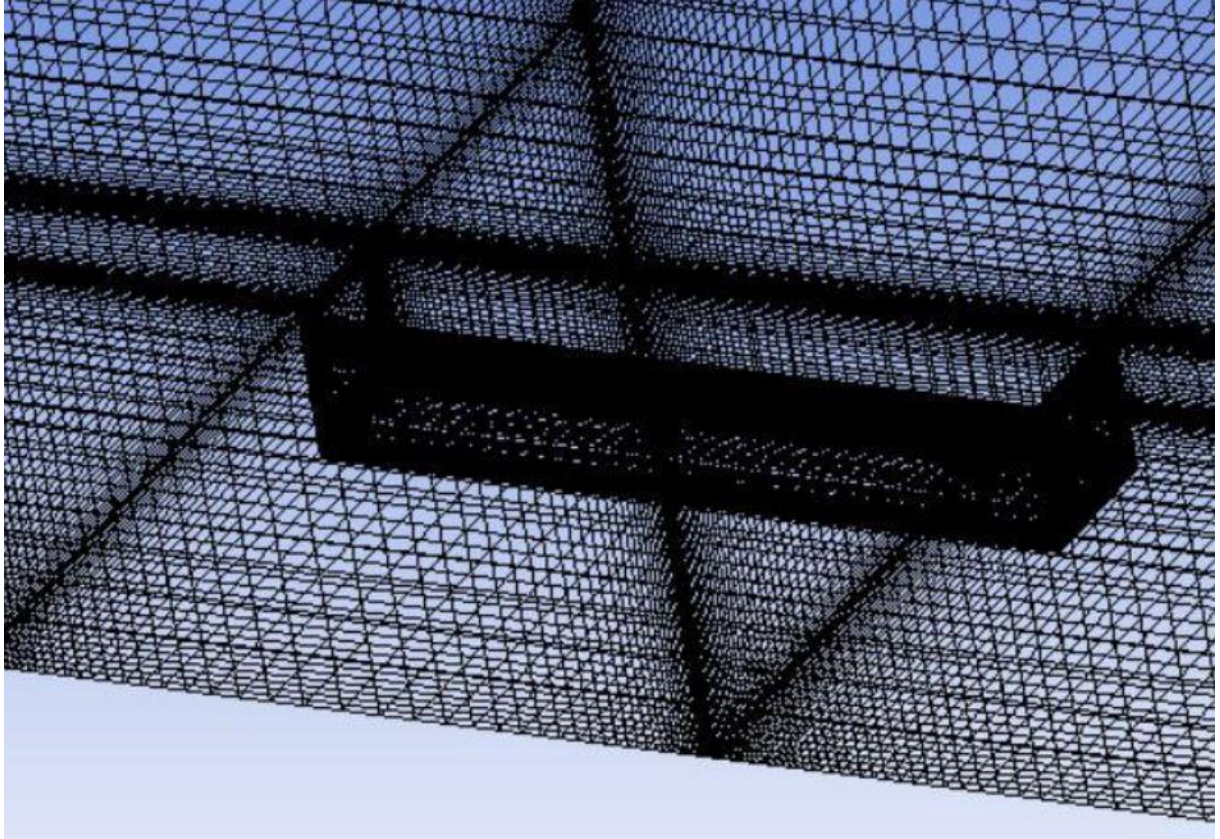
Çalışmanın birinci aşamasında elde edilen sayısal çözümler ile mevcutta bulunan deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Üç boyutlu yapılan analizler için nihai sayısal ağ yapısı saptaması sayısal ağdan bağımsızlık testleri yapılarak belirlenmiştir. Doğrulama

ve ağdan bağımsızlık testleri birlikte yürütülmüştür. Bu amaçla yapılan analizlerde görece tutarlı çözümler sunan dört tane farklı yapısal ağ yapısı ve bulundurduğu hesaplama noktası sayısı çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Çizelge 3. 1: Sayısal ayrıklaştırmadan bağımsızlık çalışması.

SAYISAL AĞ YAPISI	TOPLAM NOKTA SAYISI ($\times 10^6$)
SAY-1	4.5
SAY-2	1.5
SAY-3	6
SAY-4	2.5

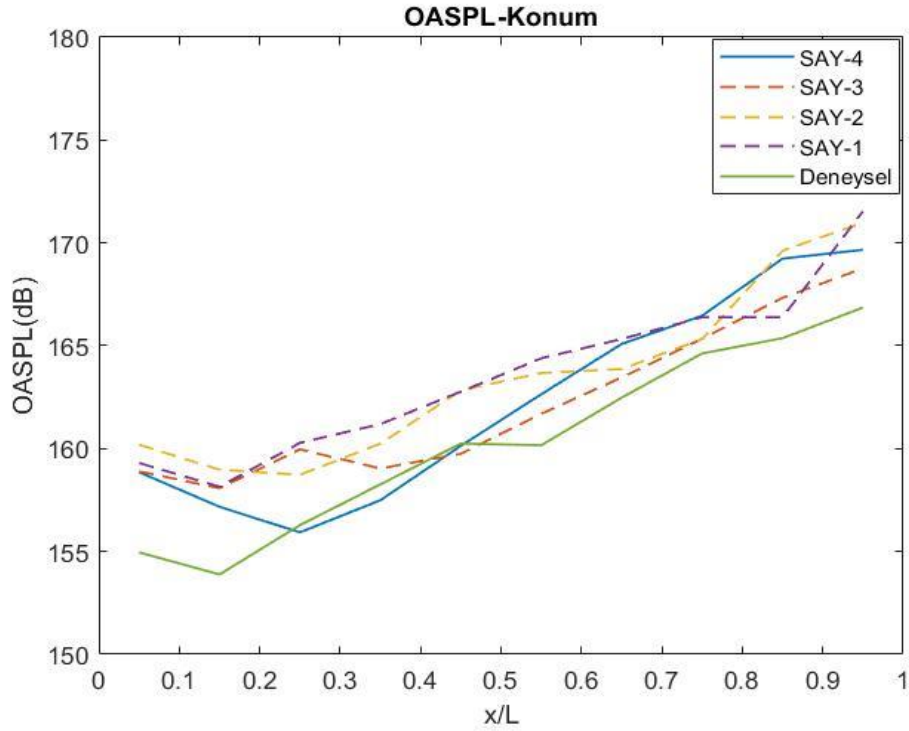
Bu yapısal ağ yapılarının içinde bulunduğu hesaplama alanının bütün özellikleri aynı olup yalnızca ağ sayısının etkisinin irdelenmesi ve çözüm zamanı açısından en tutarlı çözümleri veren ağ yapısı seçilmiştir. Şekil 3.1’de yapısal ağ örneği verilmiştir.



Şekil 3.1: Yapısal ağ yapısı ayrıklaştırması örneği.

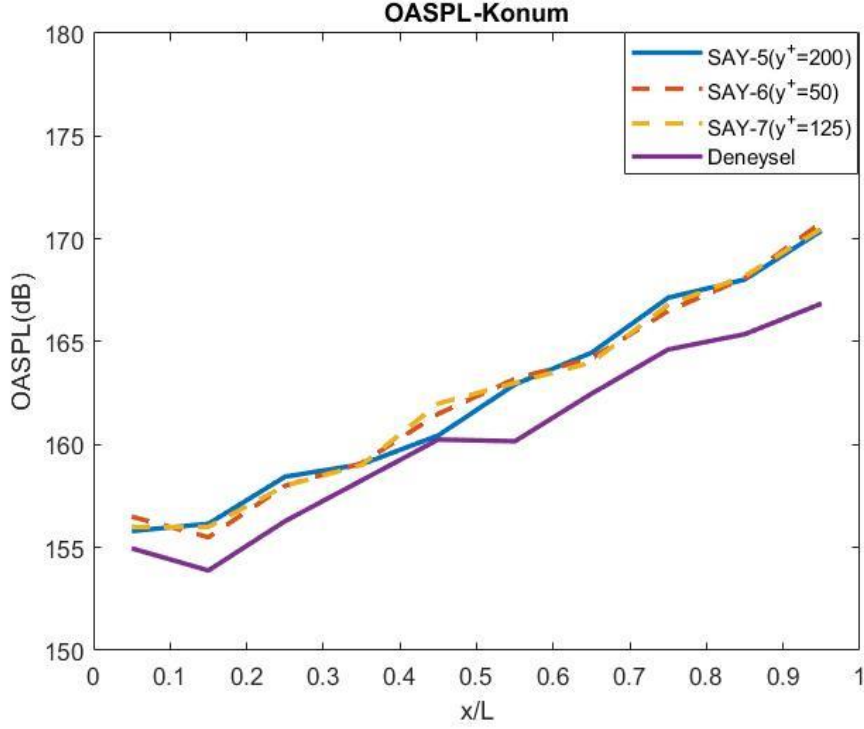
Şekil 3.2’de kavite içi mikrofön konumlarından alınan verilerle OASPL değerleri karşılaştırılması gösterilmiştir. OASPL-konum grafiğindeki sonuçlar göz önünde

bulundurulduğunda tutarlı bir sonuç olarak deneysel verilerden %1,25 (en fazla olduğu noktada 3dB) gibi bir sapma ile ağ yapısı SAY-4 kabul edilebilir sınırlar içerisindedir. Ağ yapısı SAY-3'ün de iyi sonuçlar verdiği açıkça gözükmesine rağmen ağ yapısı SAY-4 ile arasında kabul edilebilir bir fark olmadığı ve bulundurduğu düğüm noktası miktarıyla paralel olacak şekilde talep ettiği bilgisayar gücü sebebiyle ağ yapısı SAY-4 ile çalışmalara devam edilmiştir.



Şekil 3.2: Sayısal ağdan bağımsızlık testleri OASPL değerleri.

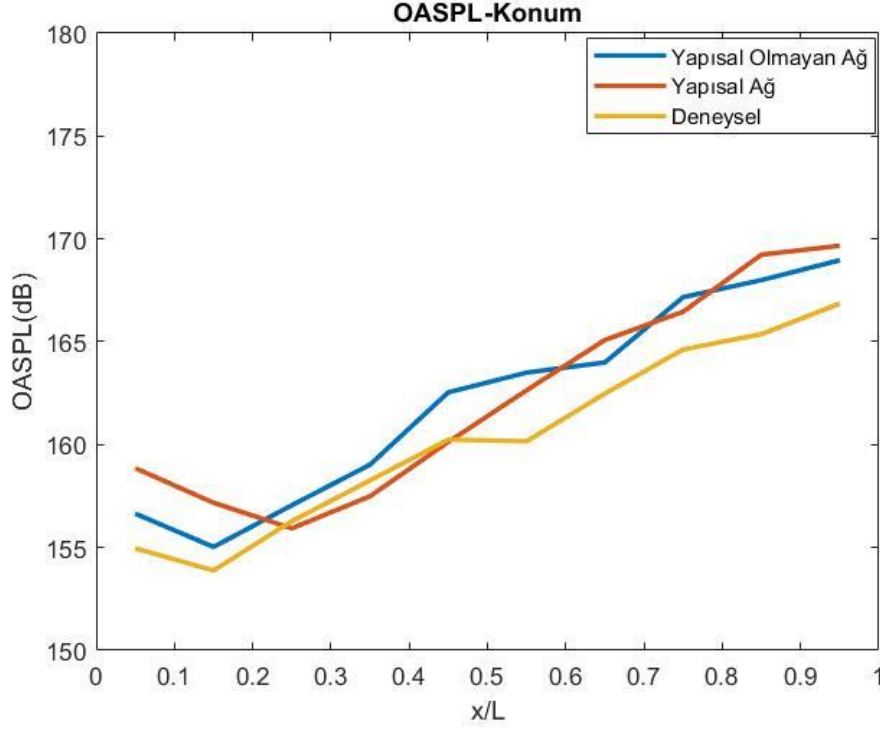
Ayrıca kavite taban kısmında oluşan basınç dalgalanmalarının doğru belirlenmesi ses basınç seviyesi ölçümlerinde önem teşkil ettiği için y^+ değeri çalışması yapılmış ve ağ yapısı saptanan y^+ değerinde sıkılaştırılmıştır. Bu değerin belirlenmesi için yapılan çalışmada maliyeti de göz önünde bulundurarak aynı nokta ve element içeren SAY-4 ağ yapısı ile üç farklı y^+ değerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3'te elimizde bulunan üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmamış kavite geometrisinin deneysel verileriyle kıyaslanan üç farklı y^+ değeri için sonuçlar mevcuttur.



Şekil 3.3: y^+ kıyaslaması OASPL değerleri.

Ağ yapısının kalitesi açısından sorun teşkil etmemesi amacıyla y^+ değerleri sırasıyla SAY-6, SAY-7, SAY-5 için 50,125,200 için çalışılmıştır. y^+ değerinin daha düşük değerlerinde çalışılmak istenmesine rağmen ağ yapısı kalitesi aynı kalabilmesi için nokta ve element sayısı aynı çözüm alanı için arttırılması gerekmektedir. Yani ağ yapısının bulundurduğu elementlerin kalitesini olumsuz etkilemeden y^+ değerini azaltmaya çalıştığımızda bu bize ağ yapısının barındırdığı nokta ve element miktarını artışı olarak geri dönecektir. Bu durum ise karşımıza uzun zaman alan analizler, kısacası maliyet olarak çıkmaktadır. Bu bilgiler de göz önüne alındığında, SAY-5 ağ yapısına ait olan $y^+ = 200$ ile diğerleri arasında sonucu değiştirebilir bir fark olmadığı belirlenmiş ve daha önce yapılmış DESider projesindeki farklı türbülans modellerindeki çözümlerde de kullanılan saptama olan $y^+ = 200$ kabulü ile devam edilmiştir [107].

Çalışmanın buraya kadar olan kısmında yapısal yani düzenli olan ağ yapısı ile devam edilmiştir. Ancak çalışmanın ikinci kısmında gerçekleştirilecek olan pasif kontrol yöntemlerinin geometrik değişiklikler gerektirmesi ve bu sebepten dolayı yapısal olarak ayrıklaştırmanın güçleşeceğinden ötürü yapısal ve yapısal olmayan ağ yapısı karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.4'te ortaya konulmuştur.



Şekil 3.4: Yapısal-Yapısal olmayan ağ yapısı OASPL kıyaslaması.

Her iki ağ yapısının bulundurduğu ağ noktası sayısı da $2,5 \times 10^6$ adet olup y^+ değerleri 200'dür. Şekil 3.2'de konuma bağlı OASPL grafiğinden de anlaşılabileceği üzere deneysel verilerle %2'lik (farkın en fazla fark olduğu nokta 3dB altındadır) gibi bir fark gösteren yapısal ağ yapısında olduğu gibi yapısal olmayan ağ yapısı da kabul edilebilir aralık içindedir. Yapısal olmayan ağ yapısına sahip hesaplama alanının, zamana bağlı kavite akış bölgesindeki basınç salınımları yardımıyla SPL-frekans spektrumu değerleri elde edilmiştir. Bu değerler Fourier Frekans Transformasyonu (FFT) uygulaması sonrası zaman alanından frekans alanına geçirilerek ortaya konulmuştur, Şekil 3.5. Deneysel çalışma ile aynı noktalara konumlandırılan (Şekil 2.7) dört farklı mikrofona yardımıyla akustik çıktının hesaplanması için veriler alınmıştır. Sonuçlar deney sonuçlarının elimizde olduğu ilk $1,5 \times 10^3$ Hz frekans değeri için karşılaştırılmıştır. Bu aşamadan sonra çalışmanın sonraki kısmı olan pasif kontrol yöntemlerinin uygulaması aşaması da dahil olmak üzere yapılan doğrulamalar ve karşılaştırmalar ışığında yapısal olmayan ağ yapısı kullanılmıştır.

Bir diğer doğrulama kriterimiz ise deney verilerine dayanarak, Rossiter tarafından akustik tonların frekanslarını tahmin etmek için geliştirilen, daha önceki bölümlerde bahsedilen, aşağıdaki ampirik formül ile modların frekans tahminini içerir [19].

$$f_m = \frac{U_\infty}{L} \frac{m - \alpha}{M_\infty + \frac{1}{K_v}}$$

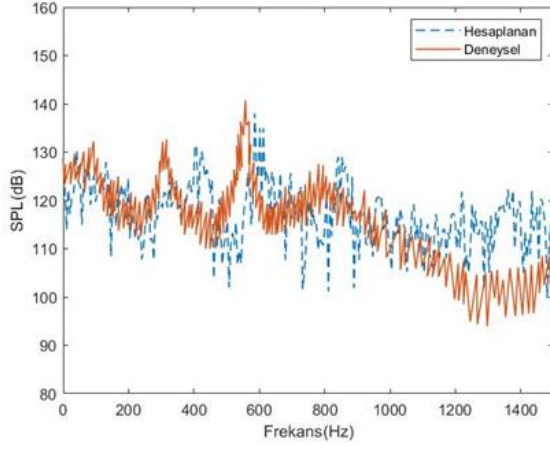
Burada U_∞ serbest akım hızını, M_∞ Mach sayısını, L kavite uzunluğunu ve m ise ilgili frekans mod indeksini göstermektedir. $\alpha = 0,25$ bir sabittir ve kesme tabakası çarpması ile arka kavite duvarının ucundaki akustik dalga emisyonu arasındaki faz gecikmesini yansıtmaktadır. $K_v = 0,57$ da bir başka sabittir ve ortalama girdap yayılım hızının serbest akış hızına oranını gösterir. Deneysel veriden gelen, Rossiter denklemi ile hesaplanan ve sayısal sonuçların yardımıyla elde edilen tonal mod frekanslarının karşılaştırılması çizelge 3.2’de listelenmiştir.

Çizelge 3. 2: Farklı modların frekans değerleri.

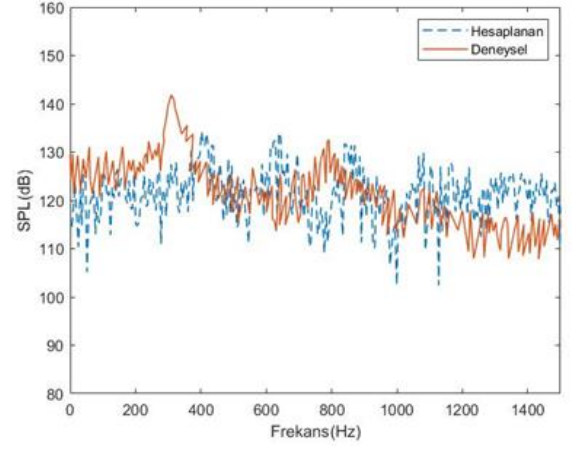
Modlar	Mod-1	Mod-2	Mod-3	Mod-4
Deney	135	350	590	820
Rossiter	157	368	578	789
Sayısal Çözüm	140	410	621	845

Tablodaki deneysel mod değerleri deneysel grafiklerin pik noktalarından elde edilmişken, sayısal çözümde kasıt ise bu çalışmada elde edilen SPL grafiklerinin pik noktalarını ifade etmektedir. İlk dört modun frekanslarının tümü birbiriyle iyi uyum göstermektedir. Mevcut kullandığımız IDDES türbülans modeli yaklaşımı ve yapılan çözüm alanı ayrıklaştırması kabul edilebilir gözükmektedir.

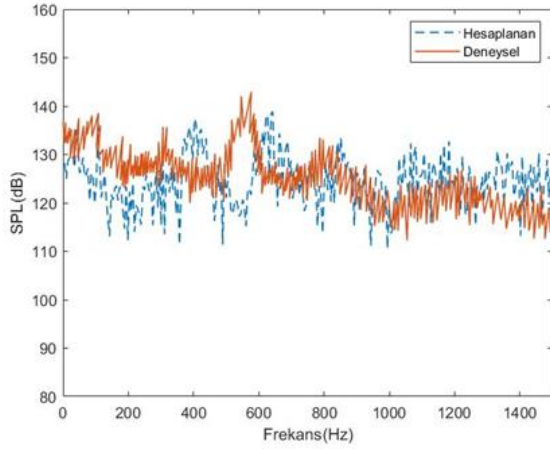
Deneyde kavitenin alt duvarı boyunca eşit olarak dağılmış on tane mikrofona yardımıyla dalgalanan basınç örnekleri kaydedildi. Dört konumdaki (k21, k24, k26 ve k28) ses basıncı seviyeleri (SPL) Şekil 3.5’te gösterilmektedir. Burada numaralandırma deneydeki ile aynıdır.



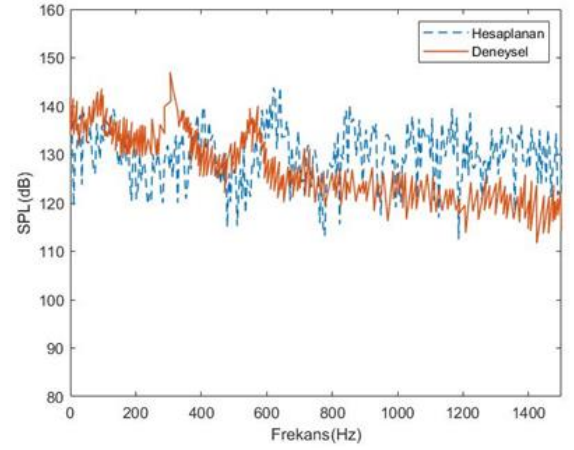
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.5: (a) Mikrofon k21, (b) Mikrofon k24, (c) Mikrofon k26, (d) Mikrofon k28 SPL-Frekans değerleri.

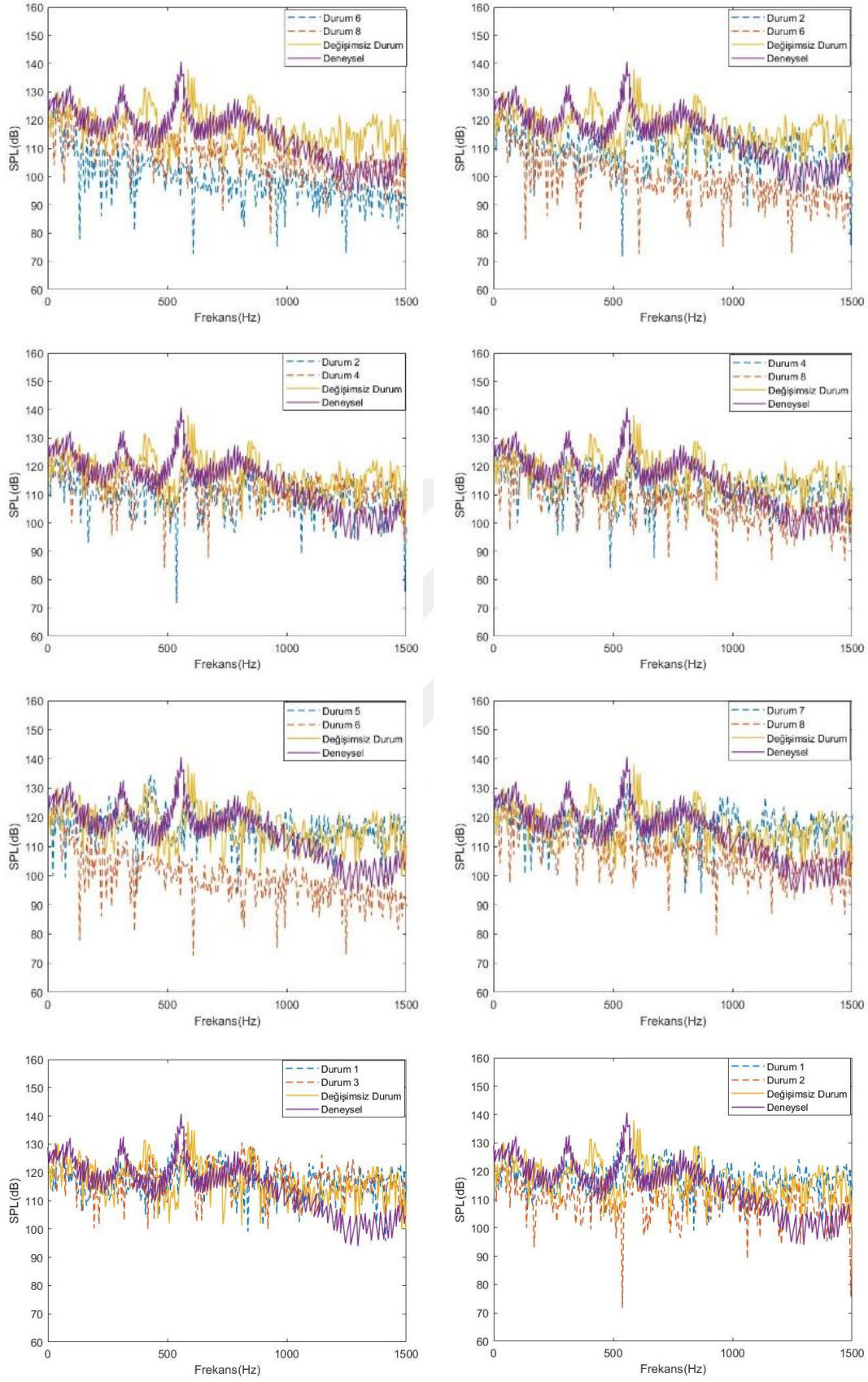
Sayısal çözümümüz, yüksek frekansta biraz fazla tahmin etse de geniş bir frekans aralığında deneyle iyi uyum sağladığı görülmektedir. Ölçümler ve sayısal sonuçlar arasındaki basınç dalgalanmasının gücünü yansıtan OASPL karşılaştırması Şekil 3.4'te sunulmaktadır. Yine sayısal yaklaşımımız, ölçümlerle çok iyi uyuşmaktadır ve maksimum fark 3 dB'den azdır. Kavite geometrisi üzerinde değişiklik yapılmamış transonik kavite akışı çözümleri ile aynı koşullarda elde edilen deneysel sonuçlar kıyaslanmış ve kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu doğrulanmıştır.



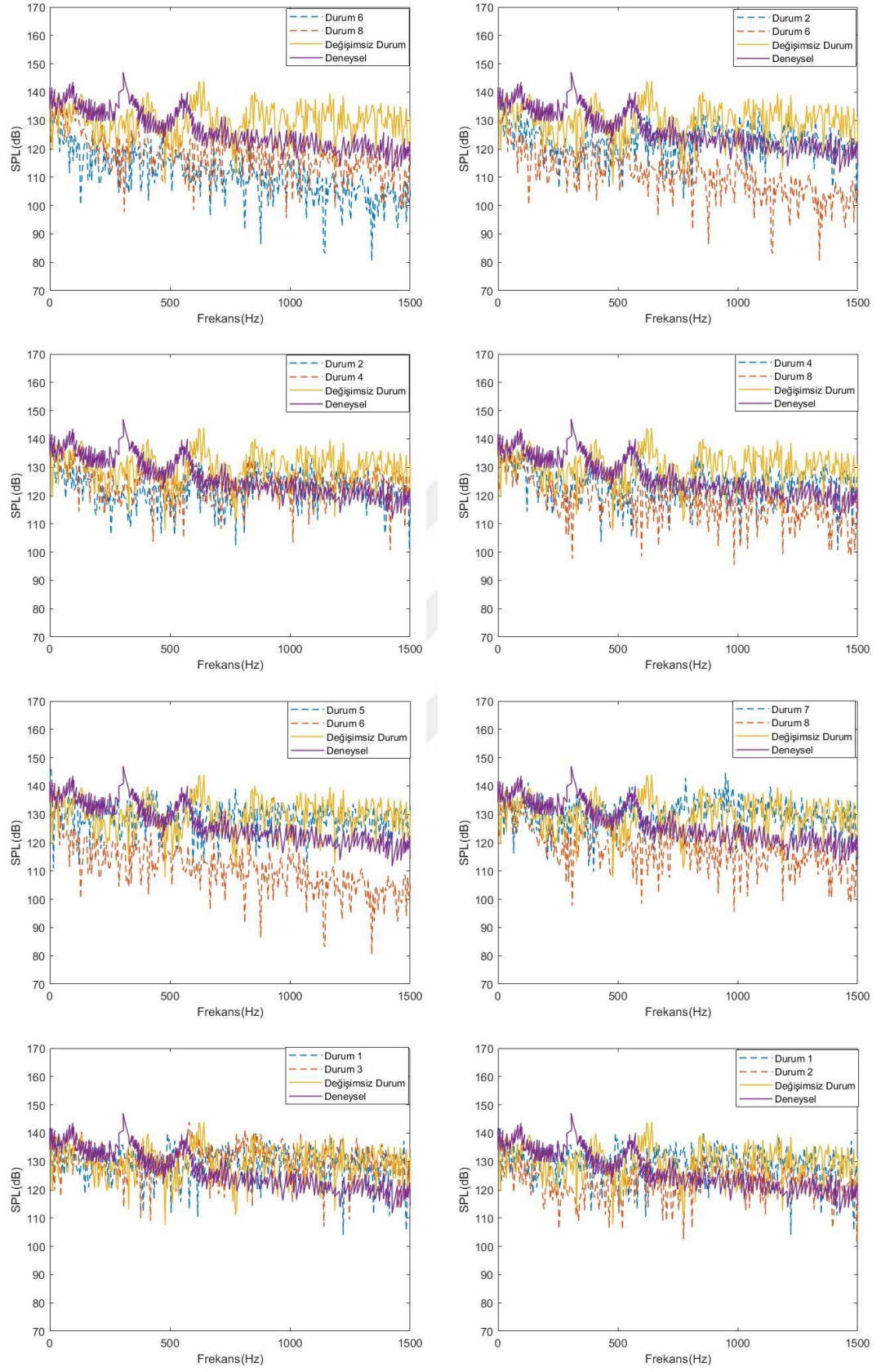
4. PASİF KONTROL YÖNTEMİ UYGULAMARI VE BULGULARI

Çalışmanın bu aşamasında mevcut akış alanı 16 farklı durum için incelenmiş, bu durumlardan elde edilen sonuçlar deneysel verilerle ve doğrulaması yapılmış değişikliğe uğramamış kavite geometrisi çözümü ile karşılaştırılmıştır. Bu bölümde sunular veriler k21 ve k29 mikrofonlarından sağlanan çıktılarla oluşturulmuştur. Burada değişim içermeyen durum olarak isimlendirilen durum geometrik değişime uğramamış kavite geometrisinin sayısal çözümüne karşılık gelmektedir. Bu çıktılar ağdan bağımsızlık çalışmaları göz önünde bulundurularak kabul edilen yapısal olmayan ağ yapısı için 2.5×10^6 nokta sayısından en fazla %1 fark gösterecek şekilde ayrıklaştırma yapısı ile elde edilmiştir. Bu sonuçlar elde edilirken kavite geometrisinin taban boyu uzunluğu sabit kalacak şekilde çizelge 2.2 ve çizelge 2.3'te belirtilen değişiklikler ön ve arka duvarlara uygulanmıştır. Aeroakustik etkinin belirlenmesi için basınç değişimi örnekleme frekansı olarak deneysel verilerin de kısıtı çerçevesinde 1500 Hz olacak şekilde kaydedilmiştir. Hesaplamalarda zaman adımı olarak ağdan bağımsızlık ve doğrulama çalışmalarında olduğu gibi 2×10^{-5} s tanımlanmıştır.

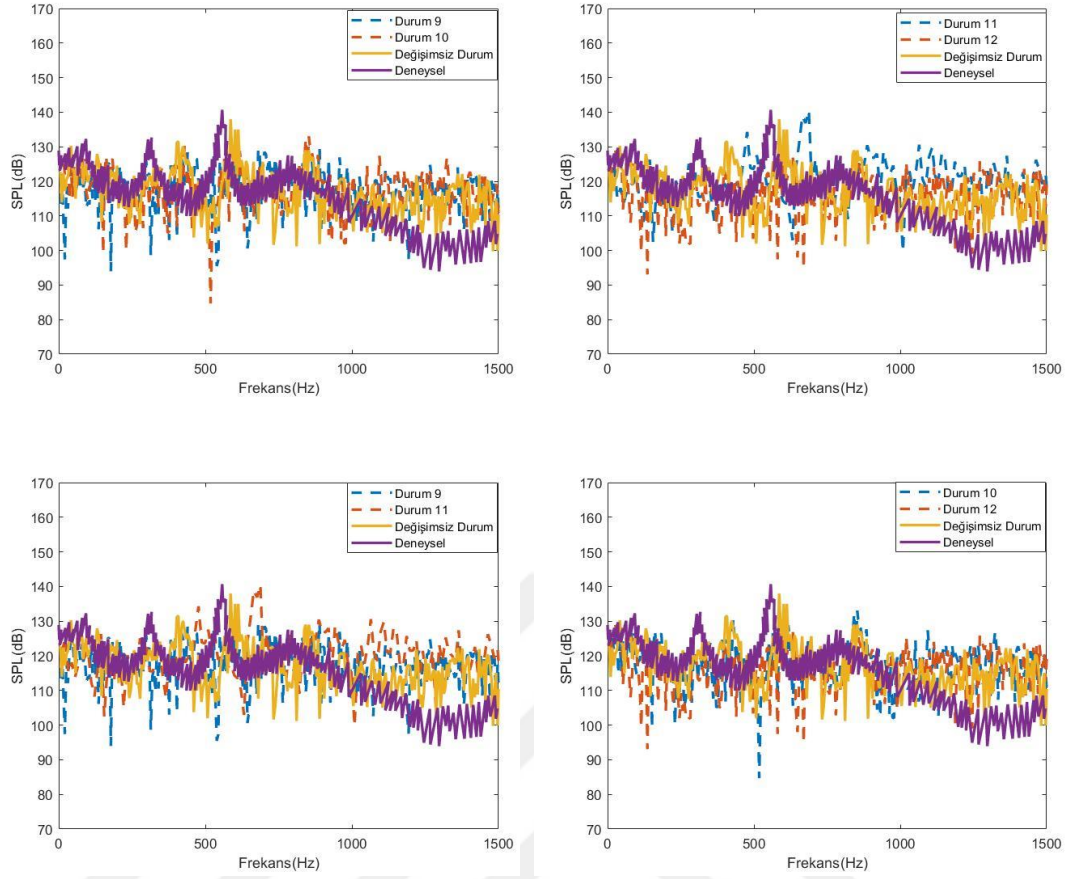
Mikrofon k21 kavite ön duvarından $x/L = 0.15$ oranında uzakta olan mikrofondur. İlk aşamada Şekil 4.1'de kavite geometrisine uygulanan farklı eğimlerden oluşan değişimlerin ardından elde edilen sayısal sonuçların SPL-Frekans değerleri mikrofon k21 için gösterilmiştir. Bu durumlar ilk sekiz durumdan oluşmaktadır (bakınız çizelge 2.2). Kavite başlangıcından olan uzaklık ve kavite boyu oranı $x/L = 0.85$ konumuna yerleştirilen k28 mikrofonu için elde edilen bulgular ise Şekil 4.2'de verilmiştir. Benzer şekilde ilk etapta k21 mikrofonunun kıyaslamasını içeren şekil 4.1'de olduğu gibi, şekil 4.2'de de ilk sekiz durum için kıyaslama k28 mikrofondan alınan verilerle oluşturulmuştur. Diğer mikrofonlardan alınan veriler k21 ve k28 mikrofon verileri ile karakter açısından paralel sonuçlar vermektedir.



Şekil 4.1: Mikrofon k21 için ilk 8 durumda SPL-Frekans değerleri kıyaslaması.

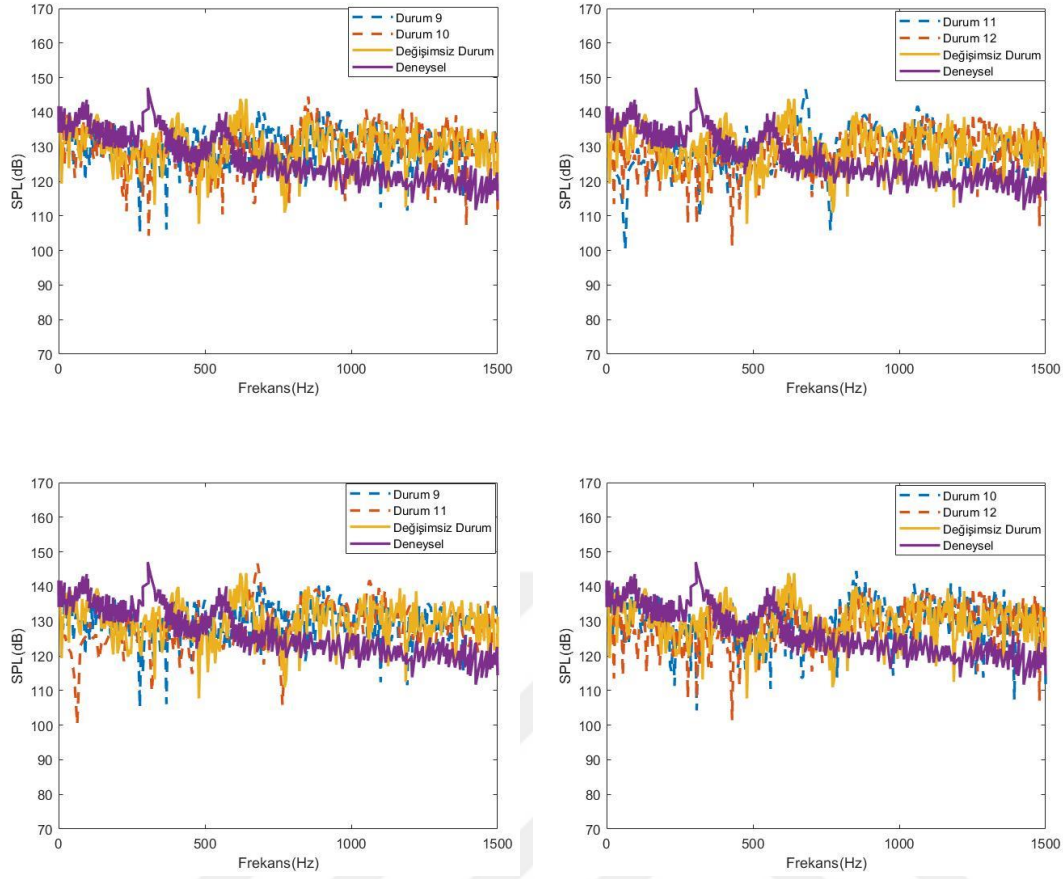


Şekil 4.2: Mikrofon k28 için ilk 8 durumda SPL-Frekans değerleri kıyaslaması.



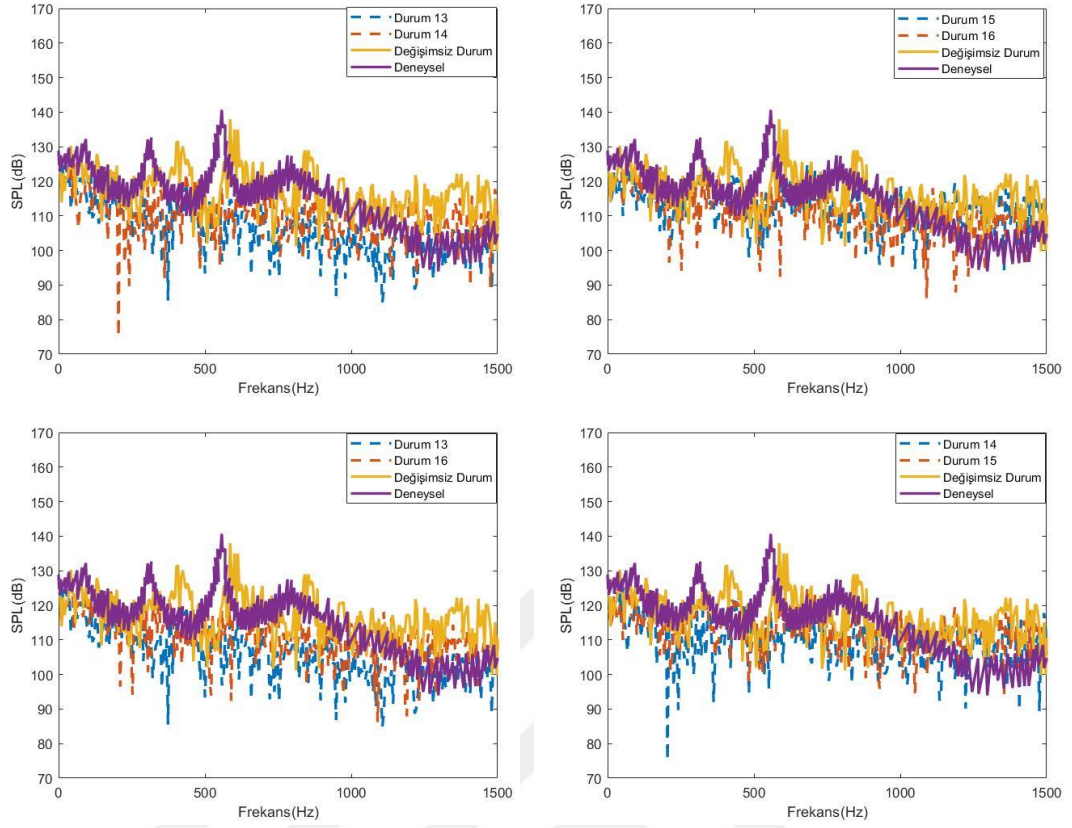
Şekil 4.3: Mikrofon k21 kavite ön duvarları kısaltılması durumları SPL kıyaslaması.

Durum 9 ve durum 12 arası SPL-Frekans spektrumları incelendiğinde, hem kavite ön duvarına yakın k21 mikrofonu hem de kavite arka duvarına yakın k28 mikrofonu değerleri için benzer sonuçlar çıkmaktadır. Kavite ön ve arka duvarlarında kesme yapmak, bir diğer ifadeyle duvarlarda kısaltmaya gitmek şekil 4.3 ve şekil 4.4'ten yola çıkarak genel olarak istenilen sonuçları vermediği söylenebilmektedir. Ses basınç seviyesinde istenilen düşüş sağlanamadığı gibi, yerel olarak yükseltici etkiler görülmektedir. Mevcut durumları birbirleri ile kıyaslayacak olursak, kavite arka duvarlarını kısaltma uygulanan durum 10 ve durum 12, kavite ön duvarlarına uygulanan durum 9 ve durum 11'e göre daha etkili sonuçlar vermektedir. Daha doğru ifadelerle arka duvar kesilmesi ön duvar kesilmesine göre ses basınç seviyelerinde daha düşük seviyelerde kalmıştır. Arka duvarda yapılan duvarın çeyreği ve duvarın yarısı kadar kısaltma işlemlerinden, arka duvar yarısının kısaltıldığı durum 12 daha düşük desibellerin tespit edildiği çalışma olmuştur. Ancak benzer durum ön duvara uygulanan aynı işlemlerde tam tersi etki göstermektedir.



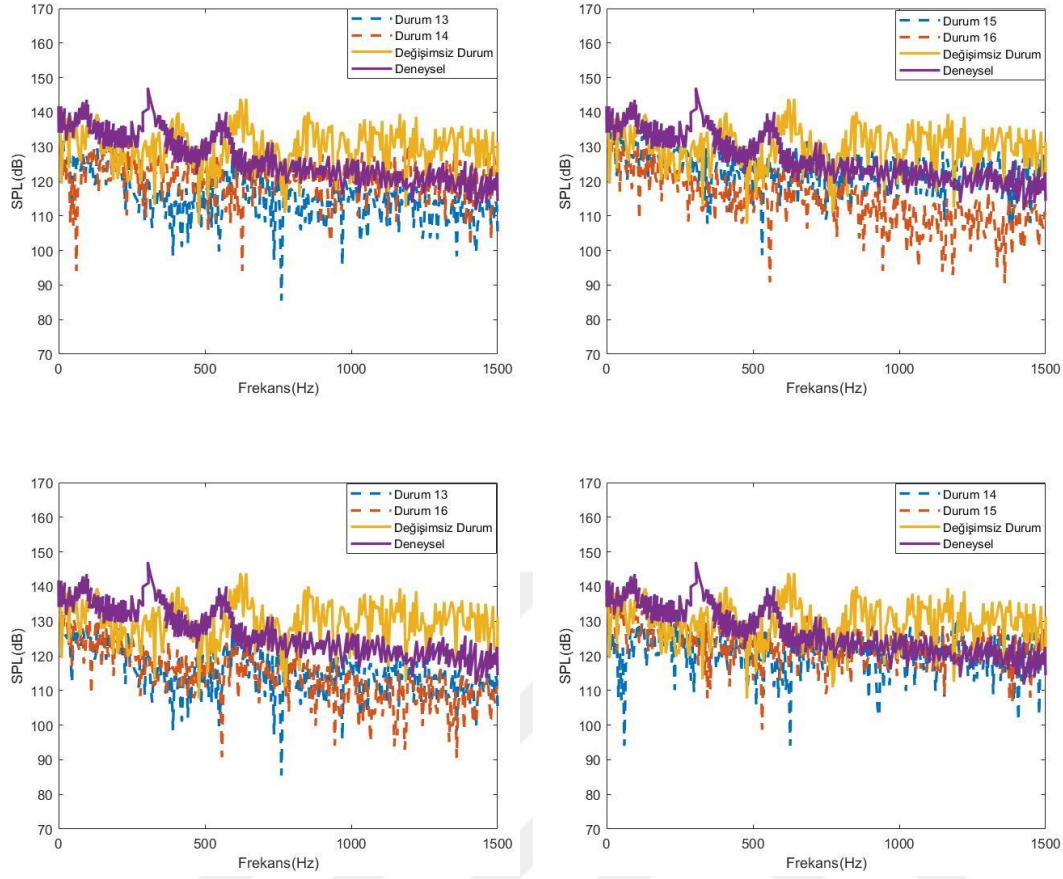
Şekil 4.4: Mikrofon k28 için kavite ön ve arka duvar kısaltılması durumları SPL-Frekans değerleri kıyaslaması.

Durum 13-14-15-16 arası uygulanan pasif kontrol yaklaşımları çizelge 2.3'te belirtildiği üzere kavite geometrisinde ön duvara başka bir kontrol yöntemi uygulanırken arka duvara başka bir değişiklik yapılarak yürütülmüştür. Şekil 4.5 ve şekil 4.6 da kavite geometrisine uygulanan bu 4 birleşik durum çıktıları sırasıyla k21 ve k28 mikrofonları için kıyaslanmıştır. Kavite arka duvarlarına verilen eğimler ilk 8 çalışmada etkili sonuçlar vermesi sebebiyle birleşik durumlarda kavite ön duvarlarına derinlik yönünde kısaltma işlemi yapılmışken arka duvarlara farklı derecelerde eğimler verilmiştir. Kavite ön duvarı 1 in ve 2 in olmak üzere iki farklı kısaltma işlemine maruz kalırken arka duvara verilen eğimler 60 derece olmak üzere kavite tabanından ve kavite arka duvar ortasından olacak şekilde yönetilmiştir.



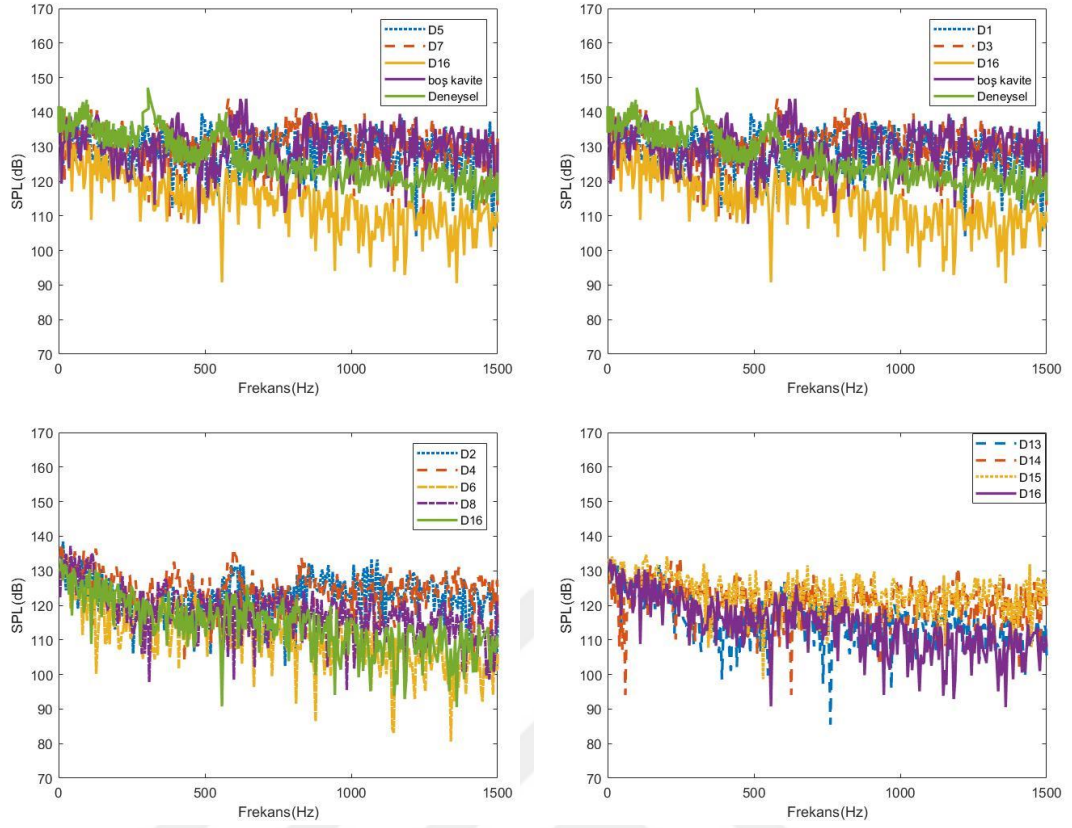
Şekil 4.5: Mikrofon k21 için birleşik durumlar SPL-Frekans değerleri kıyaslaması

Şekil 4.5 ve şekil 4.6'dan yola çıkarak birleşik durum ifadesi altında çizelge 2.3'te açıklanan, durum 13-14-15-16 durumlarının tamamının deneysel veriye ve üzerinde değişiklik yapılmamış kavite geometrisinden hesaplanan veriye göre olumlu sonuçlar verdiği söylenebilmektedir. Ön duvarın 2 in kesildiği durumlar olan durum 13 ve durum 14'e bakacak olursak arka duvar tabanından 60 derece eğimli olan durum 13 ses seviyesini düşürmede daha olumlu sonuçlar sunmaktadır. Bunun sebebi durum 14'te arka duvar yarım da olsa bulunuyorken, durum 13'te bulunmuyor olması olarak söylenebilmektedir. Benzer şekilde ön duvarın 1 in kesildiği durumlar olan durum 15 ve durum 16'da da arka duvar tabanından eğimli olan durum 16'nın daha etkili olduğu açıkça görülebilmektedir. Bu verilen bir kez daha arka duvar eğiminin ses basınç seviyesi değerini azaltmada etkili sonuçlar sunduğunu ortaya çıkarmaktadır. Arka duvar tabanından verilen 60 derecelik eğimlerle oluşturulan durum 13 ve durum 16'nın ön duvara uygulanan işlemleri sırasıyla 2 in ve 1 in kısaltma olarak uygulanmıştır. Sonuçlar birbirine oldukça yakın olmakla birlikte durum 16 daha etkili sonuçlar sunmaktadır.



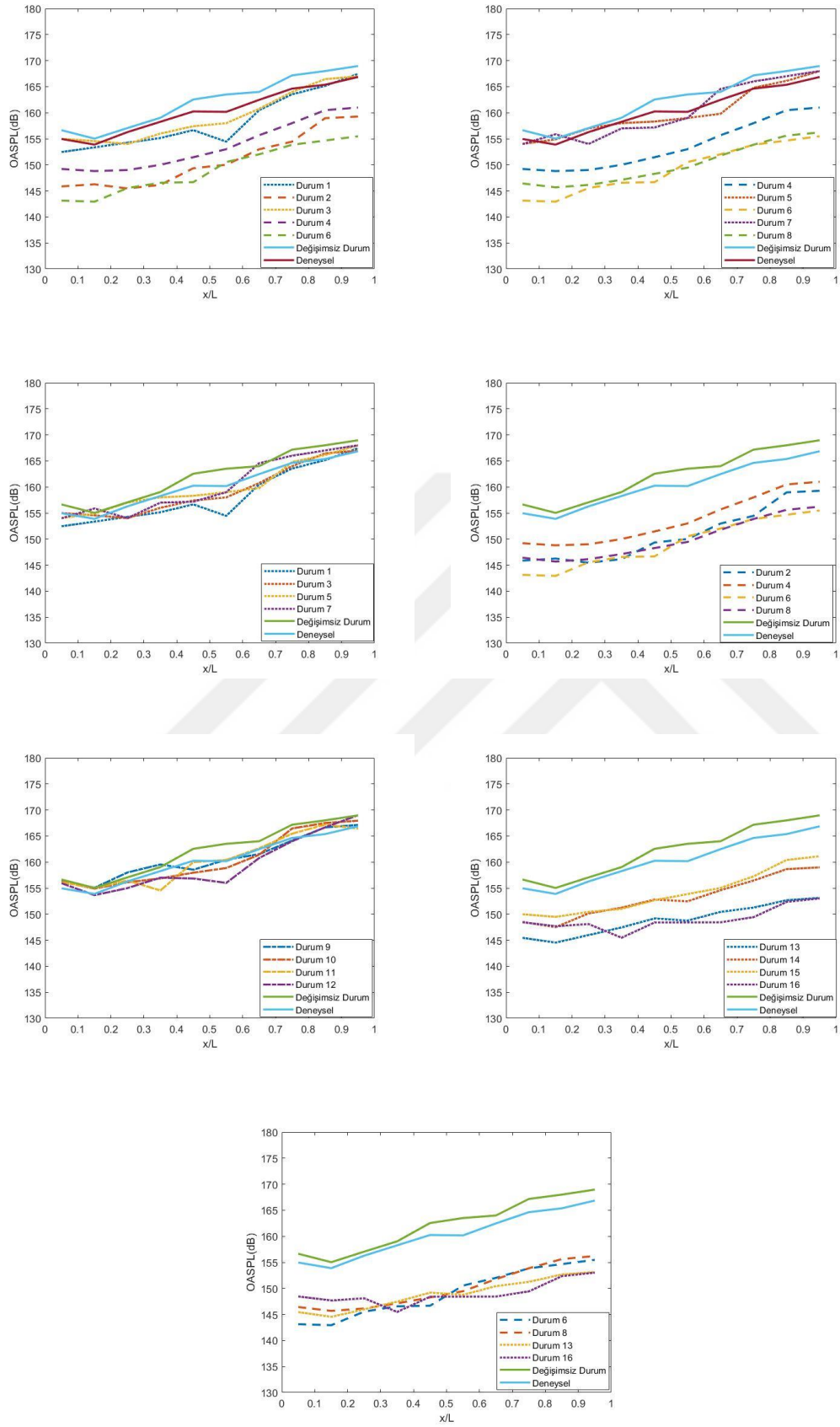
Şekil 4.6: Mikrofon k28 için birleşik durumlar SPL-Frekans değerleri kıyaslaması.

Bütün durumlar incelendiğinde şekil 4.8’de de görüldüğü üzere durum 16’nın en iyi sonucu verdiği ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.7’de durum 16’nın k28 mikrofonu SPL-Frekans spektrumunda diğer durumlarla kıyaslanması verilmiştir. Olumlu etki açısından sıralandığında durum 16’yı durum 13, durum 6 ve durum 8 izlemektedir. Bu dört durumunda ortak özelliği kavite arka duvarında tabandan itibaren uygulanmış olan eğimlerdir. Kavite ön duvarının 1 in kesildiği ve arka duvar tabanından 60 derece eğim verildiği olan durum 16’nın arka duvar tabanından uygulanmış olan eğimin bu azaltıcı etkinin büyük yükünü çektiği düşünülmektedir. Bu durumların ardından kavite arka duvarına uygulanan, duvar ortasından eğimli çalışmalar gelmektedir. Kavite tabanından verilen eğimler kadar olumlu etki gösterememe sebepleri tamamen kaybolmamış arka duvar yapılarının bulunması olarak düşünülmektedir. Kavite ön duvarına uygulanan pasif kontrol yöntemleri ve duvar kısaltma kontrol yöntemleri beklenen faydalı çıktıları vermediği SPL-Frekans spektrumlarında görülebilmektedir.



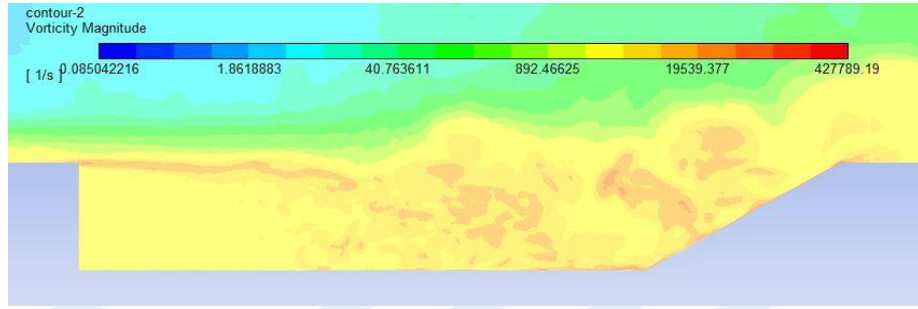
Şekil 4.7: Durum 16'ya ait mikrofon k28 için SPL-Frekans değerleri.

Genel itibariyle yalnızca kavite ön ve arka duvarlarında kısaltmaya gidilen durumların kavite geometrisinin oluşturduğu ses basınç seviyesinde azaltıcı yönde bir etki gösteremediği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu durumlar incelendiğinde, pasif kontrol yöntemi uygulanmamış durumla benzer karakter gösterdiği ve ses basınç seviyesinde istenilenin aksine yüksek frekanslarda artış gösterdiği gözükmemektedir. Kavite geometrisinin arka duvar boyu kısaltıldıkça az da olsa ses basınç seviyesinde azalmalar görülebilmektedir, şekil 4.3 ve şekil 4.4. Bununla birlikte aynı şartlar altında yapılan analizlerde, kavite arka duvarlarına uygulanan eğimlerle sağlanan kontrol yöntemlerinin, kavite ön duvarlarına aynı açılarla uygulanan kontrol yöntemlerinden daha olumlu etkiler yaptığı gözlemlenmiştir, şekil 4.1 ve şekil 4.2. Birleştirilmiş durumlarda ele alındığında, yine aynı şekilde kavite arka duvar eğiminin önemi ortaya çıkmaktadır. İncelemesi yapılan birleştirilmiş durumlarda kavite arka duvar tabanından ve kavite arka duvar ortasından verilen eğimlerin kavite ses basınç seviyesini düşürdüğü, kavite tabanından verilen eğimlerin daha etkili olduğu ortaya çıkmaktadır. Bütün durumlar ele alındığında SPL-frekans spektrumlarına göre en etkili sonuç kavite ön duvarının 1 in kesildiği ve kavite arka duvarının tabandan 60 derece eğimli olduğu durum 16 en iyi çözümü sunmaktadır.

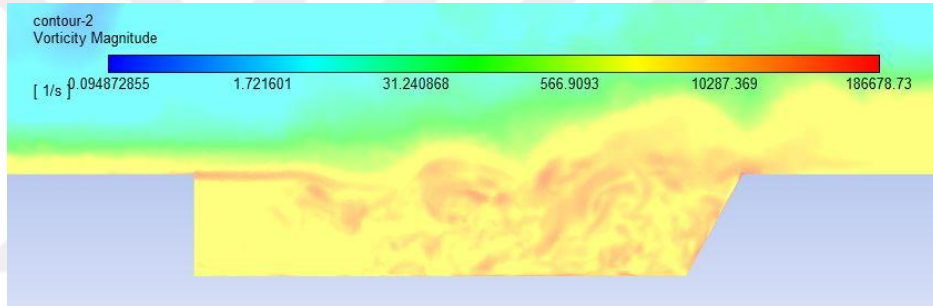


Şekil 4. 8: Bütün durumlar OASPL kıyaslaması

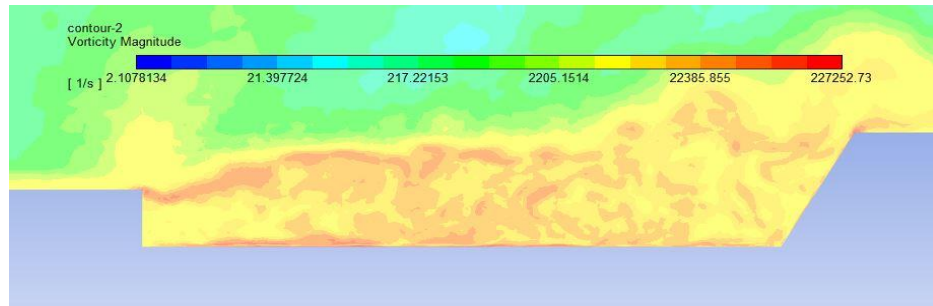
En iyi durumlar olarak ifade edilen durum 6, durum 8, durum 13 ve durum 16'nın üstünlüğü gerek SPL grafiklerinde gerekse şekil 4.8 de ifade edilen OASPL grafiklerinde açıkça gözükmemektedir. Bu durumların dördü de kavite akışında sesi azaltmak için kullanılmaya uygundur. Şekil 4.9'da bu durumlar için akış alanından elde edilen girdaplık konturlarında girdap oluşumu ve akım ayrılması gözükmemektedir.



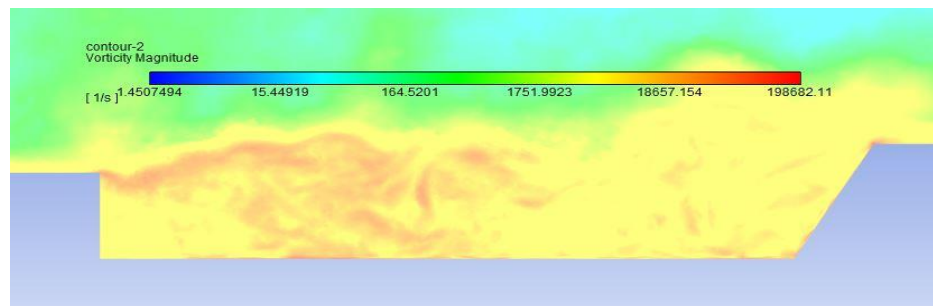
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4. 9: Girdaplık konturları a) durum 6, b) durum 8, c) durum 13, d) durum 16



5. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Transonik bölgede, 0.85 Mach sayısı için, ticari sonlu hacim çözücüsü Fluent kullanılarak hesaplamaları yapılan bu çalışmada, üç boyutlu kavite içinde oluşan basınç salınım yapılarına bağlı olarak akış-akustik alan etkileşimine dair önemli veriler elde edilmiştir. IDDES türbülans modeli akışı simüle etmek için uygulanmıştır. Ayrıntılı ölçümlerle deneysel anlamda geniş çapta belgelenmiş transonik kavite akışı, M219, mevcut sayısal yöntemler ve türbülans çözme modelinin verileri ile karşılaştırmak ve doğrulamak için kullanılmıştır. Mevcut yaklaşımın, kavite fiziğinin etkilediği akış alanında aerodinamik temelli ses oluşumu incelenmiş olup, deneysel verileri başarıyla yakalayabildiği gösterilmiştir. Hesaplardan elde edilen basınç numunesindeki frekans ve karakter özellikleri, deneysel sonuç ölçümleriyle iyi bir uyum göstermektedir. Bölüm 3'te bahsedildiği üzere çözüm yönteminin doğrulama çalışması Rossiter modları cinsinden, OASPL değerleri kıyaslamasından ve mikrofonlardan ayrı ayrı okunan SPL-Frekans çıktıları karşılaştırmaları sonucu ortaya konulmuştur. OASPL değerleri, ölçümler ve simülasyonlar arasında 3 dB'den daha az farklılık göstermektedir. Çalışmada kullanılan sayısal çözüm yönteminin doğrulanması, bu incelemenin ikinci bölümü olarak adlandırabileceğimiz kavite geometrisine uygulanan fiziksel modifikasyonları içeren pasif kontrol yöntemlerinin verdiği sonuçlara güvenebilmek adına son derece önemli bir husustur. Yapılan çalışmalar ilk etapta yapısal bir ağ örüntüsü ile başlamıştır. Temiz kavite geometrisi için, yani üzerinde hiçbir değişiklik yapılmamış kavite geometrisi için, yapısal ağ ayırıklaştırması sonuçları irdelenmiş ve aynı zamanda ağ sayısından bağımsızlık çalışması da gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda temiz kavite için akış alanını 2.5×10^6 nokta sayısında ayırıklaştırmak, deneysel verilerle uyum açısından tutarlı sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte daha yüksek ayırıklaştırma sayıları için de sonuçlar gayet olumlu olmasına rağmen zaman ve bilgisayar işlemci gücü gibi faktörleri göz önünde bulundurarak 2.5 milyon noktanın kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu saptanmıştır. Ağ sayısından bağımsızlık çalışması yapılmasından sonra ağ yapısının kalite açısından sorun teşkil etmemesi amacıyla y^+ değeri çalışması üzerinde durulmuştur. Yapılan çalışmalarda bulunan sonuçlar birbirine yakın çıkmıştır ve daha önceki çalışmalardan da yola çıkarak $y^+ = 200$ değerinde karar kılınmıştır. Bahsedildiği üzere çalışmanın sonraki kısmında uygulanacak pasif kontrol yöntemleri geometri değişiklikleri olarak tasarlanmıştır. Bunun yapısal olan ayırıklaştırmayı

etkileyeceği ve istenilen şekilde ağ yapısını kuramayacağımız öngörüsü üzerine yapısal ve yapısal olmayan ayrıklaştırma kıyaslaması yapılmıştır. Sonuçları etkileyebilir bir değişiklik olmaması ve ağ oluşumunun daha kolay gerçekleşmesi sebebiyle yapısal olmayan ağ yapısı ile yola devam edilmiştir.

Akabinde temiz kavite geometrisinden yola çıkılarak kavite geometrisine pasif kontrol yöntemi uygulamaları yapılmıştır. Çalışmanın bu kısmında, daha önceki bölümlerde ifade edilen ve nasıl olacağı açıklanan fiziksel değişiklikler, kavite ön ve arka duvarına eğimler tanımlanarak ve kavite ön duvarı ile arka duvarında kısaltmalara gidilerek, toplamda 16 farklı pasif kontrol yönteminin aynı koşullar altında kavite geometrisinin oluşturduğu aerodinamik temelli gürültüye etkisi üzerinde durulmuştur. Doğrulama çalışmasındaki sayısal yöntem ve deneysel çalışmadaki mikrofon konumları değiştirilmeden yeni durumlar için FW-H Akustik Analoji yaklaşımı ile akustik sinyalleri incelenmiştir. Bütün hesaplamalar göz önüne alındığı taktirde elde edilen veriler, mikrofonların tamamında benzer davranışlar sergilememektedir. Daha açık şekilde ifade edilecek olunursa mikrofon konumundan bağımsız olarak durumların oluşturduğu ses etkisi aynı kalmıştır.

Beklendiği üzere ön duvara yakın konumlandırılan k21 mikrofonundan alınan SPL değerleri ile arka duvara yakın konumlandırılan k28 mikrofonundan alınan verilerine göre 15 dB daha az olduğu saptanmıştır. Ayrıca kavite arka duvarına verilen eğimleri barındıran durumlar (Durum 2-4-6-8), kavite ön duvarına verilen eğimleri içeren durumlara (Durum 1-3-5-7) göre gürültü seviyesini düşürmede daha başarılı oldukları açıktır. Diğer sonuçlarla kıyaslandığında ön duvarın 1 ve 2 inç kesilip arka duvarın da ortasından vermiş olduğumuz eğimler, durum 14 ve durum 15, ses etkisinin azaltılmasında beklenen sonucu ortaya koymamıştır. Birleştirilmiş durumlar söz konusu olduğunda (Durum 13-14-15-16) içinde arka duvara verilen eğimleri de barındırdıkları için durum 2-4-6-8 durumlarına benzer şekilde ses oluşumunu azaltmada pozitif etki göstermişlerdir. Bu durumlar ses oluşumunda arka duvar etkisinin önemini, diğer bir ifade ile arka duvara çarpan akışın daha fazla gürültüye sebep olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar arka duvara eğim verilerek gürültü seviyesini azaltılabileceği sonucuna varmamızı sağlamaktadır. Ön duvara verilen eğimler düşük frekanslarda iyi sonuçlar verse de yüksek frekanslarda ses değerini arttırıcı etki yaptığı gözlemlenmiştir. Bütün durumlar irdelendiğinde en kötü sonuçları kavite ön duvarına verilen 30 ve 60 derecelik eğimlere sahip olan durum 5 ve durum 7'nin verdiği, en iyi sonucu ise iki farklı kontrol yönteminin birleşimi olan kavite ön

duvar 1 inç boyunca kesildiği ve arka duvar tabanından 60 derece eğim verildiği durumun (Durum 16) sağladığı söylenebilmektedir. Durum 16 verileri çalışmanın en önemli sonucu olarak dikkat çekerken, yaklaşık 13 dB'lik bir aerodinamik temelli gürültü seviyesindeki azaltıcı yönde çalışıyor olması bu hususta uygulanan kontrol yöntemleri arasında öne çıkmasını sağlamaktadır. Genel itibariyle aerodinamik temelli gürültüyü azaltıcı yönde etki gösteren durumların tamamında arka duvar eğim etkisinin önemi açığa çıkmaktadır.

Bu tezde zamanın ve maliyetin çalışmalara limit koymasından ötürü analizlerin zamanları ve ağ ayrıklaştırmaları belirli şekillerde kısıtlanmıştır. Bu araştırmanın devamı niteliğinde üç boyuttaki analizlerde ağ ayrıklaştırmalarının geliştirilmesi yapıp farklı türbülans modelleri ile incelenebilir. Bu sayede farklı türbülans modellerinin akustik alana etkisi net bir şekilde ortaya koymak olası olacaktır. Analizleri süreleri üzerinde uzatılmaya gidilerek deney verileri ile daha yakın ses basınç seviyesi değerlerinin elde edilmesine destek olabileceği düşünülmektedir. Kavite geometrisinin genişliğinin akustik etkisi araştırılması hedefi ile çeşitli genişliklerdeki kavite geometrilerini analizlerinin yapılması faydalı bir inceleme olabilir. Yapılan analizleri karşılaştırmak için sunulan IDDES türbülans modelinden farklı modellerle kavite geometrisinin ses etkisinin bu modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması doğrulanabilir.

Bu tez kapsamında analizlerde uygulanan pasif kontrol yöntemlerinden başka birçok pasif kontrol yöntemi bu tezin yöntemiyle test edilebilir ve karşılaştırılabilir. Buna ek olarak gelecek çalışmalara öneri olarak sunulabilecek aktif kontrol mekanizmasına değinecek olursak, kavite arka duvarı önüne yerleştirilen, açısal hareket eden ilk aşamada durgun olan ardından geri dönüşümlü kontrol mekanizmasından aldığı verilerle hareket edip arka duvarı eğimli hale getiren kapı mekanizması transonik ve süpersonik kavite akışları üzerine incelenmesi farklı yollar açan bir çalışma olabilir.

Bu tezin sonuçlarından biri, kullanılan hesaplamalı yöntemin, irdelenen farklı durumlarda olduğu gibi bu tezde yer verilmeyen pasif kontrol yöntemlerini de tahmin etme yeteneğine sahip olduğu sonucudur. Bununla birlikte depolu kavite, kapılı kavite vb. gibi çeşitli kavite konfigürasyonlarının akustik ortamını da belirlemede test edilebilir olduğu düşünülmektedir. Hesaplamalı modelin gücü, gerçek dahili silah bölmesi geometrilerini simüle etmek için uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır. Başka bir deyişle, bu tezde özetlenen yöntem, gerçek iç silah bölmesi geometrilerinin akustik ortamının simülasyonunda kullanılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **S. J. Lawson ve G. N. Barakos**, Review of numerical simulations for high-speed, turbulent cavity flows, *Progress in Aerospace Sciences*, cilt 47, 186–216, 2011.
- [2] **B. Podvin, Y. Fraigneau, F. Lusseyran ve P. Gougat**, A reconstruction method for the flow past an open cavity, 2006.
- [3] **S. Aradag**, A critical evaluation of numerical algorithms and flow physics in complex supersonic flows, 2006.
- [4] **ci**, Transonic aero-acoustics of weapon bays, 2017.
- [5] **L. Martin**, F-35B with Weapons Bay Doors Open, <https://bit.ly/44kFb7u> Erişim tarihi: 9 Mart 2021.
- [6] **Savunmasanayi.org**, <https://bit.ly/3JUWp33> Erişim tarihi: 2 Eylül 2022.
- [7] **L. Temmerman, B. Tartinville ve C. Hirsch**, URANS investigation of the transonic M219 cavity, 471–481, 2012.
- [8] **G. J. M. Loupy, G. N. Barakos ve N. J. Taylor**, Cavity flow over a transonic weapons bay during door operation, *Journal of Aircraft*, 55, 339–354, 2018.
- [9] **A. Hirschberg ve S. W. Rienstra**, An introduction to aeroacoustics, *Eindhoven university of technology*, 5600, 2004.
- [10] **ESDU**, Aerodynamics and Aero-Acoustics of Rectangular Planform Cavities. Part I: Time-Averaged Flow, 2004.
- [11] **N. Ozkurt, D. Sari, A. Akdag, M. Kutukoglu ve A. Gurarslan**, Modeling of noise pollution and estimated human exposure around İstanbul Atatürk Airport in Turkey, *Science of the Total Environment*, 482, 486–492, 2014.
- [12] **L. N. Cattafesta III, Q. Song, D. R. Williams, C. W. Rowley ve F. S. Alvi**, Active control of flow-induced cavity oscillations, *Progress in Aerospace Sciences*, 44, 479–502, 2008.
- [13] **B. Khanal, K. Knowles ve A. Saddington**, Computational study of cavity flowfield at transonic speeds, 701, 2009.
- [14] **S. Izawa, J. C. Lerner ve U. Boldes**, Active and passive control of flow past a cavity, *Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research*, 369–394, 2011.

- [15] **J. Malone, M. Debiasi, J. Little ve M. Samimy**, Analysis of the spectral relationships of cavity tones in subsonic resonant cavity flows, *Physics of Fluids*, 21, 055103, 2009.
- [16] **H. Chen, Q. Zhong, X. Wang ve D. Li**, Reynolds number dependence of flow past a shallow open cavity, *Science China Technological Sciences*, 57, 2161–2171, 2014.
- [17] **S. A. Syed**, Detached eddy simulation of turbulent flow over an open cavity with and without cover plates, 2010.
- [18] **E. B. Plentovich, R. L. Stallings Jr ve M. B. Tracy**, Experimental cavity pressure measurements at subsonic and transonic speeds. Static-pressure results, 1993.
- [19] **J. E. Rossiter**, Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds, 1964.
- [20] **M. B. Tracy**, Cavity unsteady-pressure measurements at subsonic and transonic speeds, cilt 3669, NASA, Langley Research Center, 1997.
- [21] **P. J. W. Block**, Noise response of cavities of varying dimensions at subsonic speeds, 1976.
- [22] **K. K. Ahuja ve J. Mendoza**, Effects of cavity dimensions, boundary layer, and temperature on cavity noise with emphasis on benchmark data to validate computational aeroacoustic codes, 1995.
- [23] **A. F. Charwat, C. F. Dewey Jr, J. N. Roos ve J. A. Hitz**, An investigation of separated flows-part II: flow in the cavity and heat transfer, *Journal of the Aerospace Sciences*, 28 513–527, 1961.
- [24] **S. D. Crook, T. C. W. Lau ve R. M. Kelso**, Three-dimensional flow within shallow, narrow cavities, *Journal of Fluid Mechanics*, 735, 587–612, 2013.
- [25] **M. B. Tracy**, Characterization of cavity flow fields using pressure data obtained in the Langley 0.3-meter transonic cryogenic tunnel, cilt 4436, National Aeronautics and Space Administration, Office of Management, 1993.
- [26] **H. C. Garner**, Drag of a rectangular planform cavity in a flat plate with a turbulent boundary layer for Mach numbers up to 3, part II: open and transitional flows, 2000.
- [27] **Cross Country**, 2021. <https://bit.ly/3O9Z4Zc> Erişim tarihi: 15 Aralık 2022.
- [28] **U. Afridi**, Numerical Simulation of turbulent flow Over a Cavity, 2012.
- [29] **J. Rossiter**, A preliminary investigation into armament bay buffet at subsonic and transonic speeds, *Royal Aircraft Establishment, TM AERO*, 679, 1960.

- [30] **J. E. Rossiter**, The effects of cavities on the buffeting of aircraft, *RAE Technical Memorandum No. Aero 754*, 1962.
- [31] **Kurn A. G. ve Rossiter, J. E.** Wind tunnel measurements of the unsteady pressures in and behind a bomb bay/canberra/(Wind tunnel measurements of unsteady pressures acting in and behind Canberra aircraft Bomb Bay), 1965. 23 P, 1965.
- [32] **C. W. Rowley, T. Colonius ve A. J. Basu**, On self-sustained oscillations in two-dimensional compressible flow over rectangular cavities, *Journal of Fluid Mechanics*, 455, 315–346, 2002.
- [33] **K. Atvars, K. Knowles, S. A. Ritchie ve N. J. Lawson**, Experimental and computational investigation of an ‘open’transonic cavity flow, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 223, 357–368, 2009.
- [34] **H. H. Heller, D. G. Holmes ve E. E. Covert**, Flow-induced pressure oscillations in shallow cavities, *Journal of sound and Vibration*, 18, 545–553, 1971.
- [35] **V. Thangamani, K. Knowles ve A. J. Saddington**, Effects of scaling on high subsonic cavity flow oscillations and control, *Journal of Aircraft*, 51, 424–433, 2014.
- [36] **B. Zafer ve F. Cosgun**, Aeroacoustics investigation of unsteady incompressible cavity flow, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31, 2016.
- [37] **C. K. W. Tam**, Computational aeroacoustics: an overview of computational challenges and applications, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 18, 547–567, 2004.
- [38] **M. J. Lighthill**, On sound generated aerodynamically I. General theory, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 211, 564–587, 1952.
- [39] **C. Wagner, T. Hüttl ve P. Sagaut**, Large-eddy simulation for acoustics, cilt 20, Cambridge University Press, 2007.
- [40] **N. Curle**, The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 231, 505–514, 1955.
- [41] **J. E. Ffowcs, Williams ve D. L. Hawkings**, Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 264, 321–342, 1969.
- [42] **W. L. Hankey ve J. S. Shang**, Analyses of pressure oscillations in an open cavity, *AIAA Journal*, 18, 892–898, 1980.

- [43] **O. Baysal ve R. L. Stallings Jr**, Computational and experimental investigation of cavity flowfields, *AIAA journal*, 26, 6–7, 1988.
- [44] **O. Aybay, M. Breuer ve L. He**, Large–Eddy simulation of three–dimensional cavity flow using a time–conservative finite–volume method, *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics VII: Contributions to the 16th STAB/DGLR Symposium Aachen, Germany 2008*, 2010.
- [45] **L. Larchevêque, P. Sagaut, T.-H. Lê ve P. Comte**, Large-eddy simulation of a compressible flow in a three-dimensional open cavity at high Reynolds number, *Journal of fluid mechanics*, 516, 265–301, 2004.
- [46] **H. Lai ve K. H. Luo**, Large-eddy simulation and control of cavity aeroacoustics, *Conference on Turbulence and Interactions TI2006, Porquerolles, France*, 2006.
- [47] **S.-H. Peng ve S. Leicher**, DES and hybrid RANS-LES modelling of unsteady pressure oscillations and flow features in a rectangular cavity, *Advances in Hybrid RANS-LES Modelling: Papers contributed to the 2007 Symposium of Hybrid RANS-LES Methods, Corfu, Greece, 17-18 June 2007*, 2008.
- [48] **S. A. Syed ve K. Hoffmann**, Numerical Investigation of 3-D Open Cavity with and Without Cover Plates, *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2009.
- [49] **S. J. Lawson, G. N. Barakos ve P. Nayyar**, Annex 18A: Appendix for test case A2-M219 cavity flow: computations with and without bay doors, 2009.
- [50] **Z. Ren, B. Wang, B. Hu ve L. Zheng**, Numerical analysis of supersonic flows over an aft-ramped open-mode cavity, *Aerospace Science and Technology*, 78, 427–437, 2018.
- [51] **K. Luo, W. Zhu, Z. Xiao, Z. Weng, L. Deng, D. Yang ve J. Liu**, Investigation of spectral characteristics by passive control methods past a supersonic cavity, *AIAA Journal*, 56, 2669–2686, 2018.
- [52] **A. C. Fadil ve B. Zafer**, Parallel aeroacoustic computation of unsteady transonic weapon bay using detached-eddy simulation via open computational fluid dynamics source codes, *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, e7675, 2023.
- [53] **S. Aradag, K. A. Gelisli ve E. C. Yaldir**, Effects of active and passive control techniques on Mach 1.5 cavity flow dynamics, *International Journal of Aerospace Engineering*, 2017.
- [54] **S. J. Lawson ve G. N. Barakos**, Assessment of passive flow control for transonic cavity flow using detached-eddy simulation, *Journal of aircraft*, 46, 1009–1029, 2009.

- [55] **J. Merrick ve M. F. Reeder**, Cavity-store interaction under supersonic freestream conditions, *33rd AIAA Applied Aerodynamics Conference*, 2015.
- [56] **K. M. Guleren, S. Turk, O. M. Demircan ve O. Demir**, Numerical Analysis of the Cavity Flow subjected to Passive Controls Techniques, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018.
- [57] **P. Nayyar, G. N. Barakos ve K. J. Badcock**, Analysis and control of weapon bay flows, *NATO RTO AVT-123 Symposium on Flow Induced Unsteady Loads and the Impact on Military Applications*, Budapest, 2005.
- [58] **S. V. Babu, G. J. M. Loupy, F. Dehaeze, G. N. Barakos ve N. J. Taylor**, Aeroelastic simulations of stores in weapon bays using Detached-Eddy Simulation, *Journal of Fluids and Structures*, 66, 207–228, 2016.
- [59] **S. V. Babu, G. Zografakis, G. N. Barakos ve A. Kusyumov**, Evaluation of scale-adaptive simulation for transonic cavity flows, *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*, 8, 106–124, 2016.
- [60] **A. M. Lamp ve N. Chokani**, Computation of cavity flows with suppression using jet blowing, *Journal of Aircraft*, 34, 545–551, 1997.
- [61] **G. J. M. Loupy ve G. N. Barakos**, Processing and analysis methods for transonic cavity flow, *Physics of Fluids*, 29, 076105, 2017.
- [62] **D. Bacci, A. J. Saddington ve D. Bray**, The effect of angle of attack on the aeroacoustic environment within the weapons bay of a generic UCAV, *Aerospace Science and Technology*, 93, 105315, 2019.
- [63] **P. K. Maurya, C. Rajeev, R. R. Vinil Kumar ve A. Vaidyanathan**, Effect of aft wall offset and ramp on pressure oscillation from confined supersonic flow over cavity, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68, 559–573, 2015.
- [64] **V. Thangamani**, Mode behavior in supersonic cavity flows, *AIAA Journal*, 57, 3410–3421, 2019.
- [65] **A. Malhotra ve A. Vaidyanathan**, Aft wall offset effects on open cavities in confined supersonic flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 74, 411–428, 2016.
- [66] **T. Gautam, G. Lovejeet ve A. Vaidyanathan**, Experimental study of supersonic flow over cavity with aft wall offset and cavity floor injection, *Aerospace Science and Technology*, 70, 211–232, 2017.
- [67] **D. Chin, K. Granlund, I. Maatz, R. F. Schmit ve M. F. Reeder**, Stochastic store trajectory of ice models from a cavity into supersonic flow, *Journal of Aircraft*, 56, 1313–1319, 2019.

- [68] **M. Barone ve S. Arunajatesan**, Pressure loadings in a rectangular cavity with and without a captive store, *Journal of Aircraft*, 53, 982–991, 2016.
- [69] **W. Xiansheng, Y. Dangguo, L. Jun ve Z. Fangqi**, Control of pressure oscillations induced by supersonic cavity flow, *AIAA Journal*, 58, 2070–2077, 2020.
- [70] **N. Zhuang, F. S. Alvi, M. B. Alkisar ve C. Shih**, Supersonic cavity flows and their control, *AIAA journal*, 44, 2118–2128, 2006.
- [71] **D. F. Long**, Spatial structure of cavity pressure fluctuations at transonic speeds, *AIAA journal*, 44, 1983–1992, 2006.
- [72] **A. J. Saddington, V. Thangamani ve K. Knowles**, Comparison of passive flow control methods for a cavity in transonic flow, *Journal of Aircraft*, 53, 1439–1447, 2016.
- [73] **L. Shaw, R. Clark ve D. Talmadge**, F-111 generic weapons bay acoustic environment, *Journal of Aircraft*, 25, 147–153, 1988.
- [74] **R. Chaplin ve T. Birch**, The aero-acoustic environment within the weapons bay of a generic UCAV, *30th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, 2012.
- [75] **C. Y. Huang, C.-Y. Yeh, Y.-F. Lin ve K.-M. Chung**, Global flow visualization of transonic cavity flow with various yaw angles, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 235, 1751–1762, 2021.
- [76] **A. D. Pierce ve R. T. Beyer**, *Acoustics: An introduction to its physical principles and applications. 1989 Edition*, Acoustical Society of America, 1990.
- [77] **ANSYS Fluent**, ANSYS fluent theory guide 15.0, ANSYS, Canonsburg, PA, 33, 2013.
- [78] **S. W. Rienstra ve A. Hirschberg**, An introduction to acoustics, *Eindhoven University of Technology*, 18, 19, 2004.
- [79] **W. K. George**, Lectures in Turbulence for the 21st Century, *Chalmers University of Technology*, 550, 2013.
- [80] **F. M. White**, Viscous Fluid Flow, McGraw Hill, Boston, MA, 1991.
- [81] **U. Piomelli**, Large eddy simulation lecture notes, *the von Karman Institute for Fluid Dynamics Lecture Series*, 2018.
- [82] **J. C. McWilliams**, Turbulent Flows : General Properties, 2017.
- [83] **T. L. Bergman, T. L. Bergman, F. P. Incropera, D. P. Dewitt ve A. S. Lavine**, Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley & Sons, 2011.

- [84] **P. Sagaut, S. Deck ve M. Terracol**, Multiscale and Multiresolution Approaches in Turbulence: A Comprehensive Introduction to Modern LES, DES and Hybrid RANS/LES Methods with Examples, Imperial College Press, 2013.
- [85] **A. C. Yunus**, Fluid Mechanics: Fundamentals And Applications (Si Units), Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2010.
- [86] **G. L. Brown ve A. Roshko**, On density effects and large structure in turbulent mixing layers, *Journal of Fluid Mechanics*, 64, 775–816, 1974.
- [87] **B. E. Launder ve N. D. Sandham**, Closure strategies for turbulent and transitional flows, Cambridge University Press, 2002.
- [88] **A. Favre**, Equations des gaz turbulents compressibles, *J. de Mecanique*, cilt 4, 1965.
- [89] **A. Favre**, Equations des gaz turbulents compressibles. 2. methode des vitesses moyennes methode des vitesses macroscopiques ponderees par la masse volumique, *Journal de mecanique*, 4, 391, 1965.
- [90] **P. Perrot**, A to Z of Thermodynamics, Oxford University Press on Demand, 1998.
- [91] **A. N. Kolmogorov**, Equations of turbulent motion in an incompressible fluid, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1941.
- [92] **F. R. Menter**, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA journal*, 32, 1598–1605, 1994.
- [93] **D. C. Wilcox**, *Turbulence Modeling for CFD*. 5354 Palm Drive, La Canada, California: DCW Industries, Inc, 1993.
- [94] **J. E. Bardina, P. G. Huang ve T. J. Coakley**, Turbulence modeling validation, testing, and development, 1997.
- [95] **C. Haigermoser, F. Scarano, M. Onorato, P. Torino ve T. Delft**, Investigation of the flow in a rectangular cavity using tomographic and time-resolved PIV, *Proceedings of ICAS 26th International Congress of the Aeronautical Sciences, Anchorage, AK*, 2008.
- [96] **P. R. Spalart**, Comments on the Feasibility of LES for Wings and on the Hybrid RANS/LES Approach, *Proceedings of the First AFOSR International Conference on DNS/LES, 1997*, 1997.
- [97] **C. Mockett**, A comprehensive study of detached eddy simulation, Univerlagtuberlin, 2009.
- [98] **M. Shur, A. Travin, P. R. Spalart ve M. Strelets**, The Delay of RANS-to-LES Transition in Hybrid RANS-LES Approaches and Some Recently Proposed Remedies, *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, 2016.

- [99] **P. R. Spalart**, Detached-eddy simulation, *Annual review of fluid mechanics*, 41, 181–202, 2009.
- [100] **U. Michel, D. Eschricht, B. Greschner, T. Knacke, C. Mockett ve F. Thiele**, Advanced DES methods and their application to aeroacoustics, *Progress in Hybrid RANS-LES Modelling: Papers Contributed to the 3rd Symposium on Hybrid RANS-LES Methods, Gdansk, Poland, June 2009*, 2010.
- [101] **F. R. Menter ve M. Kuntz**, Adaptation of eddy-viscosity turbulence models to unsteady separated flow behind vehicles, *The aerodynamics of heavy vehicles: trucks, buses, and trains*, 2004.
- [102] **M. L. Shur, P. R. Spalart, M. K. Strelets ve A. K. Travin**, A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities, *International journal of heat and fluid flow*, 29, 1638–1649, 2008.
- [103] **N. V. Nikitin, F. Nicoud, B. Wasistho, K. D. Squires ve P. R. Spalart**, An approach to wall modeling in large-eddy simulations, *Physics of fluids*, 12, 1629–1632, 2000.
- [104] **M. S. Gritskevich, A. V. Garbaruk, J. Schütze, F. R. Menter ve diğerleri**, Development of DDES and IDDES formulations for the $k-\omega$ shear stress transport model, *Flow Turbulence and Combustion*, 88, 431, 2012.
- [105] **L. Xiao, Z. Xiao, Z. Duan ve S. Fu**, Improved-delayed-detached-eddy simulation of cavity-induced transition in hypersonic boundary layer, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 51, 138–150, 2015.
- [106] **M. J. De ve C. Henshaw**, M219 cavity case, *Verification and validation data for computational unsteady aerodynamics. Tech. Rep. RTO-TR-26, AC/323 (AVT) TP/19*, 453–472, 2000.
- [107] **S. H. Peng**, M219 cavity flow, *DESider—A European Effort on Hybrid RANS-LES Modelling*, 270–285, 2009.
- [108] **M. E. Goldstein**, Aeroacoustics. Scientific and Technical Information Office, *National Aeronautics and Space Administration, USA*, 1974.
- [109] **M. D. Deshpande ve S. G. Milton**, Kolmogorov scales in a driven cavity flow, *Fluid dynamics research*, 22, 359, 1998.
- [110] **A. Najafi-Yazdi, G. A. Brès ve L. Mongeau**, An acoustic analogy formulation for moving sources in uniformly moving media, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 467, 144–165, 2011.
- [111] **J. M. Jordaan ve diğerleri**, Acoustic meta-atoms: An experimental determination of the monopole and dipole scattering coefficients, 2017.

- [112] **K. S. Brentner ve F. Farassat**, Analytical comparison of the acoustic analogy and Kirchhoff formulation for moving surfaces, *AIAA journal*, 36, 1379–1386, 1998.
- [113] **A. Tadamasa ve M. Zangeneh**, Numerical prediction of wind turbine noise, *Renewable energy*, 36, 1902–1912, 2011.
- [114] **K. S. Brentner ve F. Farassat**, Modeling aerodynamically generated sound of helicopter rotors, *Progress in aerospace sciences*, 39, 83–120, 2003.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Haydar İREY

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek lisans** : 2023, İstanbul Teknik Üniversitesi, Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı, Savunma Teknolojileri Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2019-2022 yılları arasında bir vakıf üniversitesi bünyesinde Araştırma Görevlisi olarak çalıştı.
- 2022 yılından itibaren Türk Havacılık ve Uzay Sanayii şirketinde Tasarım Mühendisi olarak görev almaktadır.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR:

- **İrey H., Zafer B.** 2023. M-219 Transonik Kavite Akışının Türbülans Modeli ve Ağ Yapısı Yönünden Aeroakustik İncelenmesi. *3rd International Symposium of Scientific Research and Innovative Studies (ISSRIS'23)*, 2023, Balıkesir, Türkiye.