

**LAZER ENERJİSİNİN SESÜSTÜ KAVİTE AKIŞINA ETKİLERİNİN
DÜŞÜK DERECELİ MODELLEME YARDIMI İLE SAYISAL ANALİZİ**

İBRAHİM YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2013

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Necip Camuşcu
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığımı onaylarım.

Doç. Dr. Murat Kadri Aktaş
Anabilim Dalı Başkanı

İbrahim YILMAZ tarafından hazırlanan LAZER ENERJİSİNİN SESÜSTÜ KAVİTE AKIşINA ETKİLERİNİN DÜşÜK DERECELİ MODELLEME YARDIMI İLE SAYISAL ANALİZİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Selin ARADAĞ
Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Murat Kadri AKTAş

Üye : Doç. Dr. Selin ARADAĞ

Üye : Doç. Dr. Çoşku KASNAKOĞLU

TEZ BİLDİRİMİ

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

İbrahim YILMAZ

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Selin ARADAĞ
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Aralık 2013

İbrahim YILMAZ

LAZER ENERJİSİNİN SESÜSTÜ KAVİTE AKIŞINA ETKİLERİNİN DÜŞÜK DERECELİ MODELLEME YARDIMI İLE SAYISAL ANALİZİ

ÖZET

Kaviteler üzerindeki yüksek hızlı akışlar, karmaşık, zamana bağlı değişen, anlaşılması zor bir akış alanı oluşturup, havacılık uygulamalarında pratik olarak önemli bir sorun teşkil eder. Bu karmaşık akışın içinde türbülanslı akış için tipik bir durum olan küçük ölçekli basınç dalgalanmaları ile frekans ve büyüklüğü kavite geometrisi ve dış akış özelliklerine göre değişen önemli miktarda rezonans da vardır. Bu tez kapsamında, kavite akış alanı içerisinde oluşan basınç değişimlerini azaltmak amacı ile aktif bir kontrol yöntemi olan lazer enerjisi bırakım yöntemi akışa sayısal olarak uygulanmıştır. Lazerin, enerji miktarı, yeri ve frekansı gibi önemli parametreler değiştirilerek akış üzerindeki etkileri incelenmiştir. Lazer enerjisinin etkilerini anlayabilmek amacı ile kavite alanından elde edilen ses basınç seviyeleri dağılımları karşılaştırılmıştır. Lazer enerjisi bırakımı ile kavite alanı içerisinde oluşan basınç dalgalanmalarında ciddi değişimler elde edilmiştir.

Kontrollü ve kontrolsüz akışların hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri sonucunda elde edilen çıktılarına Uygun Dikgen Ayrıştırma Yöntemi (DAY) uygulanmıştır. Akış içerisindeki baskın ve büyük yapıların mekansal bilgilerini içeren kipler ile zamana bağlı bilgilerini içeren kip genlikleri belirlenmiştir. Bu bilgiler kullanılarak sistemler için düşük dereceli modeller oluşturulmuştur. Kavite akışı ile ilgili verimli bir şekilde veri toplamak ve akışı kontrol etmek amacıyla sensörler ancak kavite yüzeylerine yerleştirilebilir. Bu amaç ile DAY, kavite yüzeylerinden elde edilmiş basınç verilerine uygulanarak, kontrol uygulamalarında veri alınmak üzere sensör yerleştirilmesi gereken noktalar belirlenmiştir.

Çalışma içerisinde ayrıca, kavite L/D (uzunluk/derinlik) oranları: 1, 3, 5.07, 7.6 ve 10 olan farklı sesüstü kavite akışı mekanizmaları DAY kullanılarak yorumlanmış ve karşılaştırılmıştır. Bu sayede L/D oranının kavite akış mekanizmasına olan etkileri ortaya koyulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Açık kavite akışı, Lazer enerjisi, Akış kontrolü, Uygun Dikgen Ayrıştırma, Süpersonik akış

University : TOBB University of Economics and Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Mechanical Engineering
Supervisor : Associate Professor Selin ARADAĞ
Degree Awarded and Date : M.Sc. – December 2013

İbrahim YILMAZ

**NUMERICAL ANALYSIS OF EFFECTS OF LASER ENERGY ON
SUPERSONIC CAVITY FLOW WITH HELP OF REDUCED ORDER
MODELLING**

ABSTRACT

High speed flows over open cavities can produce complex unsteady flow fields that are important practical concern in aerospace applications. These complex unsteady flow fields include both the small-scale pressure fluctuations typical of turbulent shear flows and a significant resonance, the frequency and amplitude of which depend on the cavity geometry and external properties. In this study, to decrease these pressure oscillations in the flow region, laser energy deposition method, which is an active flow control method, is applied numerically. The impacts of parameters as amount, frequency and location of laser energy are also examined. To understand the effects of laser energy, the sound pressure levels (SPL) observed in cavity region are compared to each other. As a result of laser energy deposition, several changes are observed in the pressure values and the oscillation mechanism in the flow.

Proper Orthogonal Decomposition (POD) method is applied to the results of computational fluid dynamics (CFD) simulations of the cases with controlled and uncontrolled cavity flow. The POD modes which include the spatial information and the modes amplitudes that include the temporal information of the large and dominant structures in the flow are specified. By using these parameters, reduced order models for the systems are obtained. To obtain correct and efficient cavity flow measurement for control purposes is an important process. Sensors can only be placed on the cavity surfaces for real time flow control. Optimum sensor locations are determined by application of POD to pressure values which are obtained from cavity surfaces.

The Proper Orthogonal Decomposition method is applied to the supersonic cavities with different length to depth (L/D) ratios of 1, 3, 5.07, 7.6, and 10. The results are explicated and compared with each other. The effects of L/D ratio on cavity flow mechanism are also presented.

Key words: Open cavity flow, Laser energy, Flow control, Proper Orthogonal Decomposition, Supersonic flow

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım sırasında, yardımları ve katkılarıyla bana yol gösteren, her konuda kıymetli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam Doç. Dr. Selin ARADAĞ' a ve bu tez çalışmamı değerlendiren, değerli jüri üyeleri, Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ ve Doç. Dr. Çoşku KASNAKOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

“Sesüstü Kavitelerde Lazer Enerjisi Yardımıyla Akış Modellemesi ve Kontrolü” adlı, TUBİTAK 110M539 nolu proje kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmaya maddi destek veren TUBİTAK' a ve bünyesinde çalışmalarımı gerçekleştirdiğim TOBB ETÜ' ye teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca fikirleriyle bana destek olan arkadaşlarım Ece ÖZKAYA'ya, Çağın GÜLENOĞLU'na, Çiğdem USTA'ya, Akın PAKSOY'a ve proje çalışma arkadaşım olan, analiz verilerini benimle paylaşan Ece AYLI' ya teşekkürlerimi sunarım. Verdiği maveni destek ile çalışmalarım sırasında beni motive eden, beni destekleyen, hayatıma farklı bir anlam katan Zeynep AYTAÇ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, hayatı boyunca çocuklarını herşeyin önünde tutan, her alanda destekleyen, hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan sevgili annem Feride YILMAZ'a ve babam Mustafa YILMAZ'a çok teşekkür ederim. Sevgili kardeşim İsmail YILMAZ' a ve sevgili abim Yusuf YILMAZ'a var olduklarından ve yanımda olduklarından dolayı çok teşekkür ederim.

İbrahim YILMAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xii
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Motivasyon.....	1
1.2. Literatür Taraması.....	3
1.2.1. Akış Kontrol Metotları ve Lazer Enerjisi Bırakımı ile İlgili Literatür Araştırması	4
1.2.1.1. Pasif Kontrol Teknikleri.....	4
1.2.1.2. Aktif Kontrol Teknikleri	6
1.2.1.3. Lazer Enerjisi ile Akış Kontrolü	12
1.2.2. Dikgen Ayırıştırma Yönteminin Kavite Akışına Uygulanması Üzerine Literatür Araştırması	21
1.3. Amaç	23
2. YÖNTEM.....	25
2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Sayısal Çözüm Yöntemi.....	25
2.2. Lazer Enerjisi Bırakım Yöntemi	25

2.2.1. Genel Bakış	25
2.2.2. Teorik Bilgi	26
2.3. Dikgen Ayırıştırma Yöntemi.....	27
2.3.1. Genel Bakış	27
2.3.2 DAY Yöntemi Teorisi ve Kavite Akışına Uygulanışı	28
2.4. Ard İşleme Yöntemleri.....	32
2.4.1. Ses Basınç Seviyelerinin Hesaplanması.....	32
2.4.2. Ters Uzaklık Ağırlıklı İnterpolasyon Yöntemi	32
3. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI VE BULGULAR	34
3.1. Lazer Enerjisi Bırakımının İki boyutlu Kavite Akışına Etkileri ve Çeşitli Parametrelerin Değerlendirilmesi	34
3.1.1. Farklı Lazer Enerji Büyüklüklerinin Değerlendirilmesi	36
3.1.2 Farklı Lazer Enerji Bırakım Konumlarının Etkileri.....	39
3.1.3. Farklı Frekans Değerlerinin Etkileri	41
3.1.4. Lazer Bırakım Süresinin Etkileri	46
4. UYGUN DİKGİN AYRIŞTIRMA YÖNTEMİ SONUÇLARI.....	51
4.1. L/D Oranı 5.07 Olan Kavite Akışının DAY Sonuçları	52
4.2. L/D Oranı 5.07 Olan Kavite Akışının Kontrollü DAY Sonuçları ve Kontrolsüz Sonuçlar İle Kıyaslanması.....	57
4.3. Akış Kontrolü Amaçlı Sensör Yerleştirme Çalışmaları.....	60
4.4. Farklı L/D Oranlarına Sahip Sesüstü Kavite Akışlarının DAY Sonuçları.....	65
5. SONUÇLAR VE YORUMLAR	68
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	77

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Test koşulları [31]	16
Çizelge 1.2. Kesişen şoklar için oluşturulmuş model parametreleri [31]	17
Çizelge 4.1. $L/D=5.07$ Kavite, DAY kipleri enerji içerikleri	53
Çizelge 4.2. Kontrollü ve kontrolsüz DAY sonucu kip sayıları ve enerji içerikleri	58
Çizelge 4.3. Lazersiz kavite, kiplerin enerji içerikleri ve minimum, maksimum noktaları	62
Çizelge 4.4. Lazerli kavite, kiplerin enerji içerikleri ve minimum, maksimum noktaları	63
Çizelge 4.5. Karar verilen sensör yerleri	64
Çizelge 4.6. Farklı kavite akışlarını temsil edebilmek için gerekli kip sayıları	65
Çizelge 4.7. Tüm konfigürasyonlar için elde edilmiş kiplerin enerji içerikleri	67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Kavite akış mekanizması	2
Şekil 1.2. Lazer etkileşimli gaz yapısında meydana gelen değişim şeması [27]	12
Şekil 1.3. Üç modelin hız akım çizgilerinin karşılaştırılması a) Model-1, b) Model-2 ve c) Model-3 [27]	13
Şekil 1.4. Enerji bırakımı sonrasında etkileşimden önceki basınç alanı(solda) ve sonraki basınç alanı(sağda), a) 151mJ, b) 333mJ, ve c) 666mJ [29]	15
Şekil 1.5. Lazer etkileşimli düzenli yansımadan mach yansımasına geçiş, $M=5$ [35]	19
Şekil 1.6. Lazer etkileşimli mach yansımadan düzenli yansımaya geçiş, $M=3.5$ [35]	19
Şekil 3.1. Lazer bırakılan bölgede oluşan plazma (Sıcaklık Konturu)	34
Şekil 3.2. Lazer bırakım işleminin akış şeması	35
Şekil 3.3. Basınç verisi toplanan noktalar	36
Şekil 3.4. Kavite alt duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımı (1mJ, 5mJ, 10m ve 100mJ ve lazersiz)	37
Şekil 3.5. Kavite arka duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımı (1mJ, 5mJ, 10mJ ve 100mJ, lazersiz)	38
Şekil 3.6. Kavite ön duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımı (1mJ, 5mJ, 10mJ ve 100mJ, lazersiz)	38
Şekil 3.7. Lazer bırakımı gerçekleşen konumlar	39
Şekil 3.8. Kavite arka duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımı (Farklı lazer bırakım konumları)	40
Şekil 3.9. Kavite arka duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımı (Farklı frekans değerleri)	42
Şekil 3.10. Kavite alt duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımları (31110 Hz-lazer ile lazersiz karşılaştırma)	43
Şekil 3.11. Kavite arka duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımları (31110 Hz-lazer ile lazersiz karşılaştırma)	43

Şekil 3.12. Kavite ön duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımları (31110 Hz-lazer ile lazersiz karşılaştırma)	44
Şekil 3.13. Kavite arka duvarı, $y/D=0.6$ konumu, basınç dalgalanmaları (lazerli-lazersiz karşılaştırma)	45
Şekil 3.14. Güç-frekans grafiği, lazerli ve lazersiz karşılaştırma	46
Şekil 3.15. Kavite alt duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımları (12-18. periyot arası ile 18-24. periyot arası karşılaştırma)	47
Şekil 3.16. Kavite arka duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımları (12-18. periyot arası ile 18-24. periyot arası karşılaştırma)	47
Şekil 3.17. Kavite ön duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımları (12-18. periyot arası ile 18-24. periyot arası karşılaştırma)	48
Şekil 3.18. Kavite alt duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımları (12-18. periyot arası ile 12-24. periyot arası karşılaştırma)	49
Şekil 3.19. Kavite ön duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımları (12-18. periyot arası ile 18-24. periyot arası karşılaştırma)	49
Şekil 3.20. Kavite arka duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımları (12-18. periyot arası ile 18-24. periyot arası karşılaştırma)	50
Şekil 3.21. Kontrollü ve kontrolsüz durum için basınç dalgalanmaları (12-24. periyot arası)	51
Şekil 4.1. Kiplerin Sahip Oldukları Enerji İçerikleri ve Toplamı ($L/D=5.07$)	52
Şekil 4.2. $L/D=5.07$, Kavite akışı DAY kipleri	54
Şekil 4.3. Orijinal ve DAY sonucu 4 kip ve 12 kip kullanılarak yeniden yapılandırılmış x-hız konturları	55
Şekil 4.4. $L/D=5.07$, Kavite akışı, zaman katsayıları geçmişi	56
Şekil 4.5. Kontrollü ve kontrolsüz durum için DAY kiplerinin enerji içerik toplamı	57
Şekil 4.6. Kontrollü ve kontrolsüz durum için DAY kiplerinin karşılaştırması	59
Şekil 4.7. Kontrollü ve kontrolsüz durum için zaman katsayıları karşılaştırması	60
Şekil 4.8. $L/D=5.07$, kavite geometrisi ve koordinatlar	61
Şekil 4.9. Sensör konumları	64
Şekil 4.10. L/D oranına bağlı olarak kip sayılarındaki değişim	66

KISALTMALAR

Kisaltmalar	Açıklama
DAY	Uygun Dikgen Ayrıştırma Yöntemi
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
SPL	Ses Basınç Seviyeleri
MHD	Manyetohidrodinamik

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Sembol	Açıklama
α_{ik}	DAY kip genlikleri
C	Kovaryans matrisi
c_v	Sabit hacim altında özgül ısı değeri
$C(\vec{x}, \vec{x}')$	Korelasyon tensörü
D	Kavite derinliği
D_{ij}	i konumundan j konumuna olan uzaklık
ΔT	Sıcaklık farkı
ΔT_0	Maksimum sıcaklık farkı
e	Epsilon
E	Lazer enerji miktarı
G	Örnek konum sayısı
L	Kavite uzunluğu
λ	Öz değerler (kip enerji içerikleri)
M	Mach Sayısı
n	Ters uzaklık ağırlık derecesi
N	Toplam görüntü sayısı
Ω	İncelenen veri topluluğunun etkinlik alanı
p	Basınç değeri
\bar{p}	Ortalama basınç değeri
P_i	Konumun değeri
P_j	Örnek konumun değeri
$\phi(\vec{x})$	Temel fonksiyonlar
q	Ses basınç referans değeri
r	Yerel uzaklıklar

R	Tekil değer ayrıştırması sonrasında elde edilen dikgen matris
r_0	Lazerin başlangıç yarıçapının yarısı
ρ	Yoğunluk
S	Kip sayısı
Σ	Öz değer matrisi
t_f	Analiz bitiş zamanı
t_i	Analiz başlangıç zamanı
θ	Kenar açısı
u	Hız
\bar{U}	Ortalama veri topluluğu
$U_i(\vec{x})$	Kavite içi z-yönü hız veri topluluğu
$V_i(\vec{x})$	Ortalama değerden saplamaların bulunduğu hız veri topluluğu
W	Kavite genişliği
x	x yönü koordinat verisi
y	y yönü koordinat verisi

1. GİRİŞ

1.1. Motivasyon

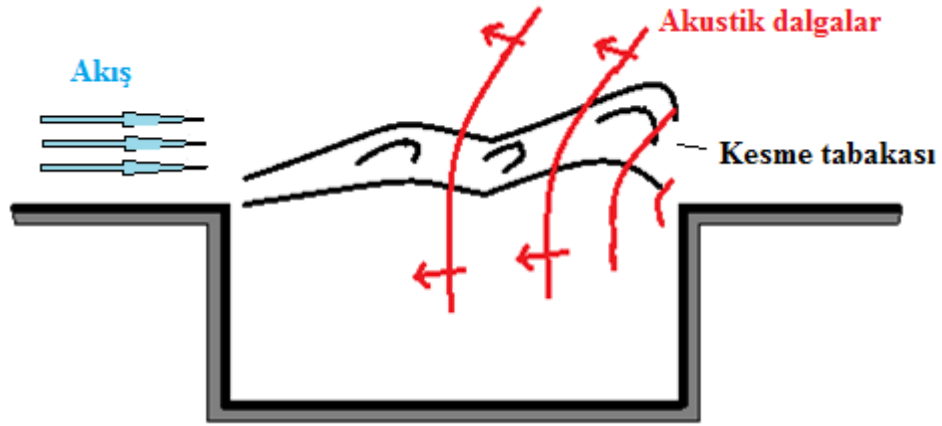
Düzensiz akış, akış alanı içerisinde tehlikeli etkileşimlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu etkileşimler, akış alanı içerisinde ve dışarısında daha teklikeli oluşumlara sebebiyet vermektedir. Düzensiz akışların ortaya çıkardığı en önemli olumsuz sonuçlardan biri kendi kendine gelişen salınımlardır. Bu basınç salınımları birçok uygulamada örneğin araba camları, araba açılı kapanır tavanları ve ya hava aracı uygulamalarında yüksek ses seviyeleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Daha da önemlisi hava aracı uygulamalarında ortaya çıkabilen yapısal zararların nedeni olabilmektedir. Bu nedenle akışın kontrol edilmesi ve özellikle bu tip uygulamalarda basınç salınımlarının indirgenmesi önemlidir. Basınç dalgalanmalarının oluşum gösterdiği ve birçok uygulaması olan kavite konfigürasyonları önemli bir akış kontrol problemidir.

Sesüstü (süpersonik) kavitelere akışın en önemli uygulaması savaş uçaklarının muhimmat atan bölümleridir. Uçaklarda muhimmat, uçağın içerisinde ve ya dışarısında tutulabilir. İçeride tutulması, kavite konfigürasyonları kullanarak modellenabilir. Muhimmatların içeride taşınması ve gerektiğinde bir kapak açılarak aşağı bırakılması, uçağın radara yakalanma riskini en aza indirir, aerodinamik yükü, sürüklemeyi ve aerodinamik ısınmayı azaltır. Dolayısıyla, içeride taşınan silahlar uçağın daha uzun süre havada kalmasını sağlar, manevra yeteneğini artırır, uçak daha hızlı gidebilir, hedef üzerinde daha az zaman harcar, bütün bunlar hava aracının daha uzun süre işini yapmasını sağlar.

Bütün bunların yanında, kaviteler üzerindeki yüksek hızlı akışlar, karmaşık, zamana bağlı değişen, anlaması zor bir akış alanı oluşturup, bu, havacılık uygulamalarında pratik olarak önemli bir sorun teşkil eder. Bu karmaşık akışın içinde türbülanslı akış için tipik bir durum olan küçük ölçekli basınç dalgalanmaları ile frekans ve büyüklüğü kavite geometrisi ve dış akış özelliklerine göre değişen önemli miktarda rezonans da vardır. Kavite üzerindeki akış yüzünden oluşan yoğun basınç

dalgalanmaları ile rezonansa sebep olan akustik modlar uçağın yapısına zarar verip başarılı olarak bomba atılmasını önleyebilir [1].

Bunun için öncelikle akışın tabiatının anlaşılması ardından da bu basınç dalgalanmalarının bir şekilde önüne geçilip, dalgalanmaların en aza indirilmesi gereklidir. Kavite konfigürasyonunun en basit hali Şekil 1.1’ de verilmektedir. Kesme tabakası düzensizliklerinden dolayı kavite içerisine kütle girişi ve çıkışı gerçekleşmektedir. Bu mekanizma Rossiter [2] tarafından dört ana basamakta açıklanmıştır. İlk olarak, girdaplar kavite ön köşesinde oluşur ve kavite arka duvar köşesinde kadar ilerler. İkinci basamakta ön duvarda oluşan girdaplar arka duvar köşesine çarparak akustik dalgaları oluşturur. Üçüncü basamakta bu akustik dalgalar ikiye ayrılır ve kavite dışına yayılan kısım akustik alanı oluştururken kavite içerisine yayılan girdap yapıları ise basınç dalgalarını oluşturur. Son basamakta kavite içerisine yayılan basınç dalgaları kavite ön duvarına çarpar ve yeni girdap oluşumunu tetikler [2].



Şekil 1.1. Kavite akış mekanizması

Kavite akışının düzensizliği akışın doğru olarak simülasyonlarının yapıp modellenebilmesini ve kontrol edilmesini gerektirir. Kavite akışı mekanizması ve kontrolü ile ilgili literatüre incelendiğinde birçok çalışmanın gerçekleştirildiği görülmektedir [3]. Çalışmalar sonucunda hala yeni tekniklerin irdelenmesi ve akışa uygulanması gerçeği geçerliliğini korumaktadır.

Bu çalışmada, akış uygulamalarında yeni yeni kullanılmaya başlanan ve bir aktif kontrol tekniği olan lazer enerjisi bırakım yönteminin sesüstü kavite akışına uygulanması ile akış içerisinde ortaya çıkarabileceği etkiler incelenmiştir. Bu yöntem iki boyutlu kavite akışına sayısal olarak uygulanmış ve lazer enerji bırakımını etkin kılabilmek amacı ile miktarı, frekansı, yeri, süresi gibi parametrelerin etkileri araştırılmıştır.

Kontrol amaçlı çalışmalarda sistemleri temsil eden veri topluluklarının karmaşıklığı ve çokluğu işlemleri zorlaştırmaktadır. Sistemleri daha basit ve düşük dereceli veri toplulukları ile yeniden ifade edebilmek amacı kullanılan Uygun Dikgen Ayırıştırma Yöntemi ile öncelikle, sesüstü kavite akış dinamiklerini daha ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Akışın kontrol edildikten sonra elde edilen sonuçlar ile kontrolsüz sonuçlar, Uygun Dikgen Ayırıştırma Yöntemi kullanılarak, ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Kontrol amaçlı olarak akışın kavite üzerinde en uygun hangi noktalara konulan sensörler vasıtasıyla doğru olarak ölçülüp modellenilebileceği saptanmıştır. En doğru şekilde konuları ele almak amacı ile öncelikle literatürdeki örnekler incelenmiştir.

1.2. Literatür Taraması

Kavite akışı kontrol tekniklerini tanımak ve uygulamalarını anlamak için öncelikle kavite akışı ile ilgili uygulamalar incelenmiştir. Lazer enerji bırakımı yeni bir akış kontrol tekniği araştırmasıdır. Bu nedenle literatürde lazer enerjisinin çeşitli akış problemlerine uygulanması üzerine olan çalışmalar dışında, kavite akışı üzerine uygulanması ile ilgili fazla çalışma yoktur. Dolayısıyla çeşitli enerji bırakım yöntemlerini içeren çalışmalar ile lazer enerjisinin değişik akış kontrol problemlerine uygulanması ile ilgili çalışmalar incelenmiştir.

1.2.1. Akış Kontrol Metotları ve Lazer Enerjisi Bırakımı ile İlgili Literatür Araştırması

Akışın kontrolü sayesinde ortaya çıkabilecek birçok avantaj vardır. Bunlar, hava araçları için sürüklemeye azalma ve kaldırma kuvvetinde yükselme, karışma konularında (hava-yakıt karışımları) iyileştirme, ısı transferinde artış ve akustik modlara etki ederek daha az seviyede ses düzeyine sahip akışlar elde edilmesi gibi birçok olumlu olgulardır. Akışı kontrol ederek avantajlı duruma geçmek için denenen ve üzerinde çalışılan birçok kontrol tekniği vardır. Bu kontrol teknikleri, aktif ve pasif kontrol teknikleri ana başlıkları altında toplanabilir.

1.2.1.1. Pasif Kontrol Teknikleri

Pasif kontrol teknikleri daha çok akış alanında kalıcı değişiklikler yaparak uygulanan yöntemlerdir. Akış alanının geometrisinin değiştirilmesi veya akış alanına konulacak engellerle akışta değişiklikler oluşturulması pasif teknikler içerisinde yer alır. Bu teknikler, pahalı olmayan ve birçok değişik mekanizma kullanılarak uygulanabilen örneğin; karıştırıcılar, girdap yaratıcılar veya geometride oluşturulacak eğimli yüzeyler vb.'dir.

Literatürde, akış kontrolü konusu içerisinde pasif teknikler kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Çalışma kapsamında yer almadığı için, çok fazla pasif kontrolün detayına girilmeden, yapılmış çalışmalardan aşağıda bahsedilecektir.

Lai ve Luo [4], çalışmalarında Large Eddy Simulation yöntemini kullanarak kontrollü hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Gözenekli duvar yapısı kullanılarak kavitede meydana gelen akışın duvarlardan girip çıkması sağlanmıştır. Bu değişim kavite bölgesi ve gözenekli duvar arasındaki lokal basınç farkına bağlı olarak gerçekleşmektedir. Bu sayede değişken olan akış kararlı hale yaklaşır, girdap şiddeti azalır ve gürültü emisyonu gerçekleşir. Bu çalışmada incelenen durum gözenekli duvar ile kavite arasında meydana gelen değişikliklerin gözlemlenmesidir. Kavite tabanı gözenekli yapı ile değiştirildiğinde ses basınç

seviyesi deęerleri dūřmektedir. Gōzenekli yan duvarlar en etkili gūrūltū sōnūmleme yōntemi olarak gōzlemlenmektedir. Gōzenekli yapı çarpıřmaları azaltmakta ve akıř sapmalarını sōnūmlenmektedir. Aynı řekilde basınç salınımları incelendięinde gōzenekli yapıda basınç genlięinin azaldıęı gōrūlmektedir. Basınç salınım oluřumunu engellenemesede gōzenekli yapı ile osilasyon frekansları azaltılmıřtır.

Mach sayısına baęlı olarak kavite akıřı deęiřiklikler gōsterir. Unalmıř vd. [5]' nin çalıřmasında, kesme tabakası dinamikleri ve kavite akustikleri arası farklılıkların gōzlemlenebilmesi amacı ile kavitenin ūst yūzeyi bir tabaka ile būyūk oranda kapatılmıřtır. Basınç ōlūmleri ūst yūzeyi kapatılan ve kapatılmayan iki ayrı durum için ōlūlmūřtūr. Çalıřmanın asıl amacı, ūst yūzeyin kapanması ile rezonans frekansların nasıl etkilendięinin tespitidir. Çalıřmada $L/D=6$, $W/D=3$ olarak alınmıřtır. Sınır tabakası kalınlıęı ve momentum kalınlıęı Mach sayısı 5 iken, 1.93 cm ve 0.076 cm, Mach sayısı 2 iken 1.3 cm, 0.09 cm'dir. Kavitenin ūst yūzeyinin %80'i kapatılmıřtır. Mach sayısı 2 iken SPL seviyeleri, Mach sayısının 5 olduęu durumdakinden yaklařık 15 dB daha fazladır. Dolayısıyla Mach sayısı dūřūkken daha fazla gūrūltū oluřmaktadır. Frekans deęerleri Rossiter formūlasyonu ile uyum içerisindedir. Mach sayısının 2 olduęu ve kavite ūst yūzeyin kapatıldıęı durumda kapalı-kutu akustik modeli ile uyum içerisindedir. Mach sayısı 5 iken ve kavite ūst yūzeyi kapatılmamıřken iki model ile uyum içerisinde ōlūmler elde edilmiřtir. Sonuçlara gōre kesme yūzeyi ve tabaka arasındaki baęlantı kesildięinde ōlūlen rezonans frekansları ile tahmini kapalı-kutu akustik model deęerleri uyum içerisindedir. Mach sayısı kaç olursa olsun kavite ūst yūzeyi kapatıldıęında kapalı-kutu modeli iře yaramaktadır.

Perng ve Dolling [6], Mach sayısı 5 olan bir kavite akışı için deneyler gerçekleştirmiş, hiper sonik akıştaki basınç dalgalanmalarının kavite geometrisinde yapılan değişiklikler ile değiştirilip değiştirilemeyeceğini denemişlerdir. Kavite alt duvarına konulan bir engel ile en gūlū salınım modları dahi azaltılmıştır.

Bu tekniklerin uygulanan yerde kalıcı olmaları yani mobil olmamaları ve sadece belirli akış koşullarında kullanılabilmeleri, değişik türde akış koşullarına adapte edilememeleri birer dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır [7].

1.2.1.2. Aktif Kontrol Teknikleri

Aktif kontrol teknikleri, sürekli değiştirilebilir ve farklı akış koşullarına adapte edilebilen tekniklerdir [8]. Aktif teknikler bu özellikleri nedeniyle, pasif tekniklere göre daha avantajlıdır. Ayrıca küçük boyutlu kontrol mekanizmaları içermeleri, lokal kontrol problemleri için önemli bir özelliktir. Bu teknikler, kontrol edilecek sisteme dışarıdan ekstra bir güç verme üzerine dayalıdır. Bu kontrol teknikleri, uygulanmaya başlanması ile kütle ekleme, mekanik harekete geçirme, akustik sürücüler, mikrojetlerin kullanımı vb. teknikler kullanılmaya başlanmıştır [7].

Bu tekniklerden kütle ekleme yöntemi üzerinde çok çalışma bulunan bir yöntemdir. Bueno ve diğerleri [9] tarafından yapılan çalışmada, kütle ekleme ile kontrol yönteminin Mach 2 akışına mazur bırakılan kavitede, ortalama basınç ve basınç dalgalanmaları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Uygulama, kavite başlangıç kenarına yerleştirilen altı adet yüksek frekanslı, palslı jet ile sağlanmıştır. Sürekli ve palslı kütle eklemesi çalışılmıştır. Farklı kavite uzunluk-derinlik oranlarında değerlendirmeler yapılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Sürekli kütle eklemenin uzunluk/ derinlik (L/D) oranının 5 olduğu durum dışında, kavitedeki ortalama basınç değerinde %8 gibi bir azalma görülmüştür.
- Daha uzun kavitelere kütle ekleme yönteminin daha etkili olduğu düşünülmüştür. Buna sebep olarak kütle eklemenin yarattığı düzensizliklerin daha fazla zaman kazanarak daha iyi büyüdüğüne ve kesme tabakasını etkilediği olasılığıdır.

- Ortalama basınç değerindeki düşüşün kavite geometrisine ve pals uzunluğuna göre değiştii görülmüştür. Kütle ekleme yönteminin uzun kavitelere daha etkin olduğu kanısına varılmıştır.
- Sürekli olmayan ve palslar şeklinde uygulanan kütle eklemede rezonans modlarının genliklerinde düşüş ortaya çıkmıştır. Fakat bu tarz kütle ekleme yönteminde, toplam ses şiddetinde artma ortaya çıkmaktadır.

Genel bir sonuç olarak, sürekli kütle yüklemenin, bölünmüş yüklemeye göre akustik tonlarda ve ses düzeyinde daha fazla düşüş sağladığı ortaya çıkmıştır.

Rizzetta ve Visbal [10], yüksek mertebede sayısal metotlar ile LES yöntemi kullanarak süpersonik kavite akışını incelemiştir. Mach sayısı 1.19 ve uzunluk-derinlik oranı 5 şartları incelenmiştir. Ses üstü kavite içerisindeki akış özellikleri elde edildikten sonra, aktif akış kontrolü olan, yüksek frekansta (5000Hz) palslı kütle enjeksiyonu yapılmadan ve yapıldıktan sonra kavite içerisindeki akış gözlemlenmiştir. Kavite üzerindeki kesme tabakasına enerji eklemenin sonucunda akustik bastırmanın oluştuğu görülmüştür. Enerji eklemesi, kesme tabakasını oluşturan girdapların karakteristiğini değiştirmiş ve dik doğrultuda kesme tabakası gezinmelerinin genliğinde azalmalar sağlamıştır.

Transonik hızlardaki açık kavitelere akış kontrolü için nümerik bir çalışma Hamed vd. [11] tarafından üç boyutta gerçekleştirilmiştir. Kavite üst kenar köşesinden kütle enjeksiyonu yapılmış ve nümerik sonuçlar elde edilmiştir. Akış alanı ve akustik alan hesaplanması için iki denklemlilikli türbülans modeli kullanılmıştır. Nümerik sonuçlar, ses basınç seviyeleri ve kinetik enerji spektrası olarak verilmiştir. Farklı enjeksiyon oranları için girdap, Mach sayısı, kinetik enerji konturları elde edilmiştir. Salınlı basınç değerleri farklı enjeksiyon oranları için elde edilmiş ve enjeksiyon oranının 0.6 olduğu durumda % 7.5, 0.9 olduğu durumda %10 oranında düşüş gözlemlenmiştir. Enjeksiyona bağlı olarak dominant frekans değeri 500 Hz değerinden 1050 Hz değerine kadar yükselmiştir. Tepe değerleri genlikleri 0.6 enjeksiyon oranı için 8 dB, 0.9 enjeksiyon oranı için 12 dB düşmüştür. Mach sayısı

konturları incelendiğinde enjeksiyon oranı arttıkça oluşan şok güçlenmekte ve kavitede ilerlemektedir.

Kütle ekleme yanında mikrojetlerin de kullanımı akış kontrolünde özellikle de kavitede oluşan akışın kontrolü amaçlı kullanılabilir avantajlı bir yöntem olarak görülmüştür. Mikrojetlerin, kavitede oluşan dalgalanmaların kontrolündeki verimliliği, küçük, sağlam ve düşük kütle akışı ile yüksek momentum akışı üretebilme yetenekleri avantajları olarak sayılabilir [12]. Zhuang vd. [12], sesüstü mikrojetlerin kontrol amaçlı kullanımı üzerinde çalışma yapmıştır. Kavite başlangıç noktasına yerleştirilmiş mikrojetler ile Mach sayısı 2 ve uzunluk-derinlik oranı 5.19 olan kavitede akış kontrol edilmiştir. Çalışma sonucunda mikrojetlerin aktive edilmesi ile beraber kavite tonlarının genlik değerlerinde 20 dB ve toplam ses basıncı değerinde 9 dB üzerinde bir düşüş olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, kütle yüklemesi kavite içerisindeki akışın kararsızlığını azaltmıştır.

Zhuang vd. [12], L/D oranı 5 iken beş farklı tip dalga gözlemlenmiştir. İlk olarak, sıkışma ve genişleme dalgaları, ikinci olarak; büyük ölçekli yapıdan kaynaklanan sıkışma dalgaları üçüncü olarak; kavis şokları, dördüncü olarak; kavite üstü dalgalanmalar ve son olarak; kavite içi basınç dalgalanmalarıdır. Bu durum göstermektedir ki alınan her görüntüde iki tane büyük ölçekli yapıda kavite içi dalgalanmaları ve iki tane kavite dışı akustik dalgalanma gözlemlenmektedir. Benzer dalgalanmalar L/D oranının 3 olduğu durum içinde gözlemlenmiştir. Zhuang vd. [13] diğer bir çalışmada, L/D oranının 1, 2, 3 ve 5 olduğu durumlar için irdeleme yapmıştır. Kavite akışına L/D oranının etkisi ve mikrojet kontrolünün etkilerini tartışmışlardır. Bu çalışma göstermektedir ki; kavitede derinliğe bağlı olan bir geçiş söz konusudur. L/D=1’de sadece 4.tip dalgalanmalar gözlemlenirken; L/D=3’de tip 4 ve tip 5 dalgalanmaları gözlemlenmektedir. En sık olan L/D=5.1’de ise sadece tip 5 gözlemlenmektedir. L/D oranı 1’den 5.1’e doğru değişirken L/W oranı da 1.5’den 5.9’a doğru değişmiştir.

Pratikte, bu tarz aktif yöntemlerde kullanılan mekanik aparatların, verimliliği önemli bir konudur ve konuyla ilgili bazı dezavantajları vardır. Ayrıca, bu sistemlerin

kurulumunda bazı zorluklar olması ve kurulan sistemlerin güvenilirliklerinde sıkıntılarının olması, buzlanma gibi koşullarda verimlilikleri ile ilgili tereddütlerin olması farklı kontrol sistemlerinin ele alınmasında etkilidir [14].

Bu aktif yöntemlerin dışında, akışa enerji bırakımı ile kontrol edilmesi yöntemleri üzerinde çalışılmaktadır. Enerji bırakımı yöntemi, plazma arklar, mikrodalgalar ve lazer gibi çeşitli enerji kaynakları ile sağlanmaktadır. Bu yöntemlerin avantajı, elektronik olarak kontrol edilebilir, hızlı bir şekilde değişik koşullara adapte edilebilir ve gerçek zamanlı kontrolün temelinde yatan, hızlı cevap alma işlemini gerçekleştirebilir olmalarıdır [15].

Literatürde farklı koşullarda enerji bırakımının akış yapısı üzerindeki etkisini gösteren çalışmalar yapılmıştır. Knight vd. [16] tarafından aerodinamik akış kontrolünde enerji bırakım yöntemleri üzerine bir araştırma yapılmıştır. Çalışmanın birinci bölümünde ideal gaz üzerine uygulanan enerji bırakımının önemli fiziksel etkileri araştırılmış, ikinci bölüm ise üç ana başlık altında; aerodinamik akış kontrolü, şok yapısındaki modifikasyonlar ve Manyeto hidrodinamik (MHD) kontrol olmak üzere uygulamaları verilmiştir. İki ve üç boyutlu akış için enerji eklenmesi modellenmesi üzerine değişik koşullar için çalışmalar yapılmıştır.

Aerodinamik akış kontrolü, sürüklenme, kaldırma ve moment etkileşimlerinin kontrolünü kapsamaktadır. Sürüklenme etkisini kontrol etmek üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Levin ve Terent'eva [17], sesüstü hızlar ve sıfır atak açısı altında, koni üzerinde sürekli simetrik enerji bırakımının etkilerini araştırmışlardır. Yuriev vd. [18], NACA 0012 kanat profili yüzeyinin yanında, $0.8 \leq M_{\infty} \leq 0.9$ için sürekli enerji bırakımını araştırmıştır. Bu çalışmada kullanılan Euler simülasyonu sonucunda sürüklenme %25 oranında azaltılabilmektedir. Aerodinamik alanda değişik geometri ve akış profilleri için kontrol çalışmaları devam etmektedir.

Enerji eklenmesinin şok yapısı üzerindeki etkileri üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar genel olarak, enerjinin verileceği bölge, şok dalgaları üzerinde enerjinin etkisi ve enerji bırakımını gerçekleştirebilmek için kullanılacak

deneysel metotlar başlıkları altında toplanabilir. Bu alanda çalışmalara örnek olarak, Golyatin vd. [19]' nin çalışması verilebilir.

MHD kontrol yani manyetohidrodinamik kontrol, enerji bırakımı yönteminden ayrı olarak sistemde ekstra bir kuvvet oluşturmaktadır. Bu da sadece enerji bırakımı yapan yöntemlere göre avantaj sağlamaktadır. MHD kontrol temelinde 1950 yıllarından beri çalışılan bir konudur. Bu yönteminin sürüklemeye etkisi ile ilgili Pogie ve Gaitonde [20] bir çalışma sunmuşlardır.

Miles [15], yüksek hızlarda enerji yüklemesi ile akışın kontrol edilmesi üzerine enerji kaynağı çeşitlerini kullanarak çalışma yapmıştır. Çalışmanın temelinde hava araçlarının performansının, etrafındaki akışı kontrol ederek artırılması bulunmaktadır. Çalışmada üç farklı konsept oluşturulmuştur. Biri lazer ve elektron ışını ile kontrollü mikrodalga ile enerji eklemesi, diğeri elektron ışını ile enerji eklemesi, sonuncusu ise megahertz oranlı akustik enerji eklenmesidir. Hava aracın ön kısmına lazer ve elektron ışını ile kontrollü mikrodalga ile enerji eklemesinde amaç sürüklemeyi azaltmak ve hızlı bir şekilde aracın yönlendirilmesini sağlamak yani manevra kabiliyetini artırmaktır. Elektron ışını ile enerji eklemesi ile yapılmak istenen, MHD güç çıkarma ve güç ekleme uygulamaları için efektif bir şekilde yüksek hızlı hava içerisinde iletimi yaratmaktır. Akustik enerji eklenmesi ise sınır tabakaların yüksek frekanslı akustik karışıklıklardan etkilenmesini çalışmak ayrıca geçiş ve ayrılma olaylarını kontrol edebilme kapasitesini anlamak için denenmiştir.

Knight vd. [21], 23 tür ve 238 reaksiyon sonucunda, mikrodalga enerji bırakımı için gaz dinamik modeli oluşturmuşlardır. Model, etrafından Mach 2 değerinde ses üstü akış geçen bir silindir için uygulanmıştır. Ayrıca mikrodalgadan dolayı oluşan plazmanın silindir tarafından oluşturulan küt cisim şoku ile etkileşimi incelenmiştir. Çalışmada Roe yöntemi kullanılarak oluşturulan model için akış kodları oluşturulmuş ve kod paralelleştirilmiştir. Mikrodalgadan kaynaklı oluşan plazma ile küt cisim şokunun etkileşimi sonucunda anlık toroidal girdap oluşumu ve silindir merkez ekseninde durgun basınç değerinde azalma görülmüştür.

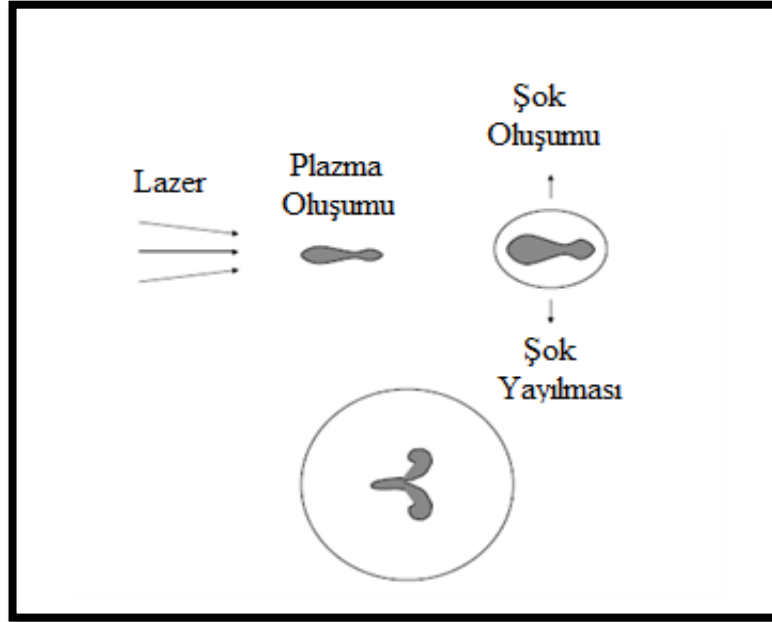
Plazma eyleyicileri kullanımı diğer bir enerji eklemeli, aktif akış kontrol yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntemi içeren çalışmalar yapılmıştır. Samimy vd. [22], plazma eyleyicileri kullanarak, Mach sayısı 0.9 olan ve lüle çıkışında Reynolds sayısı 7.6×10^5 olan jet kontrolü üzerine çalışmışlardır. Sekiz adet aktüatör düzlemsel olarak lüle içine ve lüle çıkışına yerleştirilmiştir. Büyük bir Strouhal sayısı aralığı boyunca, değişik düzlem modları için çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda, aktüatörler tarafından akışta yaratılan karışıklık ve kararsız dalgalar, literatürde daha önce akustik sürücüler kullanılarak yapılan çalışma sonuçlarına benzer olarak gözlemlenmiştir. Jet eksenini 30 ve 90 derecede iken akustik alanla ilgili sonuçlar elde edilmiştir. Strouhal sayısı 0.2-0.5 aralığında iken ses düzeyinde 2-4 dB artış gözlemlenmiştir. Daha yüksek Strouhal sayısı aralıklarında 0.6-1 dB ses seviyesinde azalmalar tespit edilmiştir. En çok azalma ise, Strouhal sayısı 1.5-2 aralığında ve jet eksenini 30 derecede iken aynı zamanda jet eksenini 90 derecede ve Strouhal sayısı 3-3.5 aralığında elde edilmiştir. Diğer bir çalışmada, Samimy vd. [23], plazma eyleyicileri yüksek hızlı jetlerde kullanımını incelemişleridir. Aradag vd. [24] çalışmalarında, plazma eyleyiciler kullanarak, türbülanslı silindir iz bölgesi akışının kontrolünü çalışmışlardır. HAD simülasyon sonuçları ile test sonuçlarının uyum içerside çıkmıştır. Çalışma sonunda, HAD simülasyonları ile kontrol işlemlerinin teste gerek kalmadan da gerçekleştirilebileceği sonucuna varmışlardır. Cohen vd. [25] silindir iz bölgesi akışı için plazma eyleyiciler kullanarak kapalı kontrol çalışması yapmışlardır. Çalışma içersinde DAY yöntemini kullanarak düşük dereceli model elde etmişlerdir.

Enerji ekleme ile akış kontrol sistemleri hem akışın yapısının anlaşılmasında hem de akışın kontrolünde efektif bir şekilde kullanılmaktadır. İstenilen düzeylerde kontrol sağlanamadığı için çalışmalar sürekli devam etmektedir. Bahsedilen enerji eklemeli aktif kontrol yöntemlerinden biri olan, yeni ve araştırılması gereken diğer bir yöntem ise lazer enerjisi ile akış kontrolüdür.

1.2.1.3. Lazer Enerjisi ile Akış Kontrolü

1963 yılında lazer etkilenmiş kıvılcımın (Laser induced spark) keşfedilmesinden itibaren, lazer ışını gaz ortamlarında, bir enerji bırakım yöntemi olarak kullanılmaya başlanmıştır [26]. Daha sonra akış alanındaki oluşumların anlaşılmasının gelişimine paralellik göstererek, lazer enerjisi kullanımı üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Ghosh ve Manesh [27] tarafından yapılan çalışmada lazer enerji bırakımının durgun hava üzerinde olan etkisi araştırılmıştır. Şekil 1.2’de lazer etkileşimi verilmiştir.

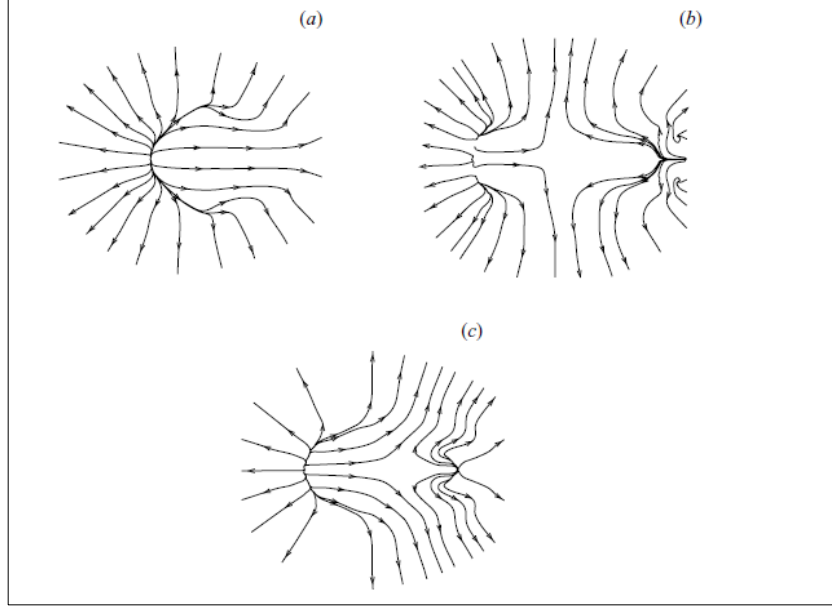


Şekil 1.2. Lazer etkileşimli gaz yapısında meydana gelen değişim şeması [27]

Simülasyonlar, Fourier spektral metodunu kullanarak sıkıştırılmış akış için Navier-Stokes denklemlerini çözmüştür. Üç farklı model oluşturulmuştur. Model-1’ de kimyasal reaksiyonlar göz ardı edilmiş ve akış özellikleri sabit olarak kabul edilmiştir. Model-2’de özelliklerin sadece sıcaklık ile değiştiği kabulü yapılmış, Model-3’te ise hem sıcaklık hem de basınca bağlı havanın özelliklerinin değiştiği kabulü yapılmıştır. Bu üç model içinde, şok yakalama şemalarının doğrulayıcı adımları uygun olarak değiştirilmiştir. Ayrıca, plazma çekirdeğinde oluşan düşük

yoğunlukları dikkate alacak şekilde süreklilik denkleminin logaritmik formülasyonu geliştirilmiştir.

Üç model içinde akış alanları Şekil 1.3' de verilmiştir.



Şekil 1.3. Üç modelin hız akım çizgilerinin karşılaştırılması a) Model-1, b) Model-2 ve c) Model-3 [27]

Şekil 1.3'te verilen akım çizgilerinden görüldüğü gibi Model-1'de zayıf basınç gradyanlarından kaynaklı yavaş bir gelişim vardır. Model-2'de ise daha hızlı akış alanı gelişimi gözlenmekte ve iki ayrı genişleme alanı oluşmaktadır. Model-3 ise diğer iki modelin arasında bir özellik göstermektedir.

Lazer enerji bırakımının etkileri ve Reynolds sayısı incelenmiştir. Verilen enerji miktarına bağlı olarak, şok önünde oluşan yükselmelerin değiştiği görülmüştür. Buna karşılık, oluşan şok dalgaları ve ters akışın oluşumu değişik enerji miktarlarında benzerlik göstermiştir. Plazma çekirdeği çok küçük Reynolds sayılarında herhangi bir şekilde rol oynamamıştır.

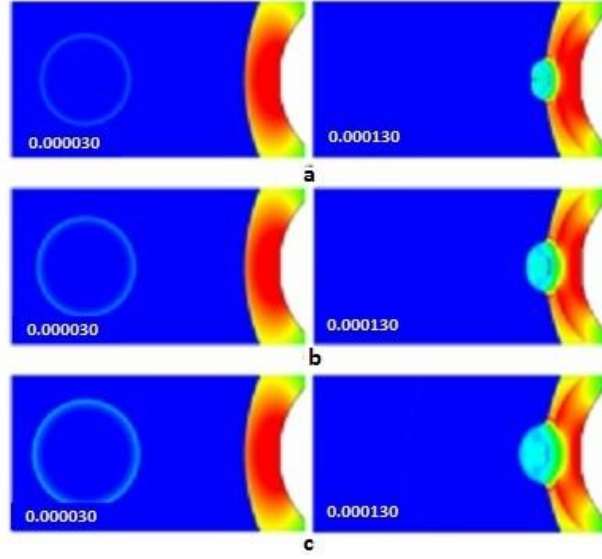
Glumac ve Elliott [28] tarafından yapılan çalışmada 0.1-1atm basınç değeri aralığında değişen ortam basıncının, lazer etkileşimli havanın içerisinde oluşan plazma bölgesindeki sıcaklık, elektron yoğunluğu ve plazma içerisinde emilen lazer enerji oranını nasıl etkilediği incelenmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda elde sonuçlar řu şekilde sıralanabilir;

- Sabit lazer enerjisi girdisi altında, gaz tarafından emilen enerji miktarı basınç ile değişmektedir. Lazer enerjisi emilimi, basınç artışına göre daha güçlü bir şekilde azalmaktadır. 0.1 atm değerinde %5 den daha az bir değerde emilim gerçekteşmektedir.
- Basınç değeri azalırken, kıvılcım boyutu ve maksimum emilim yoğunluğu azalmakta fakat sıcaklık profili neredeyse sabit kalmaktadır.
- Basınç azaldıkça, lazer kıvılcımında oluşan bozulma yoğunluğu atmosferik basıncıtakine göre daha hızlı olmaktadır.

Schüelin vd. [29], plazma teknolojilerinde ortaya çıkan gelişimler sonucunda, kullanımı ve etkinliği artmış olan enerji bırakımı yöntemlerinden lazer enerji bırakımı yöntemini kullanarak, şok dalgaları dönüşümü üzerinde deneysel ve sayısal çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada, enerji çıkış noktası ile uygulama yeri arasındaki mesafe, değişik enerji seviyelerinde bırakım ve birbirini takip eden pulsar arasındaki gecikmenin etkileri ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Uzaklık değişiminin, oluşan blast dalga ve sıcak bölgenin kombinasyonundan kaynaklı ortaya çıkan çeşitli akış modellerine sebep olduğu anlaşılmıştır. Enerji seviyesinin arttırılması ile beklendiği gibi akış içerisinde oluşan varyasyonlar arası etkileşim artmıştır. Şekil 1.4'te değişik enerji seviyelerinde akışta gözlemlenen basınç değişimleri verilmiştir.



Şekil 1.4. Enerji bırakımı sonrasında etkileşimden önceki basınç alanı(solda) ve sonraki basınç alanı(sağda), a) 151mJ, b) 333mJ ve c) 666mJ [29]

Şekil 1.4'e bakıldığında, enerji seviyesi arttıkça etkileşimin arttığı açıkça görülmektedir. Lazer pısları arasındaki kısa gecikmelerin ise akış içerisindeki etkileşimleri çok fazla etkilemediği ortaya çıkmıştır.

Zaidi vd. [30], küçük ölçekli bir rüzgar tüneline enerji eklemenin, sesüstü akışta şok dalgalarına olan etkisini incelemişlerdir. Mach 2.4 olan akış modelinde lazer etkileşimi simüle edilmiştir. Lazer pısları 350 mJ/pals ve 10 ns genişliğinde gönderilmiştir. Dinamik etkileşim, Schlieren ve shadowgraph tekniği ile gözlemlenmiştir ve görüntüler saniyede 500.000 kare alınarak elde edilmiştir. Ayrıca sıcak bölge ve onunla ilişkili olan şok dalgasının, eğimli şok dalgası ile olan etkileşimi hesaplamalı olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda, küçük ölçekli rüzgar tüneline elde edilen sıcak bölge ve model şoku etkileşimi sonuçları kullanılarak, pratik uygulamalar için enerji eklemeyi optimize edebilecek hesaplamalı bir modelin geçerliliği ortaya koyulmuştur.

Adelgren vd. [31] tarafından yapılan çalışmada lazer enerji bırakımı uygulanmış olan iki standart ses üstü akışların; ses üstü türbülanslı sınır tabakası içerisindeki sonik

transvers enjekteli duvar jeti ve çift çözümlü alan içinde etkileşimli şok dalgaları gözlemlenmesi üzerinedir. Amaç, iki durum içinde lazer enerji bırakımı ile akış üzerinde yararlı değişimler elde etmektir.

Ses üstü sınır tabakalarında enine enjekteli duvar jetleri birçok uygulamada kullanılmaktadır. Havacılık uygulamalarında, itme vektörü kontrolü ve ses üstü yanmalarda yakıt enjekteleri gibi alanlarda kullanımı önemlidir. Bu çalışmada Çizelge 1.1’de verilen test koşullarında çalışılmıştır.

Çizelge 1.1. Test koşulları [31]

Özellik	Tünel	Jet
M_{∞}	3.45	1.0
$p_{t_{\infty}}$ (MPa)	1.06	1.03
$T_{t_{\infty}}$ (K)	293	293

Deney sonucunda, lazer uygulanan bölge ile ayrılmış şok etkileşimi, şok dalgalarının hareketine neden olmuştur. Bu hareketin, ses üstü akış içerisindeki küre üzerinde oluşan lazer palsı ile küt cisim şok etkileşimi sonucuna benzerlik gösterdiği ortaya çıkmıştır [32]. Lazer uygulanmış bölge ile duvar jetinin karmaşık şok yapısı etkileşimi sonucunda ayrılmış şokun yukarı doğru hareketlendiği ve ayrışma bölgesinin büyüdüğü görülmüştür. Bu durum lazer uygulanan bölgede Mach sayısında azalmalara katkıda bulunmaktadır.

Kesişen şoklarda lazer enerjisi kontrolü ile düzenli yansıma ve Mach yansıması arasındaki geçişlerin kontrol edilebilmesi önemlidir. Bu nedenle, lazer enerjisinin uygulanması ile kesişen şoklarda ortaya çıkan durumlar irdelenmelidir. Adelgren vd. [31] çalışmasında lazer palsı ile düzenli yansıma ve Mach yansıması arasındaki etkileşim gözlemlenmeye çalışılmıştır. Test koşulları Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Kesişen şoklar için oluşturulan model Çizelge 1.2’de verilmiştir.

Çizelge 1.2. Kesişen şoklar için oluşturulmuş model parametreleri [31]

No	θ (derece)	α	x	w (mm)	b (mm)
1	21	36	0.16	25.4	55.8
2	22	37.2	0.47	25.4	55.8

Kullanılan terimlerin ifadeleri;

θ : kenar açısı α : şok açısı

x : $(\frac{\alpha-\alpha_N}{\alpha_D-\alpha_N})$ w : şok oluşturucu uzunluğu

b : derinlik

Nd: YAG lazeri ile (dalga boyu = 532nm) 317 mJ enerji değerinde uygulanmıştır. 1 no’lu durum için simetrik lazer palsı uygulanmıştır. Lazer uygulanmış bölge ile kesişen şokların etkileşimi girdap oluşumuna neden olduğu görülmüştür.

2 no’lu durum için simetrik lazer palsı uygulanmıştır. Lazer sonucu oluşan sıcak bölge ve Mach stemin etkileşimi sonucunda, Mach stemin sıcak bölgeye doğru ilerlediği görülmüştür. Bu sonuç Adelgren [32]’ nin çalışmasında ortaya çıkan etkileşim sonucuna benzerdir. Bu durumda asimetric şekilde lazer uygulandığında ise Mach stemin yüksekliğinde %20 değerinde anlık düşüş olduğu ve yeniden eski yüksekliğine geldiği ortaya çıkmıştır.

Adelgren vd. [33] tarafından sesüstü akışın bölgesel kontrolünde palslı lazer enerjisi bırakımının etkisi üzerinde durulmuştur. Deneysel olarak yapılan bu çalışmada Mach sayısı 3.45 olan bir akış vardır. Amaç, Edney IV şok etkileşimi koşullarında, lazer palsının kısa zamanda akış alanına etki ederek, kürenin yüzeyindeki maksimum basınç değerini düşürmede oluşan kapasitesini anlamaktır. Lazer palsı, Nd:YAG lazer kullanılarak elde edilmiştir. Deneysel veriler, yüzeydeki basınç değerlerini gösteren Schlieren görüntülerini ve yüksek frekans içermektedir. Sonuç olarak,

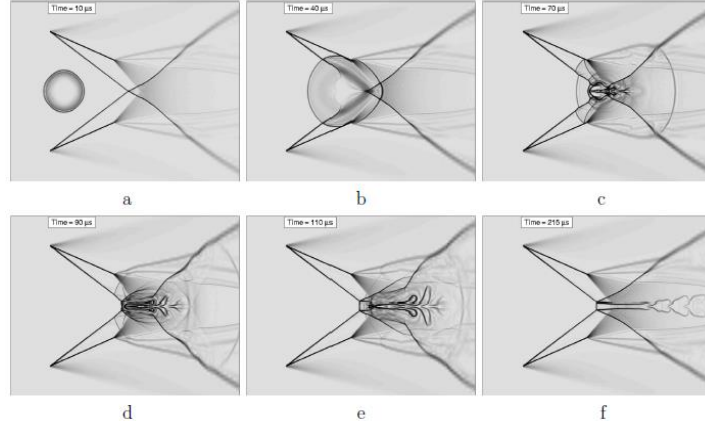
yüzey basınç değerlerinde, 50 mikrosaniyelik zaman dilimi içerisinde %40 civarında bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca maksimum yüzey basınç değeri, Edney IV etkileşimi içerisinde, lazer bırakımından dolayı oluşan akış düzensizlikleri sayesinde %30 değerinde anlık bir düşüş olmuştur.

Adelgren vd. [34], tarafından yapılan çalışma enerji bırakımının iki özel uygulama üzerine etkisidir. Bu uygulamalar Edney IV etkileşimi ve kesişen şok etkileşimidir. Eğik şok ve küt cisim şok etkileşimi sonucu yüksek yüzeysel ısı transferi alanın oluşmasına neden olur. Eğik şok ile küt cisim şoku etkileşimi en tehlikeli etkileşim olarak bilinen Edney IV olarak tanımlanmaktadır. Havacılık uygulamaları için Edney IV etkileşiminin oluşumu sonucunda ortaya çıkan yüzey ısı transferi miktarı, 1 m² lik alana sahip normal boyutlarda bir nükleer santralden çıkan güce eşittir. Bu nedenle yapılan bu çalışmada lazer enerji bırakım yöntemi kullanılarak Edney IV etkileşiminin tehlikeli sonuçları azaltılmaya çalışılmıştır. Deneysel çalışma Rutgers Gaz Dinamiği Laboratuvarında M=3.45, P=1.4 MPa ve T_∞= 290 K şartlarında, 10ns genişliğinde ve 150-200 mJ değerlerinde Nd: YAG lazer palsları kullanılmıştır. Lazer palsları etkileşimli şoklar üzerine uygulanmıştır. Sonuç olarak lazer enerji palslarının yüzey basınç değerlerinde anlık düşüslere neden olduğu anlaşılmıştır.

Etkileşimli şoklar düzenli veya Mach yansımaları oluşturmaktadır. Bu yansımalar basınç değerleri ve buna bağlı değişik zararlı oluşumlara neden olabilmektedir. Bu çalışma içerisinde, 317 mJ değerindeki lazer palsları etkileşimli şoklar üzerine uygulanmıştır. Deneysel Schlieren görüntüleri ile sonuçlar alınmıştır. Lazer uygulanması sonrasında Mach stem yüksekliğinde kısa bir zaman aralığı için %80 oranında düşüş sağlanmıştır. Hesaplama sonuçları deneysel sonuçlarla uyum göstermektedir.

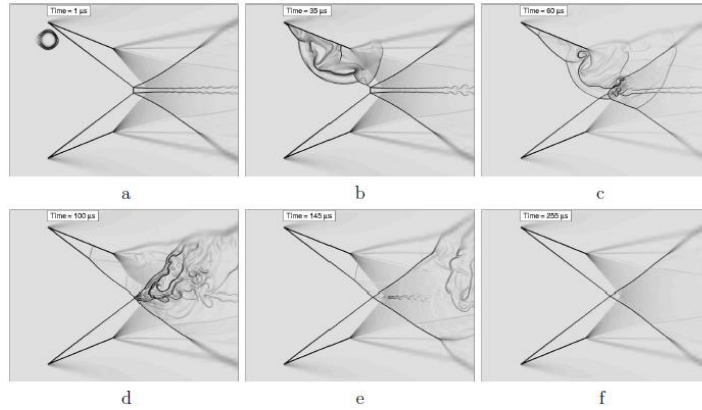
Khotyanovsky vd. [35], palslı lazer enerjisi bırakımı yönteminin, sürekli düzgün ve Mach şoku dalga yansımaları üzerindeki etkisini sayısal olarak çalışılmıştır. Tek bir lazer palsı şok dalgaları üzerinde küçük hacimlere uygulanmış ve sıcak bir bölge ile beraber blast dalga oluşumuna neden olmuştur. Çalışma sırasında yapılan sayısal simülasyonlar sonucunda, lazer enerji bırakımının, sürekli düzenli yansımalar ile

Mach yansımaları arasındaki geçişin kontrolünde kullanılabileceği kanısına varılmıştır. Düzenli yansıma durumunda, simetrik düzleme yerleştirilen lazer, düzenli yansılardan Mach yansımalarına geçişi zorlamıştır. Tam ters geçiş için ise lazer asimetrik olarak yerleştirilmiş ve Mach yansımasından düzenli yansıma geçiş elde edilmiştir. Şekil 1.5'te düzenli yansımadan Mach yansımasına geçiş verilmiştir.



Şekil 1.5. Lazer etkileşimli düzenli yansımadan mach yansımasına geçiş, $M=5$ [35]

Şekil 1.6'da Mach yansımasından düzenli yansıma geçiş verilmiştir.



Şekil 1.6. Lazer etkileşimli mach yansımadan düzenli yansıma geçiş, $M=3.5$ [35]

Yan vd. [36] tarafından yapılan başka bir çalışmada amaç pulslu lazer enerji bırakımının Mach yansımasından düzenli yansıma geçişinin ve tam tersinin çift çözüm alanını kullanarak kontrolünü sağlama kapasitesini anlamaktır. Bu doğrultuda

hesaplamalı ve deneysel olarak çalışma yapılmıştır. Deneysel ve simülasyonlar Mach 3.45 değerinde simetrik 22 derecelik köşe için, bir simülasyon ise Mach 4 değerinde simetrik 24.6 derecelik köşe için yapılmıştır. Simülasyonlar lazer enerji palsından kaynaklı oluşan plazma bölgesinin yarattığı etkileşimler sayesinde, çift çözüm alanı içerisinde Mach yansımasından düzenli yansımaya geçiş ve tam tersinin mümkün olduğunu görmüşlerdir. Deneysel Mach yansımasından düzenli yansımaya geçişlerde, Mach stem yüksekliğinin, lazer palsından dolayı oluşan plazmanın yarattığı etkileşimler sonucunda azaldığı görülmüştür. Fakat Mach yansıması, rüzgâr tüneli içerisindeki serbest akış etkilerinden dolayı yeniden oluşmuştur.

Yan vd. [37] tarafından, lazer enerji bırakım yönteminin durgun havaya ve kesişen şoklara etkisi üzerine çalışma yapılmıştır. Çalışmada, iki ayrı olguyu kapsamaktadır. Biri, durgun havada, tek palslı lazerin etkisini görmek, diğeri ise, asimetrik palslı lazerin simetrik kesişen şoklara Mach 3.45 değerinde uygulanarak, lazer enerji bırakımının Mach stemini azaltmadaki kapasitesini araştırmak üzerinedir. Asimetrik palslı lazerin kesişen şoklara uygulanması üzerine olan kısım deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Rutgers Gas Dynamics and Laser Diagnostics Laboratuvarındaki sesüstü rüzgâr tüneli kullanılmıştır. Durgun hava üzerindeki etkisine bakıldığında ise, lazer ekseni doğrultusunda, bir yağ damlası şeklinde yapının oluştuğu görülmektedir. Bu yapının geçerli bir süre zarfından sonra küresel hale geldiği görülmüştür. Bu yapı, sabit hacimde, bırakılan lazer enerjisinden dolayı küresel simetrik bir sıcaklık dağılımı oluşacağı düşüncesini tetiklemiştir. Bu nedenle, gaz ideal gaz olarak kabul edilerek, lazer bırakımı için Gauss sıcaklık değişimi kullanılarak sayısal bir model oluşturmuşlardır. Elde edilen sonuçlar, Adalgren vd. [31] tarafından verilen deneysel eğri ile uyumuştur. Sonuç olarak, oluşturulan Gauss başlangıç sıcaklık modelinin uygunluğu görülmüştür. Kesişen şok dalgalarına uygulanan lazer enerji bırakımı sonucunda elde edilen deneysel sonuçlara göre ise blast dalgası Mach stemden geçerken Mach stemin yüksekliğinde açık şekilde düşüş olduğu saptanmıştır.

Lazar [7] tarafından aktif kontrol yöntemlerinden biri olan enerji yükleme yöntemi ile kavite içerisindeki akışın kontrolü üzerine deneysel bir çalışma yapılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmada Q-Switched Nd-YAG lazeri kavite başlangıç kenarından uygulanmıştır. Mach sayısı 1.4 ve kavite uzunluğunun derinliğine oranı 5.29 olan bir geometri üzerinde çalışılmıştır. Aradag [38] tarafından yapılan çalışmaya benzer şekilde kavite başlangıç kenarından lazer ışınları gönderilerek kesme tabakasındaki değişimler incelenmiştir. Bu çalışmada düşük frekans değerinde (10Hz) işlemler uygulanmıştır. Bu çalışmada amaç, kullanılan yöntemin, scramjet motorlarındaki hava-yakıt karışımını geliştirmek üzerine, kesme tabakasında büyük ölçekli yapılar oluşturmadaki etkinliğini gözlemlenmektir. Oluşturulan deney düzeneği sonucunda elde edilen sonuçlara göre; lazer enerji yüklemesi kesme tabakasında istenilen büyük ölçekli bir yapının oluşmasını sağlamıştır. Ayrıca bu durum altında hız alanı ile ilgili bilgiler ölçümler yapılmış bulunan değerlerin, daha önce yapılan çalışmalar sonucunda oluşturulan teorik model sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Aradag [38] tarafından lazer enerjisi kullanılarak sesüstü kavite akışının kontrolü üzerine çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada Mach Sayısı 1.5 olan açık kavite konfigürasyonuna sahip bir model kullanılarak akış enerji verilmeden ve verildikten sonra incelenerek lazer enerjisinin etkisi görülmeye çalışılmıştır. Çalışmada, Yan vd. [37] tarafından oluşturulan lazer enerjisi uygulama modeli kullanılmıştır. Kontrol işlemi sırasında ilk enerji 1 mJ değerinde ve 4 değerindeki boyutsuz enerji değeri kullanılarak 12 Rossiter periyodundan sonra uygulanmıştır. Her Rossiter periyodu başında aynı enerji değeri akışa uygulanmıştır. Kavite ön, alt ve arka duvarından toplanan basınç değerleriyle oluşturulmuş ses basınç seviyeleri dağılımları, lazersiz durumlar ile karşılaştırılmış ve 3dB civarında düşüşler görülmüştür.

1.2.2. Dikgen Ayrıştırma Yönteminin Kavite Akışına Uygulanması Üzerine Literatür Araştırması

Dikgen Ayrıştırma Yöntemi (DAY), analiz edilen veri topluluklarını zamana ve mekana bağlı olarak ayrıştırarak, veri topluluğunun yansıttığı yapıların baskın özelliklerinin ortaya çıkarılması amacıyla kullanılan istatistiksel bir yöntemdir [39]. DAY yönteminin temel amacı; karmaşık veri toplulukların baskın özelliklerini, indirgenmiş basit yaklaşımlar ile ifade etmektir [39].

DAY yöntemi, birçok alanda çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Yapısal titreşimler, sinyal analizi, görüntü işleme, veri sıkıştırma ve akış analizleri gibi mühendislik uygulamalarında yer edinmiş bir yöntemdir. Bu uygulamalarda ortaya çıkan karmaşık veri topluluklarının daha düşük dereceli yaklaşımlar geliştirilerek tanımlanmasında ve yeniden modellenmesinde sıkça kullanılmaktadır [40]. Lumley [41] ve Aubry vd. [42] DAY yönteminin akış problemlerinde uygulanması konusunda çalışmalar yapmışlardır. Akış alanında ortaya çıkan yapıları mekan ve zamana bağlı karakteristiklerini belirleyerek düşük dereceli model yaklaşımları geliştirilmesinde öncü olmuşlardır.

Önemli bir akış problemi olan kavite akışının genellikle kontrolü üzerine yapılan çalışmalarda, DAY uygulamaları karşımıza çıkmaktadır. Rowley vd. [43] farklı uzunluk/derinlik oranına sahip açık kavite akışlarını analiz etmişlerdir. Amaçları, elde ettikleri verilere DAY uygulamak ve sistemi daha düşük dereceli bir veri topluluğu ile yeniden yapılandırmaktır. Elde ettikleri hız verilerine DAY uygulamışlar ve Galerkin metodunu da kullanarak sistemi yeniden tanımlayacak olan denklemleri elde etmişlerdir. Benzer bir çalışmada, Nagarajan vd. [44] L/D oranı 2 olan, sıkıştırılabilir açık kavite akışını kontrol edebilmek amacı ile dikgen ayrıştırma yöntemini temel alarak düşük dereceli sistem modeli elde etmeye çalışmışlardır.

Bortz vd. [45], Mach sayısı 0.85 ve L/D oranı 4.5 olan açık kavite akışının simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Amaçları kavite akışı içerisinde ortaya çıkan akustik modları kontrol edebilmektir. Simülasyonlar sonrasında elde edilen ve kontrol amaçlı kullanılacak olan verilerin yüksek depolama yeri gereksinimini gidermek amacı ile DAY kullanmışlardır. Bu şekilde DAY yöntemini ard işleme aracı olarak yararlanmışlardır.

Colonius [46] açık kavite akışı ile ilgili simülasyon, modelleme ve kontrol teknikleri üzerine genel bir çalışma sunmuştur. Yapılan çalışmalardan örnekler göstererek, DAY yöntemi ve Galerkin yönteminin birlikte kullanımının kavite akışı gibi karmaşık ve lineer olmayan sistemler için geri beslemeli kontrol stratejileri

geliştirmek açısından önemli bir yeri olduğunu ortaya koymuşlardır. Caraballo vd [47] ve Kasnakoglu [48], kavite akışı kontrolü amaalı DAY temelli modeller oluşturmak üzerine çalışmalar yapmışlardır.

1.3. Amaç

Bu çalışmanın öncelikli amacı, aktif bir akış kontrol metodu olan lazer enerjisi bırakımının, iki boyutlu sesüstü kavite akışını kontrol etmek konusunda potansiyelinin araştırılmasıdır. Bu amaçla, lazer enerjisini akış üzerinde etkin kılabilme amacı ile enerjinin büyüklüğü, akışa uygulandığı konum ile enerjinin frekansı gibi parametreler değerlendirilmiştir. Bu tez çalışmasında içerisinde yer aldığı, ‘‘Sesüstü Kavitelere Lazer Enerjisi Yardımıyla Akış Modellemesi ve Kontrolü’’ adlı TUBİTAK 110M539 kodlu proje kapsamında, Ayli [49] tarafından hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonları gerçekleştirilen iki boyutlu L/D oranı 5.07 olan kavite konfigürasyonunun, lazer verilerek simülasyonlarına devam edilmesi ve kontrollü akış analiz sonuçları ile kontrolsüz sonuçların kıyaslanması ile sonuca gidilmiştir.

Kontrollü ve kontrolsüz HAD simülasyon sonuçlarına, Dikgen Ayrıştırma Yöntemi uygulanarak, baskın mekansal ve zamansal karakteristiklerin incelenmesi ile sistemler arasında ortaya çıkan farklılıkların ortaya koyulması diğer bir amaçtır. Lazerli ve lazersiz sonuçlara DAY uygulayarak, akış alanından verimli bir şekilde veri toplayabilmek amacı ile kavite yüzeylerine yerleştirilmesi gereken sensörlerin konumlarında belirlenmiştir.

Ayrıca, alışma içerisinde HAD simülasyonları daha önceden gerçekleştirilmiş farklı uzunluk/derinlik oranına sahip kavite konfigürasyonlarının, HAD sonuçlarına Dikgen Ayrıştırma Yöntemi Uygulanarak, uzunluk/derinlik oranının kavite akış mekanizmasına olan etkileri ortaya koyulmuştur.

Bu tez çalışması ve Ayli [49] tarafından gerçekleştirilen çalışmaların birlikte içerisinde yer aldığı 110M539 kodlu “Sesüstü Kaviteelerde Lazer Enerjisi Yardımıyla Akış Modellemesi ve Kontrolü” TÜBİTAK projesi başarı ile sonlandırılmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Sayısal Çözüm Yöntemi

Çalışma içerisinde, iki boyutlu kavite akışının lazer verilerek HAD simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın da içerisinde bulunduğu TUBİTAK 110 M 539 nolu proje kapsamında kontrol simülasyonları gerçekleştirilen kavite akışının HAD simülasyonları Ayli [49] tarafından gerçekleştirilmiş ve sonuçlandırılmıştır. HAD ile ilgili sayısal çözüm yöntemleri ayrıntılı bir şekilde, Ayli [49]'nın çalışmasında sunulmaktadır.

2.2. Lazer Enerjisi Bırakım Yöntemi

2.2.1. Genel Bakış

Lazer enerjisinin akış problemlerine uygulanması ile ilgili birçok çalışma literatür kısmında sunulmuştur. İncelenen çalışmalarının çoğu deneysel içeriklidir. Lazer enerjisi bırakımının sayısal olarak çalışılabilmesi için lazer enerji palsının sayısal olarak modellenmesi gerekmektedir. Bu gereksinim, Yan vd. [35]'nin lazer enerjisi bırakımını sayısal olarak modelledikleri çalışmasıyla giderilmiştir.

Lazer enerjisi bırakımı durgun hava üzerinde Yan vd. [37] tarafından denenmiş ve lazer enerji palsının sürekli ve sabit hacimde akışa uygulanması, dolayısı ile sabit yoğunluk ve ideal gaz durumu kabulü altında, uygulanan bölgede küresel, simetrik bir sıcaklık dağılımı olduğu varsayılarak, oluşan sıcaklık dağılımı Gauss profili kullanılarak düzenlenmiştir.

Yan vd. [37] tarafından oluşturulan lazer enerjisi bırakım modeli, Rayleigh Scattering yöntemi ile deneysel sonuçlar alınarak doğrulanmıştır [31]. Oluşturulan lazer enerjisi bırakım modelini Aradag [38] lazer enerjisinin süpersonik kavite akışı üzerinde olan etkilerini araştırdığı çalışmasında kullanmıştır. Kullanılan model sonucunda süpersonik kavite içerisinde basınç değerlerinde azalmalar görülmüştür.

Bu sonuç Yan vd. [37] tarafından oluşturulan matematiksel modelin, kavite içerisinde süpersonik akış için uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında, Yan vd. [37] tarafından lazer palsı için önerilen sayısal yaklaşım kullanılarak lazer enerji bırakımı modellenmiş ve sesüstü açık bir kavite akışına uygulanmıştır.

2.2.2. Teorik Bilgi

Küresel simetrik bir ilk sıcaklık dağılımı her bir enerji palsını (energy pulse) modellemek için kullanılmış enerjinin anlık olarak sabit hacimde eklendiği varsayılmıştır. Buna bağlı olarak yoğunluk sabit ve gaz ideal gaz olarak kabul edilebilir. Gauss profili kullanılarak elde edilen sıcaklık dağılımı Denklem 2.1' de verilmektedir.

$$\Delta T = \Delta T_0 e^{-r^2/r_0^2} \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de ΔT yerel olarak sıcaklık farklılıklarını, r farklı noktaların lazer verilen noktaya olan uzaklıklarını r_0 , $R_0/2$ 'ye eşit olup, R_0 ise lazerin başlangıç yarıçapıdır ($R_0 = 0.9mm$). ΔT_0 lazer enerjisinin verildiği bölgede oluşan maksimum sıcaklık farkını göstermekte ve toplam yüklenen enerji, E ye göre hesaplanmaktadır.

$$E = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^\infty r^2 \sin \theta \rho_\infty c_v \Delta T dr d\theta d\phi \quad (2.2)$$

Denklem 2.1 ve 2.2 birleştirilip, integral alınırsa Denklem 2.3 elde edilir.

$$\Delta T_0 = \frac{E}{\pi^{\frac{3}{2}} r_0^3 \rho_\infty c_v} \quad (2.3)$$

c_v sabit hacim altında özgül ısı değeri, ρ_∞ ise yoğunluk değeridir.

Lazer enerjisi bırakımı gerçekleştirilirken, öncelikle Denklem 2.3, daha sonrada Denklem 2.1 çözülerek, lazer verilen bölgedeki sıcaklık dağılımı belirlenmektedir.

Lazer enerjisi bırakımını sayısal olarak gerçekleştirebilmek amacı ile Denklem 2.1 ve Denklem 2.3 temel alınmış ve MATLAB® yazılımı kullanılarak tez çalışması kapsamında oluşturulan, EK-1’de verilen kod kullanılmıştır.

2.3. Dikgen Ayırıştırma Yöntemi

2.3.1. Genel Bakış

Dikgen Ayırıştırma Yöntemi istatistiksel tabanlı bir modeldir. Deneysel veya sayısal çalışmalar sonucunda elde edilmiş karmaşık veri topluluklarının analiz edilmesi ve sistem içerisindeki tutarlı yapıların zamana ve mekana bağlı baskın karakteristiklerini belirleyip, sistemin ifadesi için daha basit yaklaşımlar ortaya koymak amacı ile kullanılmaktadır [39].

Dikgen Ayırıştırma Yöntemi genel olarak araştırmacılar tarafından uygulama şekline göre iki şekilde yorumlanmaktadır. Bunlardan birincisi Karhunen-Loève ayırıştırma yöntemi, diğeri ise Karhunen-Loève ayrışımı, temel bileşenler analizi (principal component analysis) ve tekil değer ayrışımı (singular value decomposition) yöntemlerinin bileşimidir [39, 40, 50, 51, 52]. İkinci yöntem, birbiri ile uygun bağlantıları bulunan ve uyumlu olan yöntemlerin bileşimi olduğundan dolayı genellikle araştırmacılar tarafından tercih edilen yöntemdir [51].

DAY yönteminin veri topluluklarına uygulanması ile veri topluluklarının ait olduğu sistemin barındırdığı baskın fiziksel davranışları temel fonksiyonlar ile ifade edilirken, bu baskın davranışların zamanla değişim karakteristikleri ise zaman katsayıları geçmişi ile ifade edilir [52]. DAY uygulaması sonucunda elde edilen her temel fonksiyon bir kip olarak adlandırılırken, zaman katsayıları geçmişi ise kip genlikleri olarak ifade edilmektedir.

Bu çalışmada DAY yöntemi, iki boyutlu, değişik geometrilere sahip, sesüstü kavite akışlarının HAD simülasyonları gerçekleştirilerek elde edilmiş verilerinin analiz edilmesinde bir ard işlem aracı olarak kullanılmıştır. Ayrıca akış kontrolü amaçlı olarak sensör yerlerinin belirlenmesinde de kullanılmıştır.

2.3.2 DAY Yöntemi Teorisi ve Kavite Akışına Uygulanışı

DAY uygulaması içerisinde belirli bir davranışı ifade edebilecek olan x-yönü hızı, y-yönü hızı vb. parametreler belirlenir. Bu çalışmada kavite akış alanı içerisindeki x yönündeki hız değerleri analiz edilecek veri topluluğunu oluşturacak şekilde seçilmiştir. HAD analizden elde edilen her bir anlık görüntü, her bir zaman adımına denk gelmektedir. Yani N adet zaman adımı için yapılmış olan analiz sonucunda N adet anlık görüntü elde edilmiş olur. Her bir anlık görüntünün barındırdığı x yönündeki hız vektörleri, $U_i(x,y)$ matrislerinde toplanır. Analiz sonucunda N adet seçtiğimiz fiziksel özelliği ifade eden $U_i(x,y)$ matrisi elde etmiş oluruz.

$$U_i(\vec{x}) = U_1(x, y), U_2(x, y), U_3(x, y), \dots, U_N(x, y) \quad (2.4)$$

Veri topluluğu elde etme işlemi tamamlandıktan sonra, veri topluluğunun ortalaması bulunarak elde edilen veri topluluğundan çıkarılır. Bu yöntemin uygulanmada ilerleyen işlemler sırasında ortaya çıkabilecek ölçekleme gereksinimlerini ortadan kaldırdığı Newman [55], Deane vd. [56] tarafından yapılan çalışmalarda belirtilmiştir. Bu işlem Denklem 2.5' teki gibi ifade edilebilir.

$$V_i(\vec{x}) = U_i(\vec{x}) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i(\vec{x}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.5)$$

DAY uygulaması ile veri topluluğunu daha düşük dereceli ifade edebilmek amacı ile baskın fiziksel özelliği yansıtabilecek olan temel fonksiyonlar bulunur. Temel fonksiyonlar Denklem 2.6' daki gibi ifade edilmektedir [55, 57].

$$\phi(\vec{x}) = \sum_{i=1}^N \alpha_{ik} V_i(\vec{x}) \quad k = 1, 2, \dots, S \text{ (kip sayısı)} \quad (2.6)$$

Temel fonksiyonları ifade eden Denklem 2.6' da, bulunan α_{ik} parametresi kip genliklerini, $V_i(\vec{x})$ parametresi daha önceden tanımlandığı gibi ortalama değerden çıkarılmış veri topluluğunu, $\phi(\vec{x})$ parametresi ise temel fonksiyonları ifade etmektedir. Elde edilen temel fonksiyonlar $V_i(\vec{x})$ $i=1,2,\dots,N$ veri topluluğunun ifade ettiği fiziksel durumu en tutarlı şekilde ifade edebilmektedir [58]. İncelenen veri topluluğunun en iyi şekilde ifade edebilmek için, $\phi(\vec{x})$ temel fonksiyon değerlerinin mümkün olan en yüksek dereceye çıkarmak gerekmektedir. Bu işlem L^2 iç çarpım ve normundan faydalanılarak gerçekleştirilebilir. Denklem 2.7a. ve 2.7b 'de derecesi yükseltmek istenen fonksiyon ve $\phi(\vec{x})$ parametresine bağlı formülasyonu verilmektedir [57].

$$F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(V_i, \phi)|^2 \quad (2.7a)$$

$$\|\phi\|^2 = (\phi, \phi) = \int_{\Omega} |\phi|^2 dA = 1 \quad (2.7b)$$

2.7a ve 2.7b nolu denklemlerde verilen ϕ temel fonksiyon vektörünü ifade etmektedir. (\cdot, \cdot) ifadesi iç çarpımı, $\|\cdot\|$ ifadesi ise normu göstermektedir. Ω simgesi incelenen veri topluluğunun etkinlik alanını ifade etmekte ve her iki eşitlik integrali alınabilir ifadelerdir.

Newman [55], Ly ve Tran [57], Sanghi ve Hasan [59], ve Smith vd. [60] tarafından yapılan çalışmalarda temel fonksiyonların elde edilmesine ilişkin bu problemin varyasyonel hesap uygulamasıyla Denklem 2.8 ile gösterilen Euler-Lagrange integral eşitliğinin çözümü şeklinde ifade edilebildiği belirtilmiştir.

$$\int C(\vec{x}, \vec{x}') \phi(\vec{x}') dx' = \lambda \phi(x) \quad (2.8)$$

Denklem 2.8' de, λ parametresi öz değerleri, ϕ temel fonksiyonları temsil etmektedir. $C(\vec{x}, \vec{x}')$ ifadesi korelasyon tensörünün ifadesidir. Korelasyon tensörü, uzayda ya da zamanda, iki farklı noktadaki rastgele değişkenlerin birbirleriyle olan bağıntılarının, noktaların arasındaki uzaklığın mekansal ya da zamansal fonksiyonu olarak ifadesidir [60].

Denklem 2.8' de, verilen öz değer problemin çözümü için Sirovich [61] tarafından önerilen Anlık Görüntü Sayıları Metodu kullanılmıştır. Bu metot Karhunen-Loève ayrışımı ile temel fonksiyonların bulunmasında iyi bir yaklaşım sağlamaktadır [59]. Anlık Görüntü Sayıları Metoduna göre, Denklem 2.6, 2.8 nolu denklemin içine yazıldığında NxN boyutlarında kovaryans matrisi elde edilir. Denklem 2.9 kovaryans matrisinin elde edilmesini göstermektedir [55, 57, 61].

$$(C)_{ij} = \frac{1}{N} \int_{\Omega} V_i(\vec{x}) V_j(\vec{x}) dx \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad (2.9)$$

Elde edilen (C) negatif olmayan ve simetrik kovaryans matrisi, cebirsel olarak çözülebilecek bir öz değer, öz vektör problemi haline gelmiştir. Tekil Ayrıştırma Yöntemi kullanılarak (Singular Value Decomposition) kovaryans matrisin öz değerler elde edilir. Bu işlem için Denklem 2.10 kullanılır [40, 62].

$$C = R \Sigma P^T \quad (2.10)$$

Denklem 2.10'da, R matrisi öz fonksiyonları yani temel fonksiyonları içermektedir. P matrisi tekil ayrıştırma yöntemi sonucunda ortaya çıkan ve DAY uygulamasına etkisi olmayan bir matristir. Bizim için önemli olan Σ matrisi ise köşegeni üzerinde öz değerleri taşıyan matristir. Öz değerler bulunduktan sonra büyükten küçüğe

$\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 \dots > \lambda_N$ olacak şekilde sıralanır. Öz değerler, bağlı oldukları öz fonksiyonların yani temel fonksiyonların veri topluluğuna ait baskın özellikleri ne kadar içerisinde barındırdıklarını anlamakta kullanılmaktadır. Her bir öz değer bir enerji değerini ifade etmektedir [63]. Değeri ne kadar yüksek ise bağlı olduğu temel fonksiyon veri topluluğunun baskın özelliklerinin o kadar çok yansıtılabilir. Sistemi indirgeyerek en iyi şekilde ifade etmek için, kaç tane öz değer toplam enerji değerinin tamamına yakınına yansıttığı belirlenerek kip sayısı elde edilir.

Sistemi ifade edebilecek kip sayısı belirlendikten sonra sistemi indirgenmiş bir şekilde ifade edebilecek veri topluluğunun yeniden düzenlenmesi gerekir. DAY sonucunda yeni veri topluluğu oluşturmak için Denklem 2.11 kullanılır [64].

$$U = \bar{U} + \sum_{i=1}^S \alpha_k \phi_k \quad (2.11)$$

U veri topluluğunu, \bar{U} veri topluluğunun ortalama değerini, α_k bağıl kip genliklerini diğer bir tabir ile zaman sabitlerini, ϕ_k DAY sonucu elde edilmiş kipleri ve S ise kip sayısını ifade etmektedir. Denklem 2.11 kullanılarak, orijinal veri topluluğumuza çok benzeyen indirgenmiş yeni bir veri topluluğu oluşturulur.

DAY yöntemi teorisi için verilmiş olan denklemler kullanılarak, MATLAB® ortamında oluşturulan ve EK.2' de verilmiş olan kod kullanılmıştır. Proje içerisinde farklı kavite geometrileri incelenmiştir. DAY yöntemi her kavite akışının HAD simülasyonları sonucunda elde edilen kavite içerisindeki x-hız veri topluluklarına uygulanmıştır. Ayrıca, kontrollü analizleri gerçekleştirilen kavite konfigürasyonu için bir boyutlu DAY yöntemi uygulanarak akış kontrolü için sensör konumları belirlenmiştir.

2.4. Ard İşleme Yöntemleri

2.4.1. Ses Basınç Seviyelerinin Hesaplanması

Çalışma içerisinde, ses basınç seviyeleri karşılaştırma parametresi olarak kullanılmıştır. Akış analiz süresince elde edilen basınç verileri kullanılarak ses basınç seviye değerleri Denklem 2.12, 2.13 ve 2.14 kullanılarak elde edilmiştir [1].

$$SPL = 10 \log_{10} \left(\frac{\bar{p}^2}{q^2} \right) \quad (2.12)$$

$$\bar{p}^2 = \frac{1}{t_f - t_i} \int_{t_i}^{t_f} (p - \bar{p})^2 dt \quad (2.13)$$

$$\bar{p} = \frac{1}{t_f - t_i} \int_{t_i}^{t_f} p dt \quad (2.14)$$

Denklem 2.12'deki q ifadesi ses basınç referans değeridir ve 2×10^{-5} Pa değerindedir [1]. t_f işlemin sonu, t_i ise başlangıç anıdır dolayısıyla $t_f - t_i$ değeri SPL analizinin yapıldığı zaman aralığıdır.

2.4.2. Ters Uzaklık Ağırlıklı İnterpolasyon Yöntemi

HAD analizi sonucu elde edilmiş verilerin DAY yöntemini uygulamak üzere hazır hale getirilmeleri açısından interpolasyon işlemi gerçekleştirilmiş ve ters uzaklık interpolasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile bir nokta üzerindeki değer belirlenirken uzakta olan noktaların değerleri azaltılmaktadır. Denklem 2.15' te verilmektedir [65].

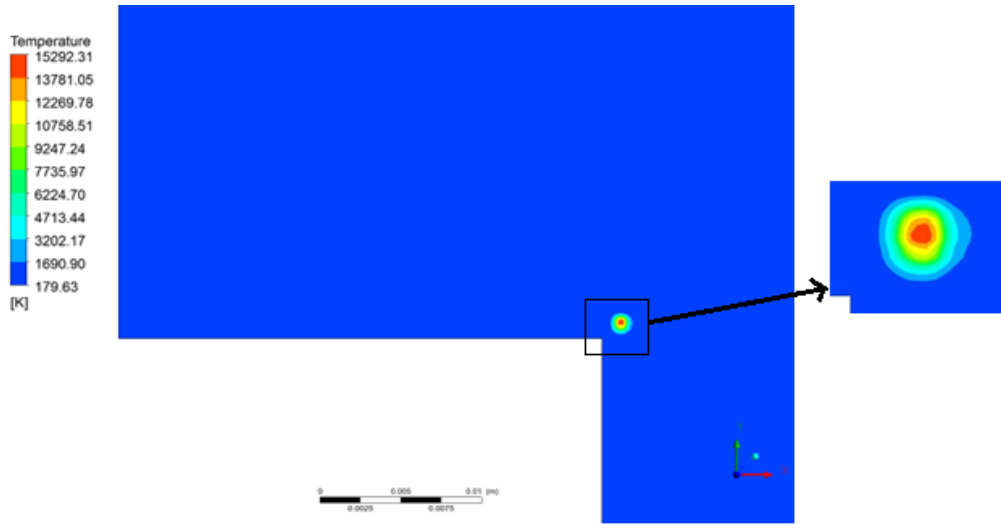
$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^G P_j / D_{ij}^n}{\sum_{j=1}^G 1 / D_{ij}^n} \quad (2.15)$$

P_i i konumunun değeri; P_j örnek konumun değeri, D_{ij} i konumundan j konumuna olan uzaklık değeri, G örnek konum sayısı, n ise ters uzaklık ağırlık derecesidir.

3. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI VE BULGULAR

3.1. Lazer Enerjisi Bırakımının İki boyutlu Kavite Akışına Etkileri ve Çeşitli Parametrelerin Değerlendirilmesi

Sayısal olarak lazer enerjisi bırakımını gerçekleştirilebilmesi amacıyla, Yan vd. [37]'nin çalışmasında ortaya koydukları lazer pals modeli kullanılmıştır. Bu modelin matematiksel içeriği Bölüm 2.2' de anlatılmaktadır. Modelin oluşturulmasında temel alınan, lazer verildiği bölgede oluşan küresel, simetrik sıcaklık dağılımı Şekil 3.1' de verildiği üzere modelin uygulanması sonucu beklendiği gibi gözlemlenmiştir. Bu sayede modelin doğru bir şekilde uygulandığı belirlenmiştir.



Şekil 3.1. Lazer bırakılan bölgede oluşan plazma (Sıcaklık Konturu)

L/D oranı 5.07 olan kavite akışının HAD simülasyonları Ayli [49] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında bu kavite akışının karakteristiği ortaya koyulmuştur. Lazer enerjisinin akışa olan etkilerini anlamak amacıyla lazerin enerji büyüklüğü, verildiği konum, frekans ve süre gibi parametreler denenmiştir. Parametreler denenerek lazer enerjisinin akış alanı içerisinde farklılık

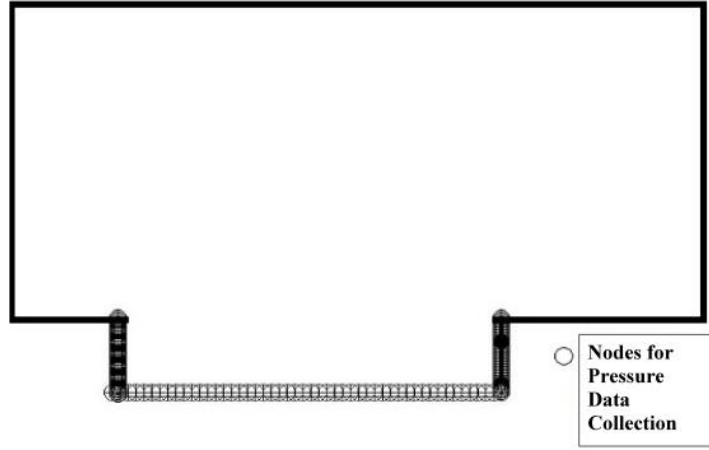
oluşturması ve istenildiği gibi akış alanı içerisindeki basınç dalgalanmalarını azaltması hedeflenmektedir.

Çalışmalar boyunca lazer enerjisi akışa sayısal olarak uygulanmıştır. Uygulama sırasında EK-1’ de verilen kodlar hazırlanarak kullanılmıştır. Uygulamanın temelinde akış analiz programından anlık sıcaklık verilerini içeren çıktı alınması ve bu çıktının lazer bırakım modeli uygulanarak işlenmesi ile yeni sıcaklık değerlerini içeren yeni dosya ile analize devam edilmesi üzerinedir. Lazer enerjisinin akışa verilebilmesi amacıyla izlenen süreç Şekil 3.2’ de verilmektedir.



Şekil 3.2. Lazer bırakım işleminin akış şeması

Lazerin etkilerini gözlemleyebilmek adına karşılaştırma parametresi olarak kavite ön, alt ve arka duvarı boyunca elde edilmiş ses basınç seviyeleri dağılımları kullanılmıştır. Ses basınç seviyeleri dağılımlarını elde edebilmek için kavite ön, alt ve arka duvarları boyunca Şekil 3.3’ te verilen noktalardan basınç değerleri toplanmıştır.



Şekil 3.3. Basınç verisi toplanan noktalar

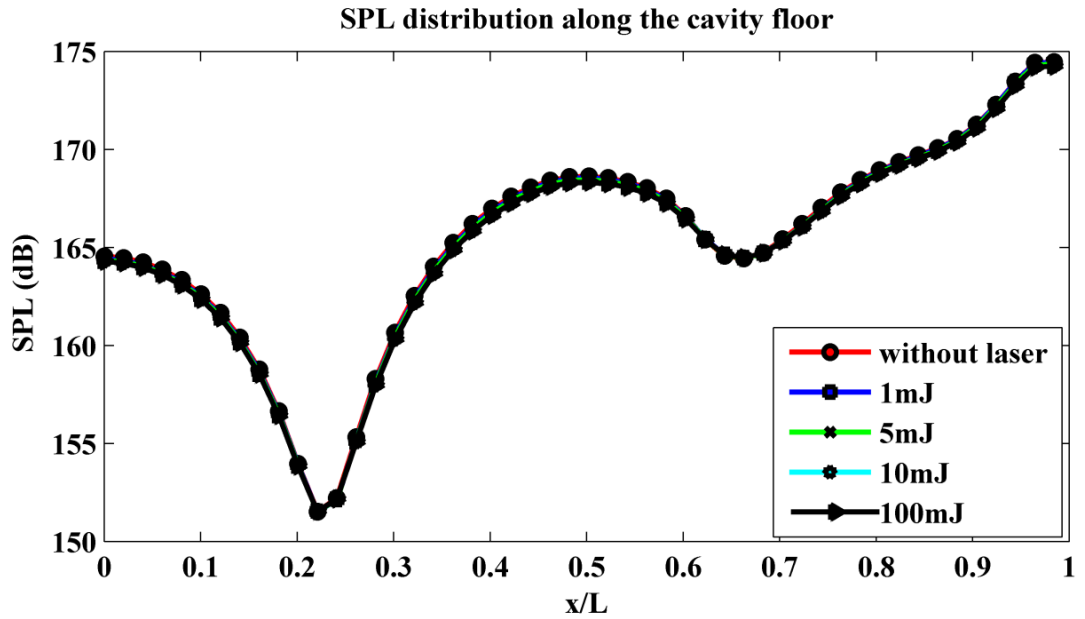
Elde edilen basınç değerlerinden, ses basınç seviyeleri hesabının yapılabilmesi amacı ile Denklem 2.12, 2.13 ve 2.14 kullanılmıştır.

3.1.1. Farklı Lazer Enerji Büyüklüklerinin Değerlendirilmesi

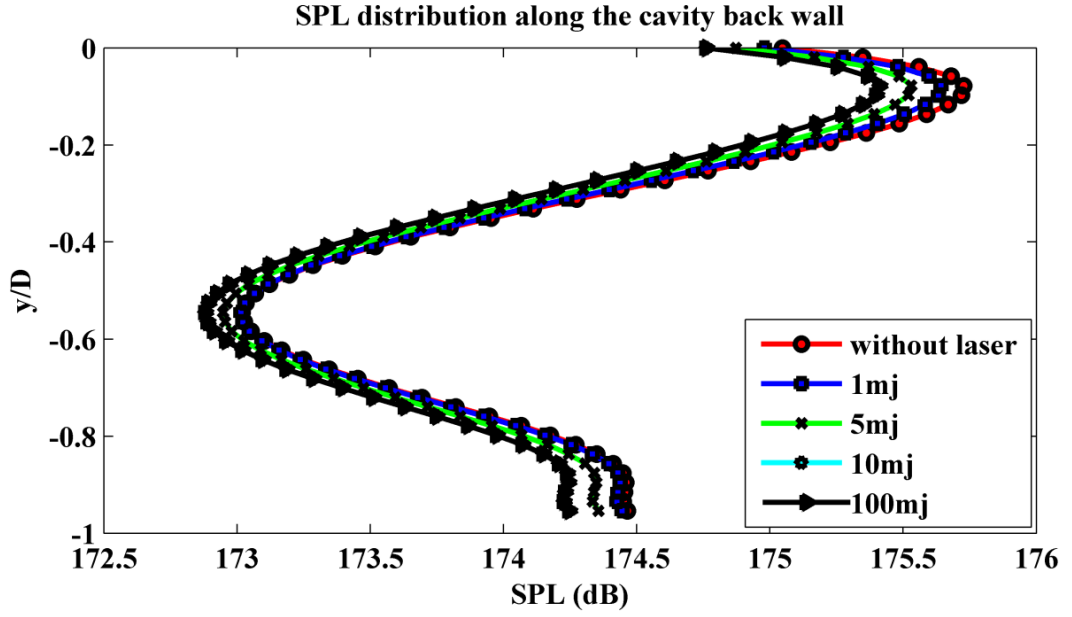
Lazer enerjisinin süpersonik kavite akışına etkisinin anlaşılması ve etkin bir enerji büyüklüğü bulunabilmesi amacı ile 1, 5, 10 ve 100mJ büyüklüklerindeki lazer enerjisi akışa uygulanmıştır. HAD analizleri sonucunda elde edilmiş basınç dalgalanmaları grafiği incelendiğinde, basınç dalgalanmalarının 12 Rossiter periyodu sonrasında periyodikleştiği görülmektedir. Aradag vd. [38] tarafından yapılan çalışmadaki gibi başlangıç olarak 12 Rossiter periyodu sonrasında lazer enerjisi akışa her periyot başı bir kez olmak üzere 6 periyot boyunca uygulanmıştır. Bir Rossiter periyodu HAD sonuçlarında belirlendiği üzere 964 zaman adımına denk gelmektedir (zaman adımı: 10^{-6} s).

Lazer enerjisi bırakımı oluşturulmuş olan sayısal modeli içeren lazer bırakım kodları kullanılarak MATLAB® ortamında gerçekleştirilmektedir. Lazer enerjisinin etkisini gözlemlemek amacıyla, lazersiz ve lazerli olmak üzere akışın içerisindeki basınç dalgalanmaları periyodikleştikten sonra 6 Rossiter periyodu boyunca elde edilmiş olan basınç değerleri kullanılmış ve ses basınç seviyeleri dağılımları karşılaştırılmıştır.

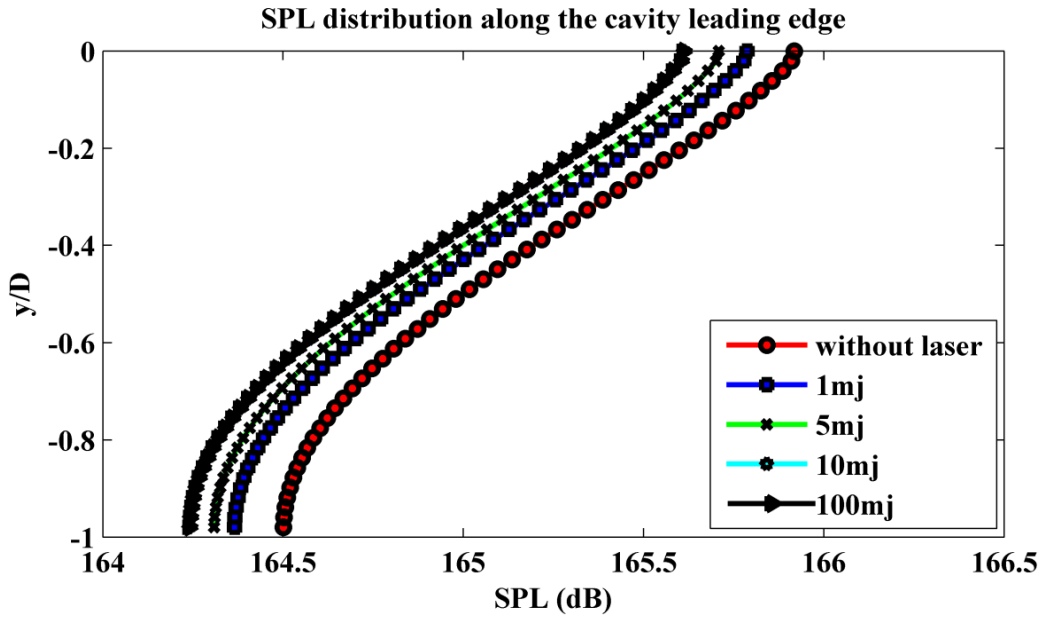
Farklı büyüklükte lazer enerjisi miktarları akışa kavite ön kenarının hemen üstünden verildikten sonra ve lazersiz akış için Şekil 3.3' te belirtilen noktalardan elde edilmiş basınç verileri kullanılarak ses basınç seviyeleri elde edilmiştir. Kavite alt duvarı boyunca elde edilen ses basınç seviyeleri dağılımı Şekil 3.4'te, arka duvarı boyunca elde edilmiş ses basınç seviyeleri dağılımı Şekil 3.5'te ve ön duvarı boyunca elde edilmiş ses basınç seviyeleri dağılımı Şekil 3.6'da verilmektedir.



Şekil 3.4. Kavite alt duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımı (1mJ, 5mJ, 10m ve 100mJ ve lazersiz)



Şekil 3.5. Kavite arka duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımı (1mJ, 5mJ, 10mJ ve 100mJ, lazersiz)

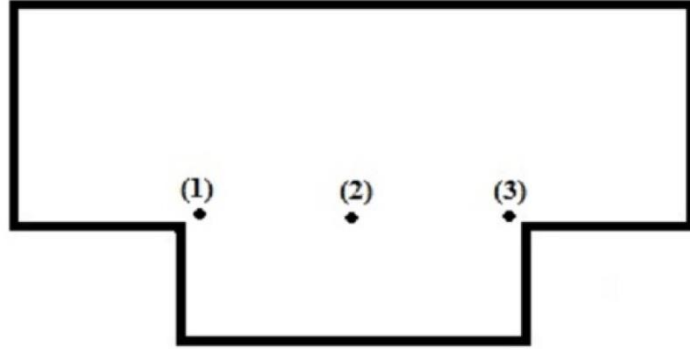


Şekil 3.6. Kavite ön duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımı (1mJ, 5mJ, 10mJ ve 100mJ, lazersiz)

Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 incelendiğinde, farklı enerji büyüklükleri akışa giriş kenarının hemen üzerinden uygulandıktan sonra, elde edilen ses basınç seviyeleri dağılımları çok büyük farklılıklar göstermemiştir. Lazersiz durum ile lazer verilen durumlar arasında çok düşük değerlerde dB farklılıkları oluşmuştur. Bunun nedeni olarak lazer uygulanan bölge ya da lazerin akışa periyot başı sadece bir kez verilmesi ve ya konumun etkin bir konum olmaması ihtimalleri doğmuştur. Diğer enerji değerlerine göre biraz daha fazla farklılık gösteren 100mJ değeri en etkin olabilecek enerji büyüklüğü olarak öngörülmüştür.

3.1.2 Farklı Lazer Enerji Bırakım Konumlarının Etkileri

Lazer enerjisinin kavite ön duvarının hemen üstünden akışa uygulanmasının sonucunda lazersiz kavite akışı üzerinde çok büyük etkiler elde edilememiştir. Bunun üzerine ilk konum dışında yine kavitenin hemen üzerinde iki farklı konumdan daha lazer enerjisi verilmiş ve etkileri incelenmiştir. Lazer uygulanan noktalar Şekil 3.7’ de gösterilmektedir.

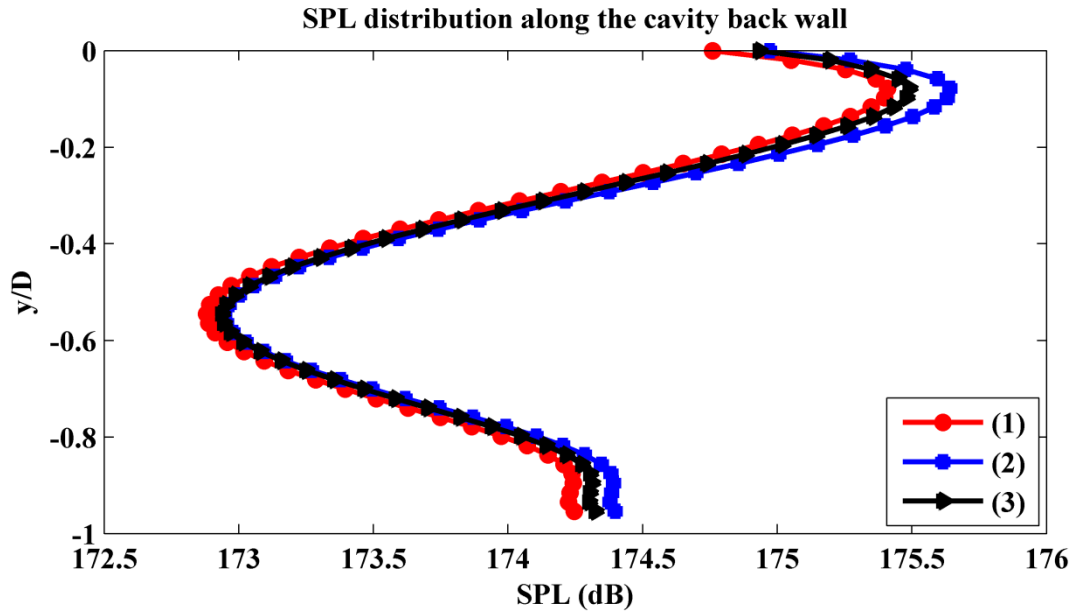


Şekil 3.7. Lazer bırakımı gerçekleşen konumlar

- (1) : Kavite ön duvarının hemen üstü
- (2) : Kavitenin hemen üstünde orta bölge
- (3) : Kavite arka duvarının hemen üstü

Lazer uygulanan noktalar, akışın kavite içerisine girip çıktığı bölgeleri etkileyebilecek ve kavite üzerinde oluşan kesme tabakasını etkileyebilecek şekilde seçilmiştir. Lazer enerjisinin miktarı araştırmasında olduğu gibi lazer enerjisi her Rossiter periyodu başında bir kez olmak üzere 6 Rossiter periyodu boyunca akışa verilmiştir.

Şekil 3.7’ de verilen noktalar dikkate alınarak üç farklı noktadan ayrı ayrı lazer enerjisi akışa uygulanmıştır. HAD analiz sonuçları kavite içerisinde en kritik basınç değerlerinin ve dalgalanmalarının kavite arka duvarında ortaya çıktığını göstermektedir. Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 incelendiğinde yine kavite arka duvarında yüksek ses basınç seviyeleri dağılımları ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle kavite arka duvarındaki ses basınç seviyelerindeki değişimler önemlidir. Farklı noktalardan, 100mJ büyüklüğünde verilen lazer enerjileri sonucunda arka duvar boyunca elde edilmiş ses basınç dağılımları Şekil 3.8’de verilmektedir.



Şekil 3.8. Kavite arka duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımı (Farklı lazer bırakım konumları)

Şekil 3.7’de verilen noktalardan kaviteye lazer enerjisi bırakımının sonucunda önemli farklılıkların oluşmadığı ortaya çıkmıştır. Lazer enerjisinin kavite ön kenarının

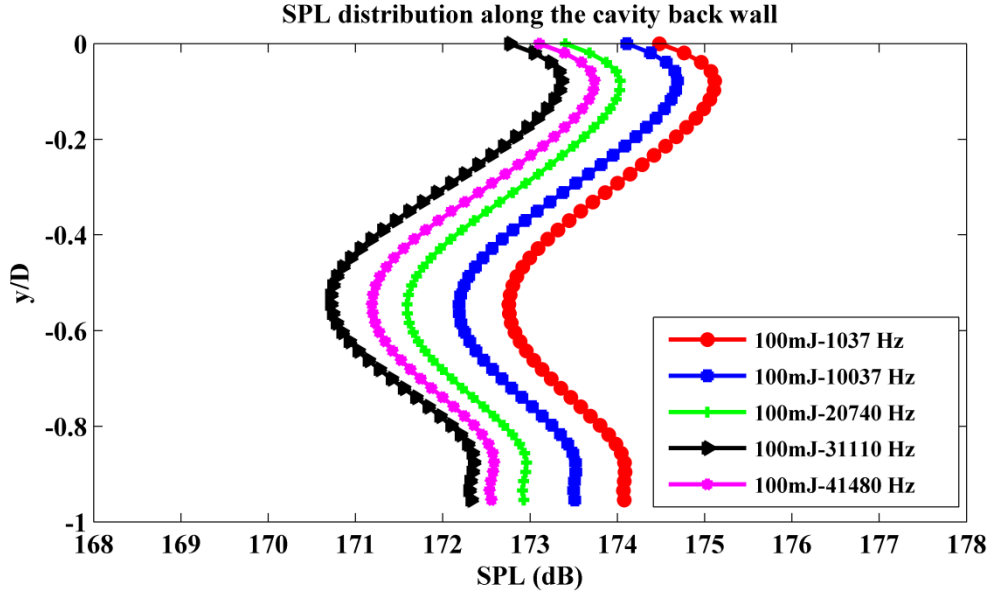
hemen üstünden verildiği durumda diğerlerine oranla az da olsa daha fazla düşüş ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, lazer verilmeye başlanan noktadan analizlere devam edilmiştir.

3.1.3. Farklı Frekans Değerlerinin Etkileri

Frekans parametresi lazer enerjisinin akışa periyot boyunca kaç kez verildiği ile ilgili bir parametredir. Farklı miktarlarda ve konumlarda, lazerin sadece periyot başı verilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar ile lazersiz kavite akış analizi sonucunda elde edilen sonuçlar kıyaslandığında önemli farklılıklar gözlemlenmemiştir. Bu nedenle lazerin akış alanı içerisinde etkisinin kısa sürüyor olma ihtimali üzerine lazer enerjisi akışa periyot boyunca birden fazla olmak üzere uygulanmıştır.

Frekans etkileri incelenirken, 1037, 10037, 20740, 31110 ve 41480 Hz değerindeki frekans değerleri değerlendirilmiştir. HAD analizleri sonucunda bir Rossiter frekans değeri 1037 Hz olarak bulunmuştur. Bu değer dikkate alındığında, örneğin 1037 Hz frekans değeri lazerin akışa bir Rossiter periyodu boyunca 1 kez verildiği, 10037 Hz değeri ise periyot boyunca eşit aralıklarla 10 kez verildiği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla frekans değerleri Rossiter frekans değerine göre boyutsuzlaştırılırsa, 1, 10, 20, 30 ve 40 kez olmak üzere lazerin akışa verildiği çalışmalar yapılmıştır. Lazer enerjisinin akışa periyot boyunca birden fazla verilmesi uzun bir prosesin oluşmasına neden olduğundan dolayı önceki analizlerde 6 Rossiter periyodu boyunca lazer enerji bırakım işlemi gerçekleştirilirken, bu değerlendirmede başlangıç olarak 2 Rossiter periyodu boyunca lazer enerjisi akışa verilmiş ve arka duvar boyunca elde edilen ses basınç seviyeleri karşılaştırılmıştır.

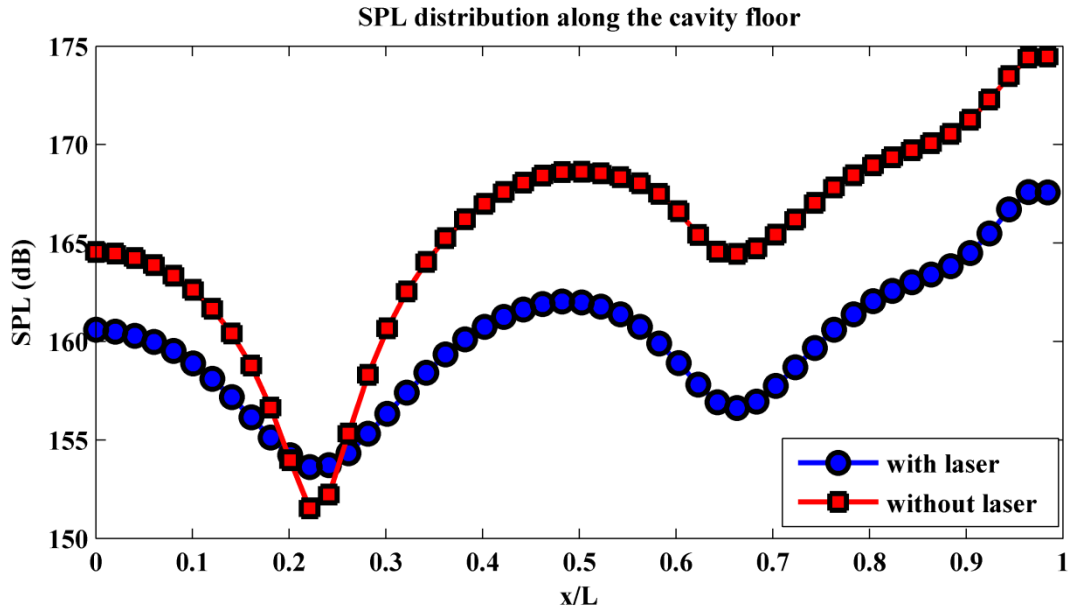
Şekil 3.9'da farklı frekans değerleri altında akışa lazer enerjisi verilmesi sonucu elde edilen arka duvar ses basınç seviyeleri verilmektedir. Enerji miktarı değerlendirmesi sonucu seçilen 100mJ enerji değeri akışa uygulanmıştır.



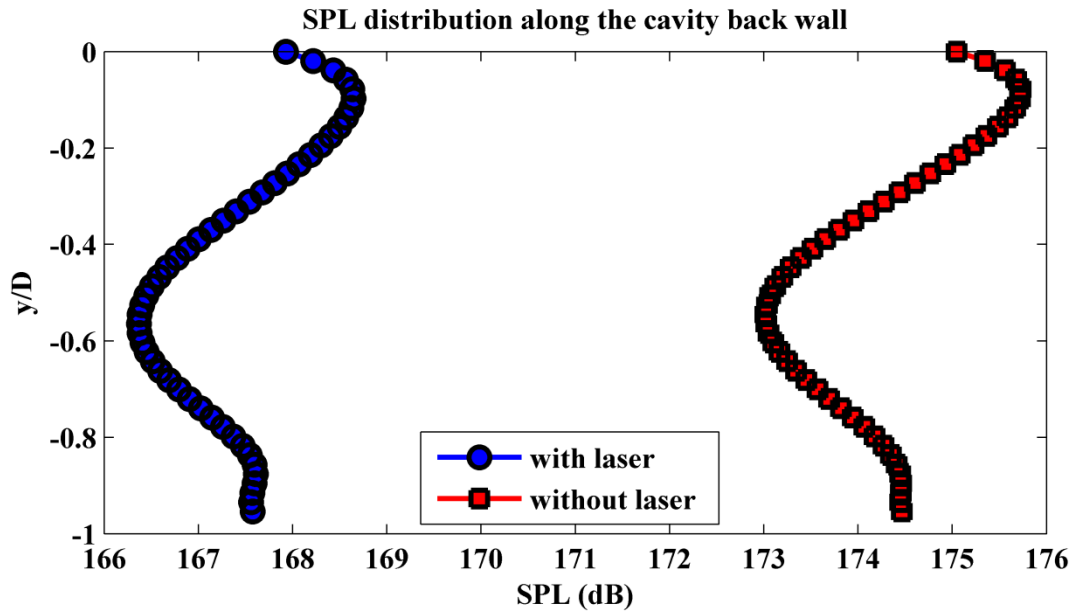
Şekil 3.9. Kavite arka duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımı (Farklı frekans değerleri)

Şekil 3.9’ da görüldüğü üzere, 100mJ enerji değeri altında 31110 Hz frekans değerinde 1037Hz frekans değerine göre yani lazerin akışa periyot boyunca bir kez verilmesine göre kavite arka duvarında yaklaşık 2.5dB’ e varan daha fazla düşüş elde edilmiştir. 31110 Hz frekans değerinde yani lazerin akışa bir Rossiter periyodu boyunca 30 kez verildiği durumda, lazersiz duruma göre 3dB civarında düşüş olması lazerin bu şartlar altında etkili olabileceğini ortaya koymuştur.

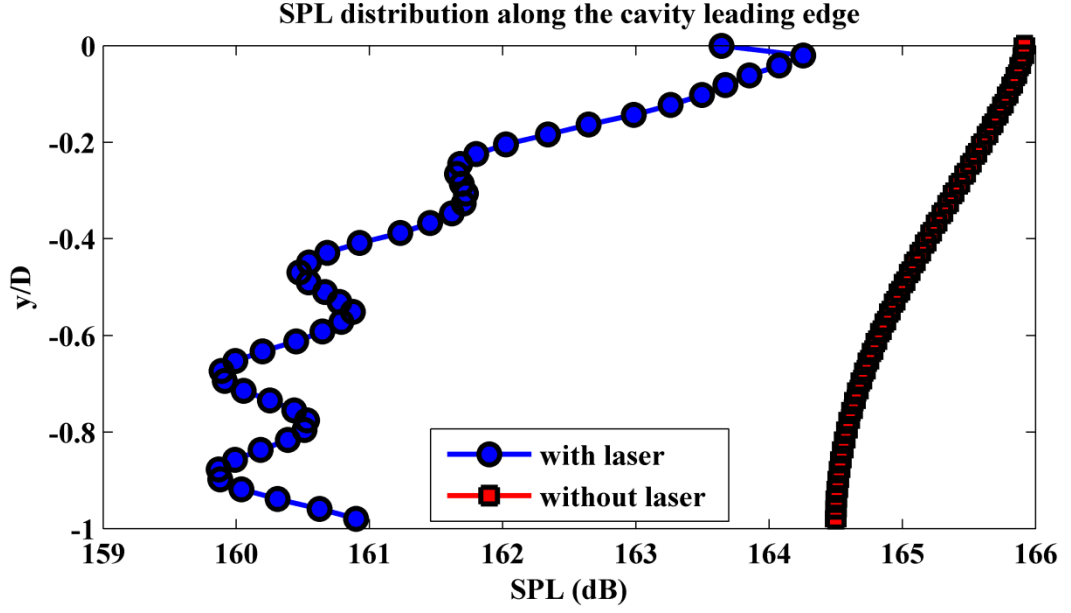
Kavite akışı sırasında en kritik basınç değerlerinin oluştuğu arka duvar boyunca ses basınç seviyelerinde düşüş elde edilmiştir. Lazer enerjisinin periyot içerisinde birden çok kez verilmesi işlemi uzun bir süreç olduğundan lazerin değişik frekanslarda etkinliğini anlamak amacı ile başlangıç için sadece iki periyotluk bir süreç değerlendirilmiştir. Etkin frekans değeri tesbit edildikten sonra, 31110 Hz değeri ele alınarak daha önceki çalışmalarda olduğu gibi 100 mJ enerji değeri akışa her periyotta 30 kez verilmek üzere 6 Rossiter periyodu boyunca uygulanmıştır. Kavite ön, alt ve arka duvarları boyunca elde edilen ses basınç seviyeleri dağılımlarının lazersiz durum ile karşılaştırılmış grafikleri Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’ de verilmektedir.



Şekil 3.10. Kavite alt duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımları (31110 Hz-
lazer ile lazersiz karşılaştırma)



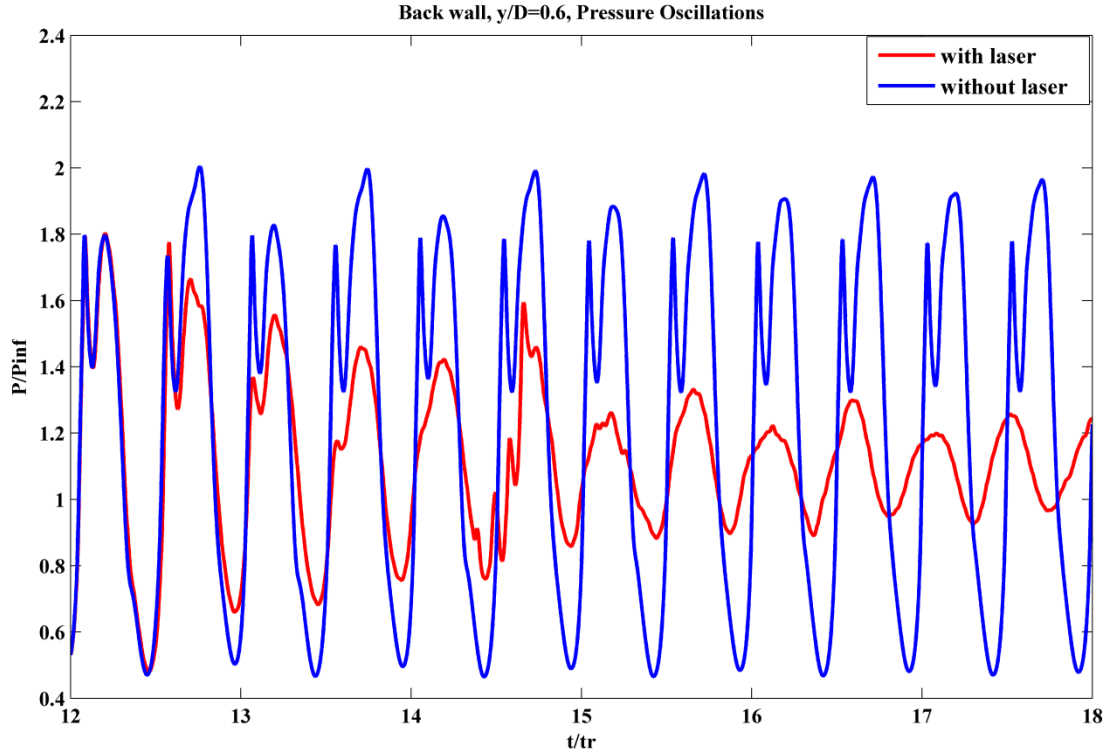
Şekil 3.11. Kavite arka duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımları (31110 Hz-
lazer ile lazersiz karşılaştırma)



Şekil 3.12. Kavite ön duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımları (31110 Hz-
lazer ile lazersiz karşılaştırma)

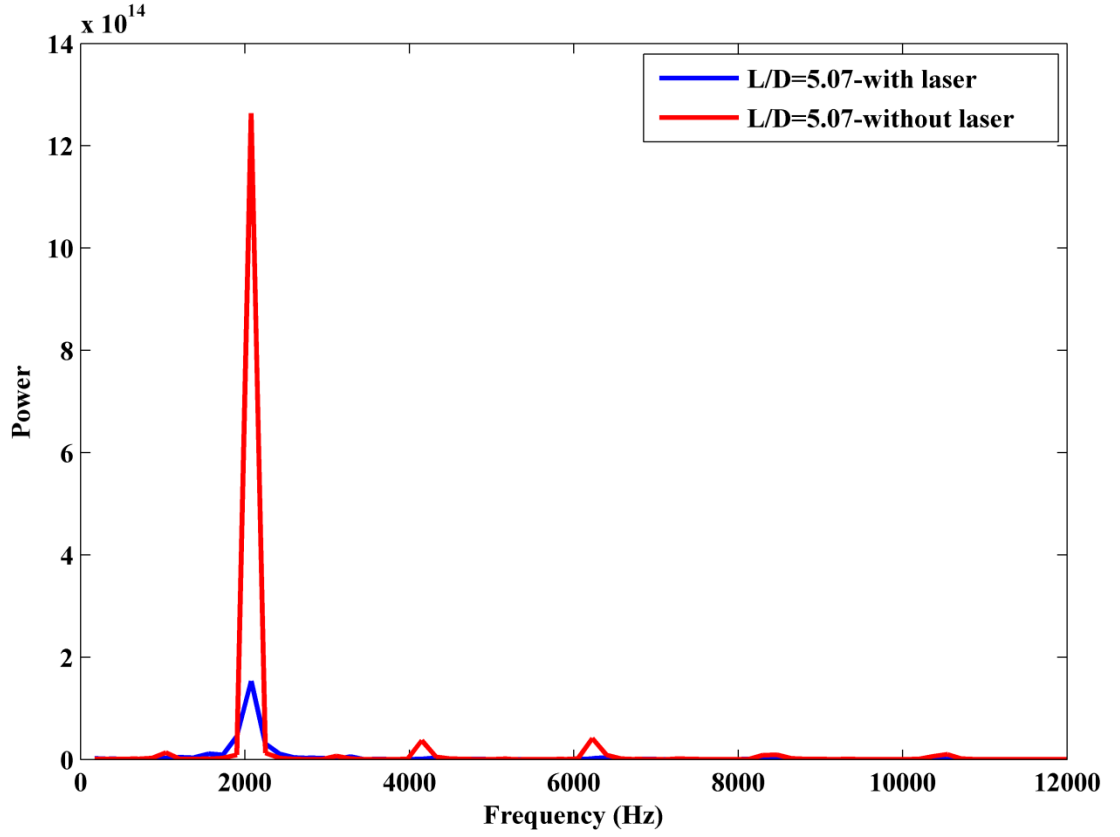
100mJ lazer enerjisi kavite ön duvarının hemen üstünden akışa periyot başına 30 kez olmak üzere 6 periyot boyunca verildiğinde kavite arka duvarında 7dB'e yakın düşüş elde edilmiştir. Aynı şekilde alt duvar boyunca 8dB'e varan düşüşler, ön duvar boyunca da 5dB'e kadar düşüşler elde edilmiştir. Arka ve alt duvarda genel basınç dağılım eğilimi korunurken ön duvarda ses basınç seviyeleri dağılımı dalgalanma göstermiştir. Bunun nedeni lazer verilen konumun ön duvarın hemen üstü olması olasıdır.

Kavite arka duvarı, $y/D = 0.6$ noktası üzerinden HAD analizleri sonucunda elde edilmiş olan basınç dalgalanmaları ile lazer verildikten sonra ortaya çıkan basınç dalgalanmaları karşılaştırılmıştır. Şekil 3.13'te görüldüğü gibi ortaya çıkan basınç dalgalanmaları genlikleri lazer enerjisi bırakımı sonrasında giderek azalma göstermiş ve daha düzgün sinüsoidal bir yapı haline gelmiştir. Bu durum ses basınç seviyeleri dağılımları incelendiğinde beklenen bir durumdur.



Şekil 3.13. Kavite arka duvarı, $y/D=0.6$ konumu, basınç dalgalanmaları (lazerli-lazersiz karşılaştırma)

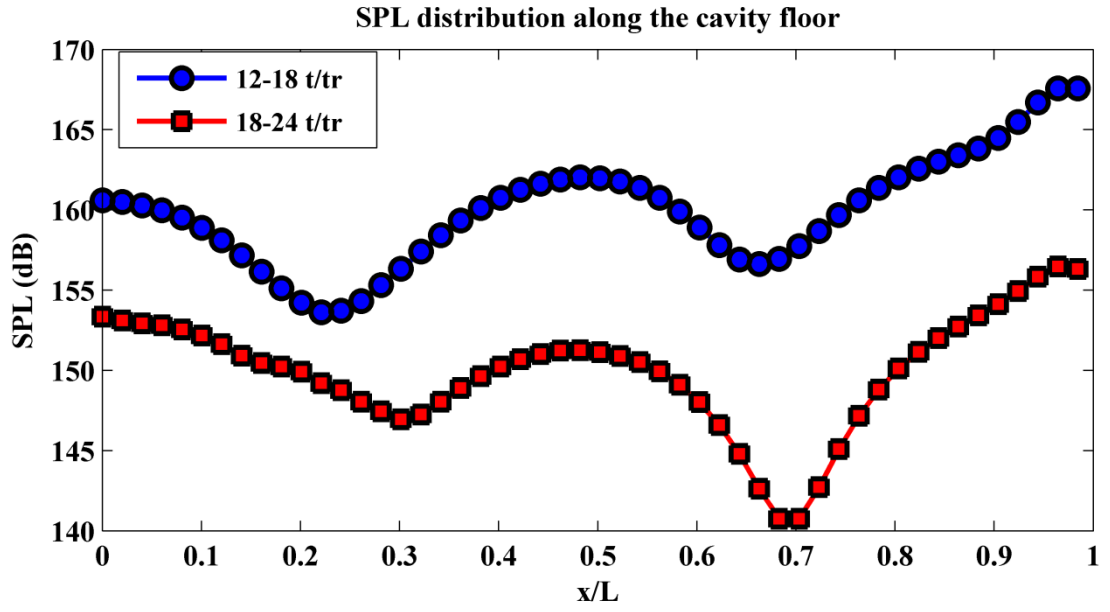
L/D oranı 5.07 olan süpersonik kavite akışında baskın frekans değerini belirleyebilmek amacı ile yapılan hızlı fourier dönüşümü sonucunda elde edilen güç-frekans grafiği Şekil 3.14'te verilmektedir. Akışa lazer enerjisi bırakımı sonrası kavite içerisinde ortaya çıkan basınç verilerine hızlı fourier dönüşümü uygulanarak güç-frekans grafiği elde edilmiş ve baskın modlar gözlemlenmiştir. Şekil 3.66'ya bakıldığında, lazer enerjisi bırakımı sonrasında güç genliklerinin düştüğü görülmektedir. Bunun yanı sıra baskın mod değerinin aynı kaldığı diğer mod değerlerinin ise ufak değişiklikler gösterdiği görülmektedir. Bu durum lazer enerjisi verildiğinde akışın periyot değerlerinin değişmesi olasılığını ortaya çıkarmaktadır.



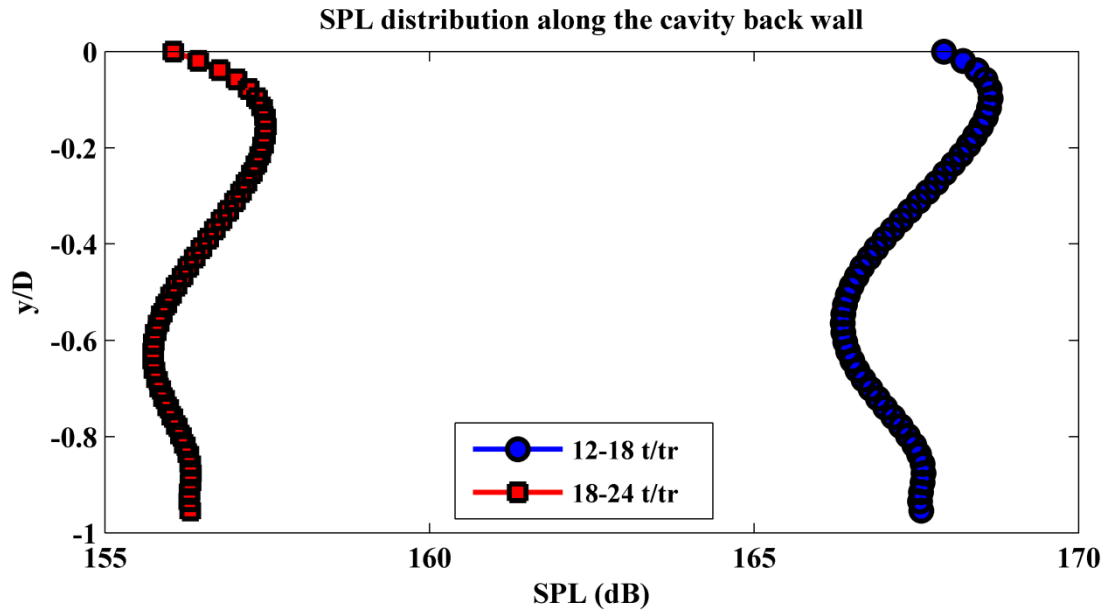
Şekil 3.14. Güç-frekans grafiği, lazerli ve lazersiz karşılaştırma

3.1.4. Lazer Bırakım Süresinin Etkileri

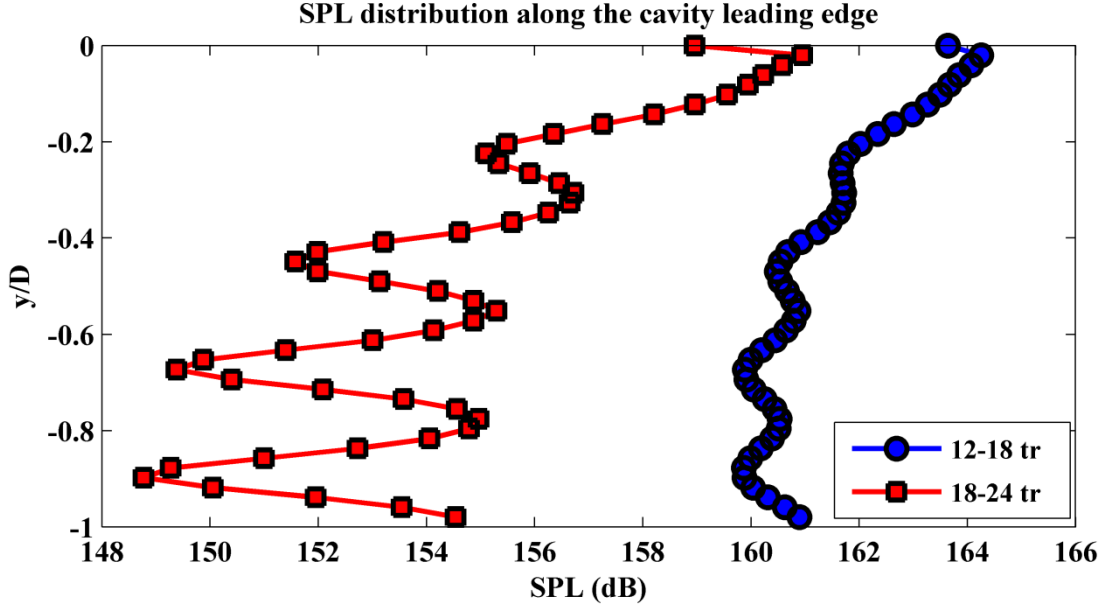
Lazerin etkilerinin incelendiği çalışmalar genellikle akış periyodikleştikten sonra 6 periyot süresi boyunca gerçekleştirilmiştir. Lazer bırakımı 6 periyot ilave bir zaman periyodu için daha gerçekleştirilerek lazer enerji bırakımının süresinin etkileri gözlemlenmiştir. Lazer enerjisi 12-24. periyotlar arası olmak üzere 12 periyot boyunca uygulanmıştır. Öncelikle ilk 6 periyot ile son 6 periyot boyunca elde edilmiş ses basınç seviyeleri karşılaştırılmıştır. Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17' de ses basınç seviyeleri dağılımları ve karşılaştırmalar verilmektedir.



Şekil 3.15. Kavite alt duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımları (12-18. periyot arası ile 18-24. periyot arası karşılaştırma)



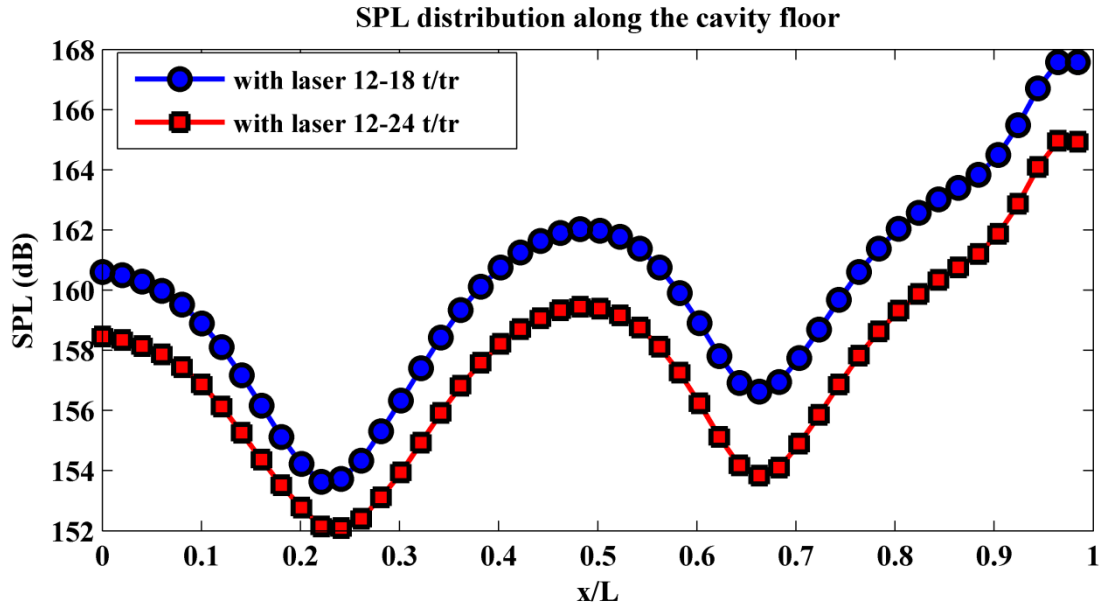
Şekil 3.16. Kavite arka duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımları (12-18. periyot arası ile 18-24. periyot arası karşılaştırma)



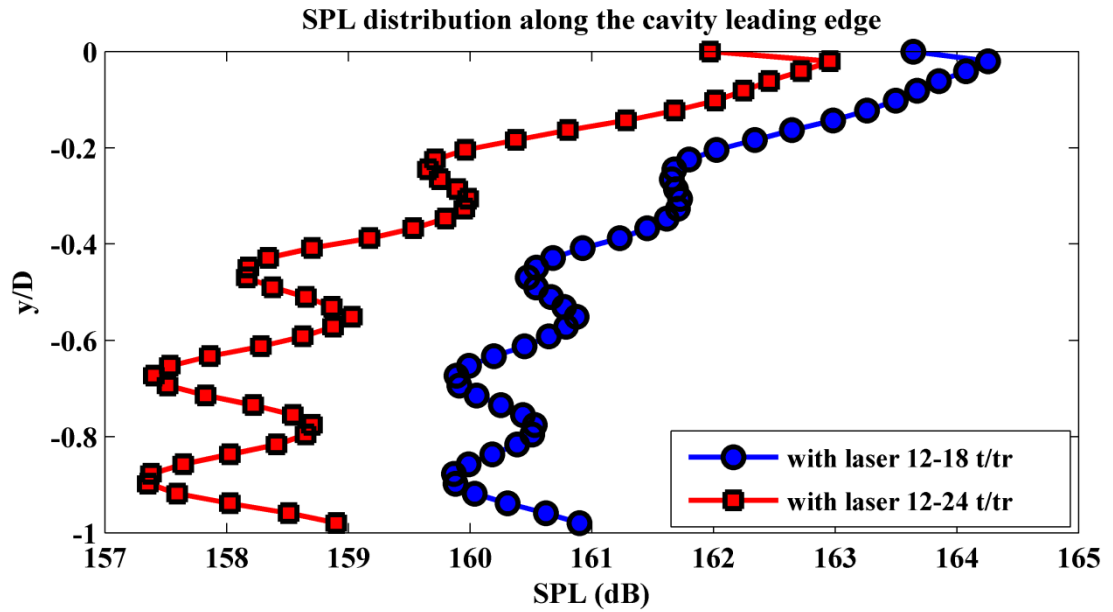
Şekil 3.17. Kavite ön duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımları (12-18. periyot arası ile 18-24. periyot arası karşılaştırma)

Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17 incelendiğinde, ilk 6 periyot boyunca elde edilen ses basınç seviyeleri ile son 6 periyot boyunca oluşan ses basınç seviyelerinin farklı olduğu görülmektedir. Yeterli olabileceği düşünülen 6 periyotluk veri toplulukları sonucunda elde edilen ses basınç seviyeleri kıyaslamasının farklı olması lazer enerjisi verildikten sonra akış periyodunun değiştiği ihtimalini ortaya koymaktadır.

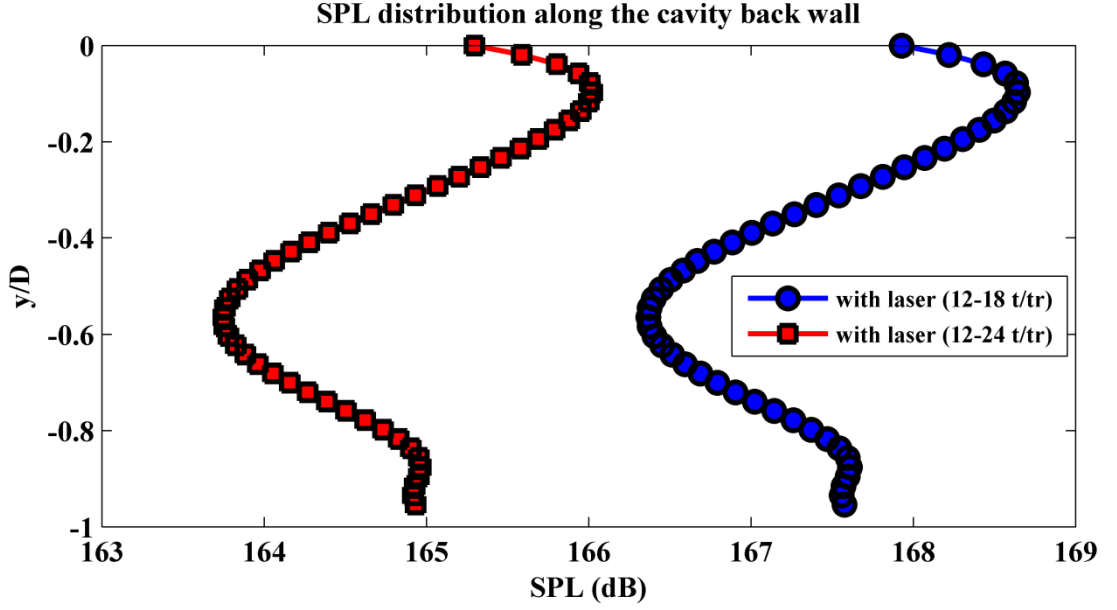
Lazer verildikçe akış alanındaki ses basınç seviyelerinin 6 periyottan sonra düşmeye devam edip etmeyeceği, lazerin ilave bir 6 periyot için daha uygulanması sonucu elde edilen ses basınç dağılımlarından anlaşılmaktadır. Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20' de ses basınç seviyeleri dağılımları verilmektedir.



Şekil 3.18. Kavite alt duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımları (12-18. periyot arası ile 12-24. periyot arası karşılaştırma)



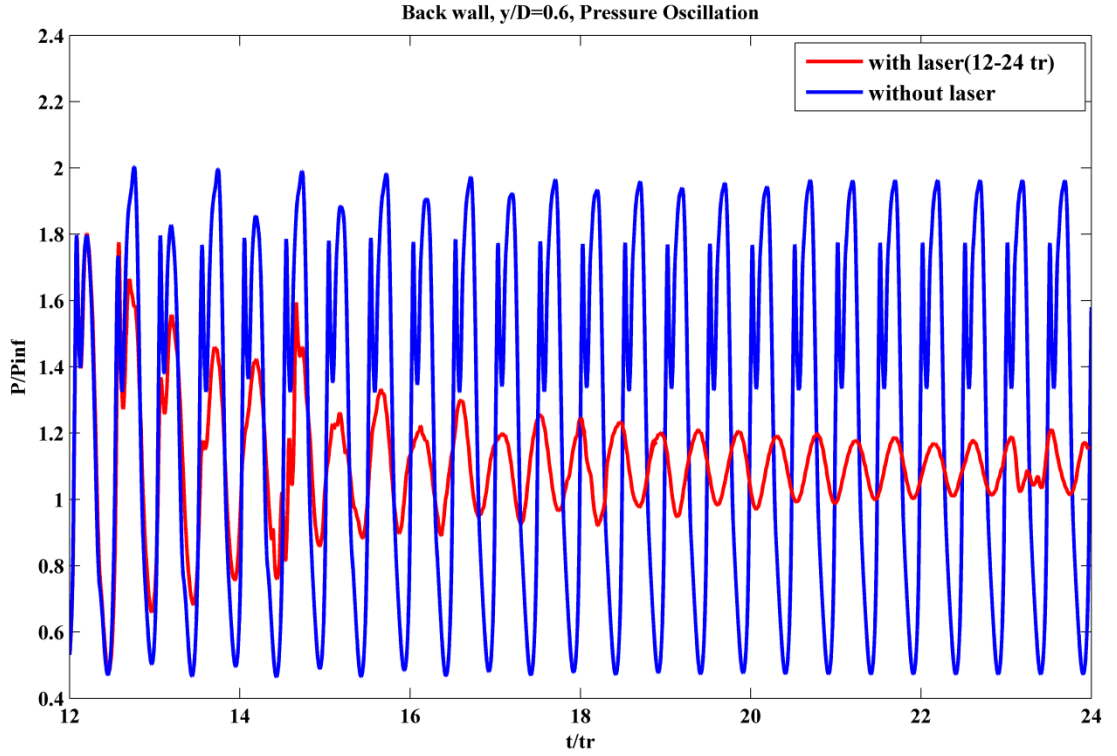
Şekil 3.19. Kavite ön duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımları (12-18. periyot arası ile 18-24. periyot arası karşılaştırma)



Şekil 3.20. Kavite arka duvarı boyunca ses basınç seviyeleri dağılımları (12-18. periyot arası ile 18-24. periyot arası karşılaştırma)

Sürenin etkisini daha iyi gösterebilecek olan karşılaştırma yapılmıştır. 12-18. Periyotlar arasındaki ses basınç seviyeleri ile 12-24. Periyot arasındaki ses basınç seviyeleri karşılaştırılmıştır. Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20 incelendiğinde, lazer enerjisi verilmeye devam ettikçe ses basınç seviyelerinde düşüşünde devam ettiği görülmektedir. Kavite arka duvarı boyunca yaklaşık 2.5 dB daha düşüş görülmektedir. Ön ve alt duvarda ise 2 dB' e kadar düşüşler elde edilmiştir.

Kavite içerisindeki basınç dalgalanmalarının lazer enerjisi verildikçe değiştiği görülmüştür. Şekil 3.21 incelendiğinde, lazer enerjisi bırakım prosesi devam ettirildikçe basınç dalgalanmalarının genliğinin de azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.21. Kontrollü ve kontrolsüz durum için basınç dalgalanmaları (12-24. periyot arası)

Basınç dalgalanmaları lazer bırakım süreci devam ettirildiği süre zarfı boyunca azalmaktadır. Basınç salınımlarında meydana gelen genlikteki düşüşlerde gittikçe azalmaktadır fakat devam etmektedir. Bu durum lazer enerjisi bırakımının araştırılan süre zarfı içerisinde yakınsamadığını göstermektedir.

4. UYGUN DİKGİN AYRIŞTIRMA YÖNTEMİ SONUÇLARI

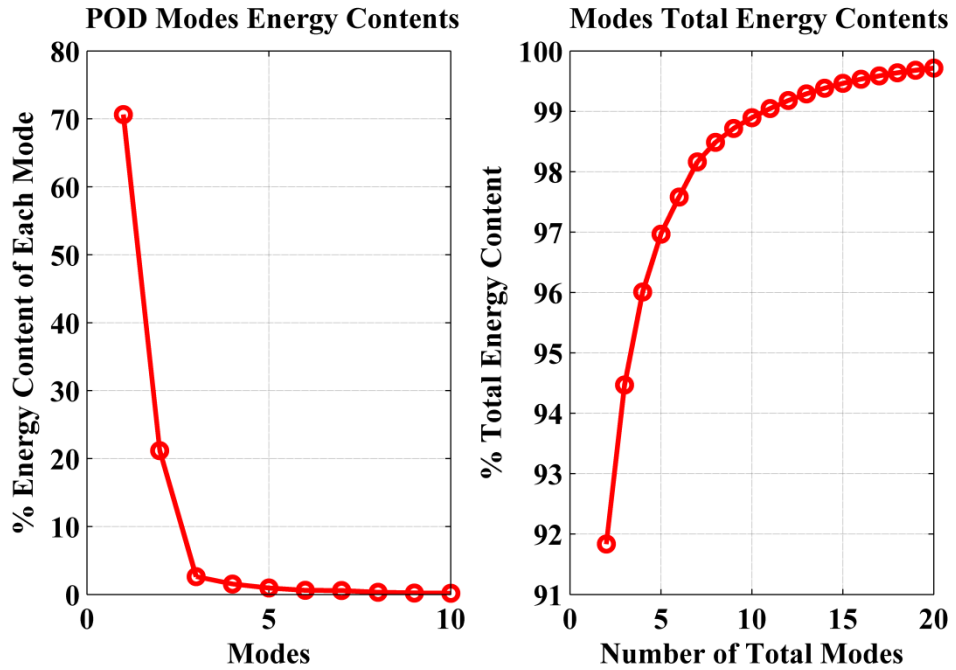
Uygun Dikgen Ayırıştırma yönteminin HAD analizi sonuçlarına uygulanabilmesi amacı ile Bölüm 2.3’de verilen DAY teorisi dikkate alınarak EK-2 ‘de verilen kod kullanılmıştır. DAY yöntemi öncelikle çalışmanın temelinde yatan L/D oranı 5.07 olan kavite akışı için uygulanmıştır. Daha sonra aynı kavite konfigürasyonun, kontrollü HAD sonuçlarına DAY uygulanmıştır. Lazerli ve lazersiz kavite akışı arasındaki farklar DAY kullanılarak sunulmuştur. Bir boyutlu DAY uygulanarak sensör konumları belirlenmiştir. HAD analizleri önceden gerçekleştirilmiş farklı

kavite geometrilerine DAY uygulanarak L/D oranının kavite akışı üzerine etkisi ortaya konulmuştur.

Uygun Dikgen Ayrıştırma yönteminin çalışma boyunca uygulanmasında, öncelikle HAD analizleri sonucunda kavite bölgesinden elde edilmiş veriler, kavite bölgesini temsil eden eşit aralıklı noktalardan oluşan bir bölgeye interpolasyon uygulanarak yerleştirilmektedir. Daha sonra veri topluluğuna DAY uygulanmaktadır.

4.1. L/D Oranı 5.07 Olan Kavite Akışının DAY Sonuçları

DAY akış periyodikleştikten sonra 6 Rossiter periyodu boyunca kavite içerisinde toplanan x-hız verilerine uygulanmıştır. İlk olarak sistemi temsil edebilecek olan kip sayısına karar vermek amacı ile DAY sonucu elde edilen kiplerin enerji içerikleri incelenmiştir.



Şekil 4.1. Kiplerin Sahip Oldukları Enerji İçerikleri ve Toplamı (L/D=5.07)

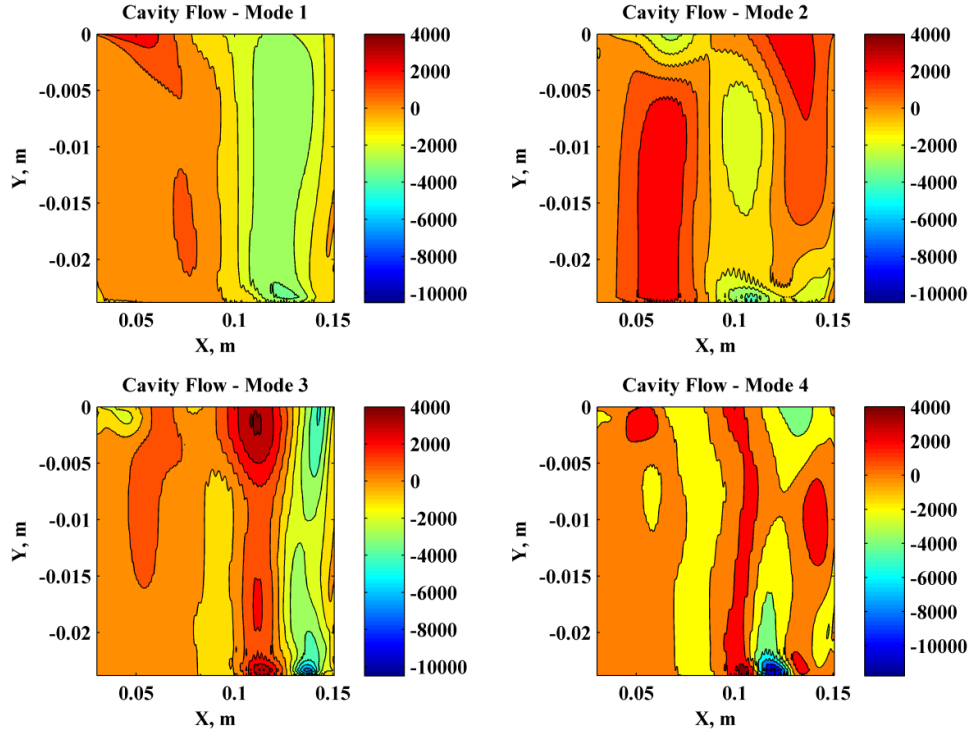
Çizelge 4.1’de sistemi temsil edebilecek olan kiplerin enerji içerikleri görülmektedir. Sistemin toplam enerjisinin % 96 gibi bir dilimi 4 kip ile sağlanabilirken, % 99 unu

temsil edebilmek için 12 kip gerekmektedir. İlk 4 kip'ten sonra görüldüğü gibi enerji içerikleri düşmektedir. Bu düşük enerji içerikli kipler, akış içerisindeki küçük yapıları temsil etmektedir. Akışın türbülanslı olmasından dolayı, akışın genel karakteristiğini etkileyen bu küçük yapılar ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 4.1. L/D=5.07 Kavite, DAY kipleri enerji içerikleri

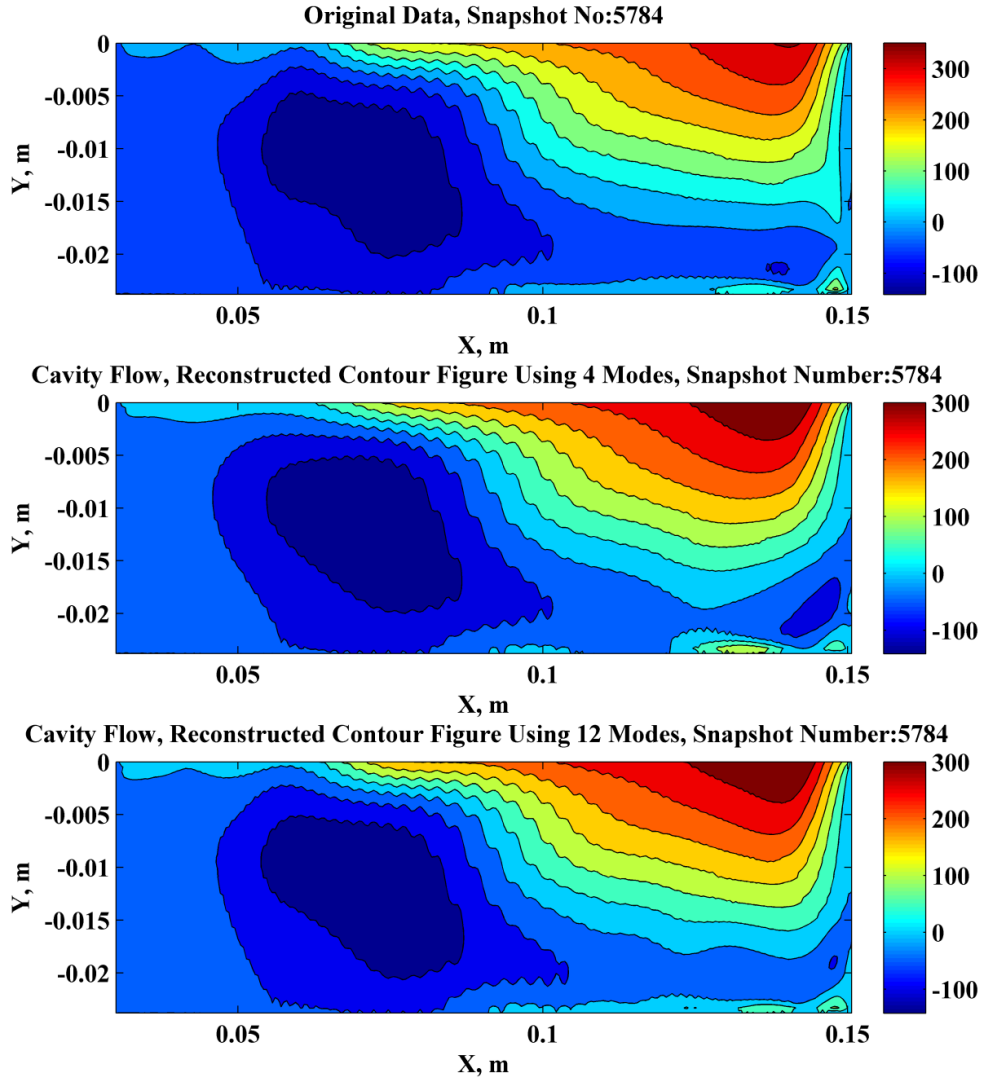
Kip Sayısı	Enerji İçeriği, %(/96)	Enerji İçeriği, %(/99)
1	70.65	70.65
2	21.29	21.29
3	2.63	2.63
4	1.54	1.54
5	-	0.96
6	-	0.61
7	-	0.58
8	-	0.32
9	-	0.23
10	-	0.18
11	-	0.15
12	-	0.13

L/D=5.07 olan kaviteye, DAY uygulanması sonucunda elde edilen en yüksek enerjili ilk 4 kip Şekil 4.2'de verilmektedir. Bu görüntüler, akış içerisindeki baskın yapıların konumsal olarak etkinliklerinin bir ifadesidir. Görüldüğü gibi kenarları tırtıklı yapılar elde edilmiştir. Bu yapıların oluşmasının nedeni ise akışın türbülanslı olmasıdır. Şekil 4.2'de verilen kip görüntülerine bakıldığında karmaşık yapıların olduğu görülmektedir. Görülen yapıların hepsi kavite akış alanı içerisinde bulunan olgulardır. Her bir yüksek enerjili kip içerisinde kavite akışının barındırdığı baskın olguları yansıtmaktadır. Bu kipler üst üste toplandığında orjinal kavite akışına yaklaşılmaktadır.



Şekil 4.2. $L/D=5.07$, Kavite akışı DAY kipleri

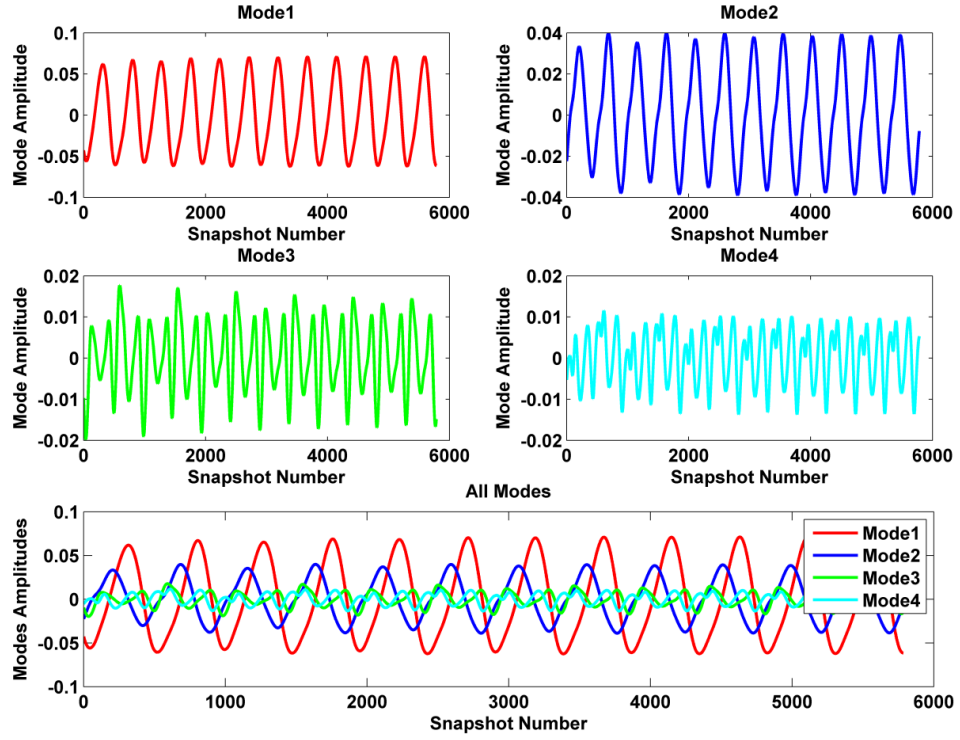
DAY uygulanması sonucunda elde edilen kipler kullanılarak sistem yeniden yapılandırılmaktadır. Elde edilen indirgenmiş sistem ile HAD analizleri sonucu elde edilmiş x-hız konturları Şekil 4.3'te verilmektedir.



Şekil 4.3. Orijinal ve DAY sonucu 4 kip ve 12 kip kullanılarak yeniden yapılandırılmış x-hız konturları

Şekil 4.3' te görüldüğü üzere, ayrı ayrı 4 kip ve 12 kip kullanılarak elde edilen konturlar arasında küçük farklılıklar vardır. Bu durum ilk 4 kipi sistemin genel karakteristiğini yansıtabilecek enerji içeriğine sahip olması olarak yorumlanabilir. Bu tür akışların kontrol temelinde, büyük yapılarının kontrol edilmesi ile küçük yapılarında zaten kontrol edildiği düşüncesi yatmaktadır. Bu nedenle, akışta büyük yapıları temsil eden ilk 4 kip ile sistemin yeniden tanımlanmasının kontrol amaçlı işlemler için yeterli olabileceği düşünülmektedir.

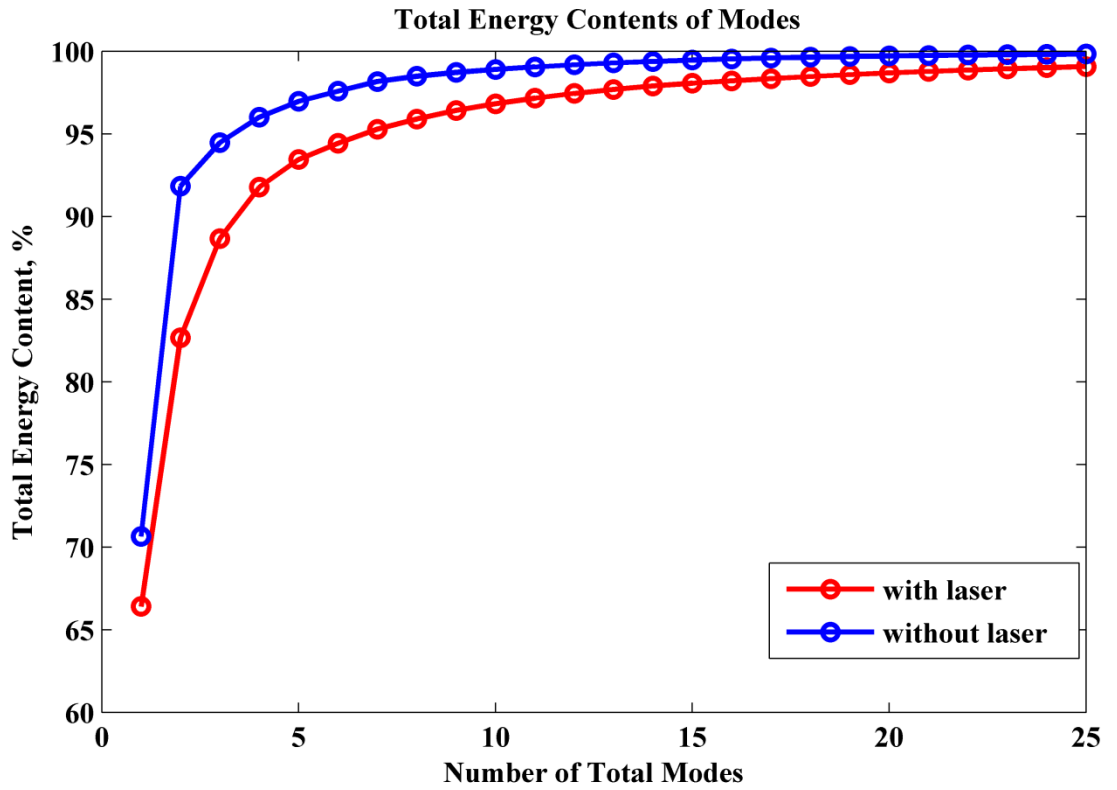
DAY sonucunda elde edilen zaman katsayıları akış içerisindeki baskın yapıların zamanla değişim karakteristiklerini temsil etmektedir. Şekil 4.4’ te $L/D = 5.07$ olan ses üstü kavite akışı için elde edilmiş olan kiplerin zaman içerisindeki hareketlerini temsil eden grafikler verilmektedir. Kip 1 ve Kip 2 sinüzoidal periyodik bir salınım gösterirken, enerji içerikleri daha düşük olan Kip 3 ve Kip 4 periyodik fakat düzgün olmayan dalgalanmalar göstermektedir. Bunun nedeni küçük türbülans yapılarının etkileridir.



Şekil 4.4. $L/D=5.07$, Kavite akışı, zaman katsayıları geçmişi

4.2. L/D Oranı 5.07 Olan Kavite Akışının Kontrollü DAY Sonuçları ve Kontrolsüz Sonuçlar İle Kıyaslanması

Dikgen Ayırıştırma yöntemi, L/D oranı 5.07 olan kavite akışının 6 Rossiter periyodu boyunca gerçekleştirilmiş kontrollü HAD simülasyonları sonucunda elde edilen x-hız verilerine uygulanmıştır. Elde edilen kiplerin enerji içerikleri kontrolsüz sonuçlarla kıyaslamalı olarak Şekil 4.5’ te verilmektedir.



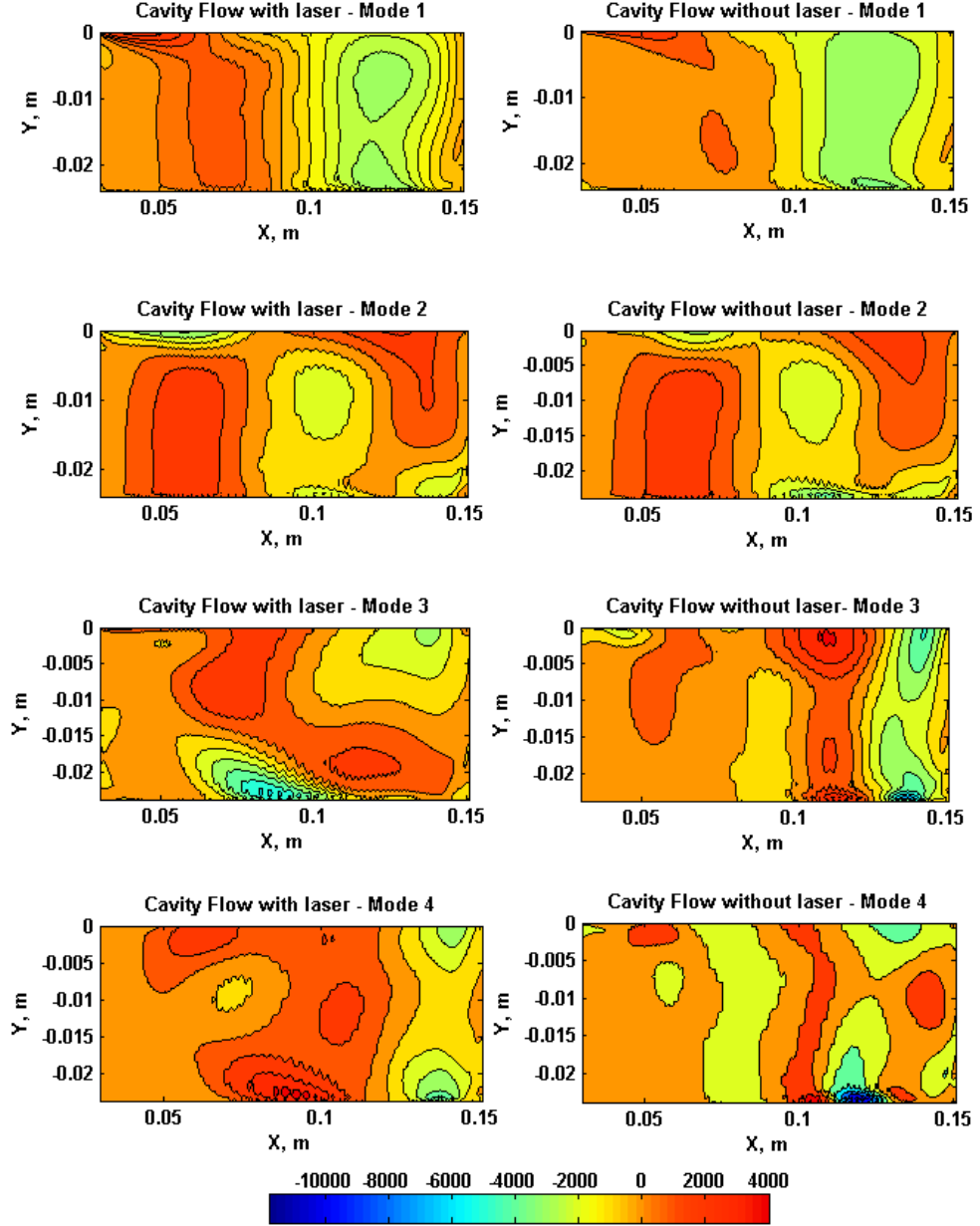
Şekil 4.5. Kontrollü ve kontrolsüz durum için DAY kiplerinin enerji içerik toplamı

Şekil 4.5 ve Çizelge 4.2’den anlaşılacağı gibi kontrollü durumda sistemin daha düşük dereceli veri topluluğu ile tanımlayabilmek için gerekli olan kip sayısı artmıştır. Sistemin yeniden tanımlanabilmesi için yeterli olabilecek %95 enerji içeriğine karşılık 7 kip kullanılması gerekmektedir. Bu sayı kontrolsüz durumda 4 kiptir.

Çizelge 4.2. Kontrollü ve kontrolsüz DAY sonucu kip sayıları ve enerji içerikleri

Kip Sayısı	1	2	3	4	5	6	7	Toplam Enerji İçeriği,%
Kontrollü, Kip Enerji İçerikleri,%	66.41	16.25	6.01	3.10	1.68	0.98	0.85	95.28
Kontrolsüz, Kip Enerji İçerikleri,%	70.65	21.19	2.63	1.54	-	-	-	96.01

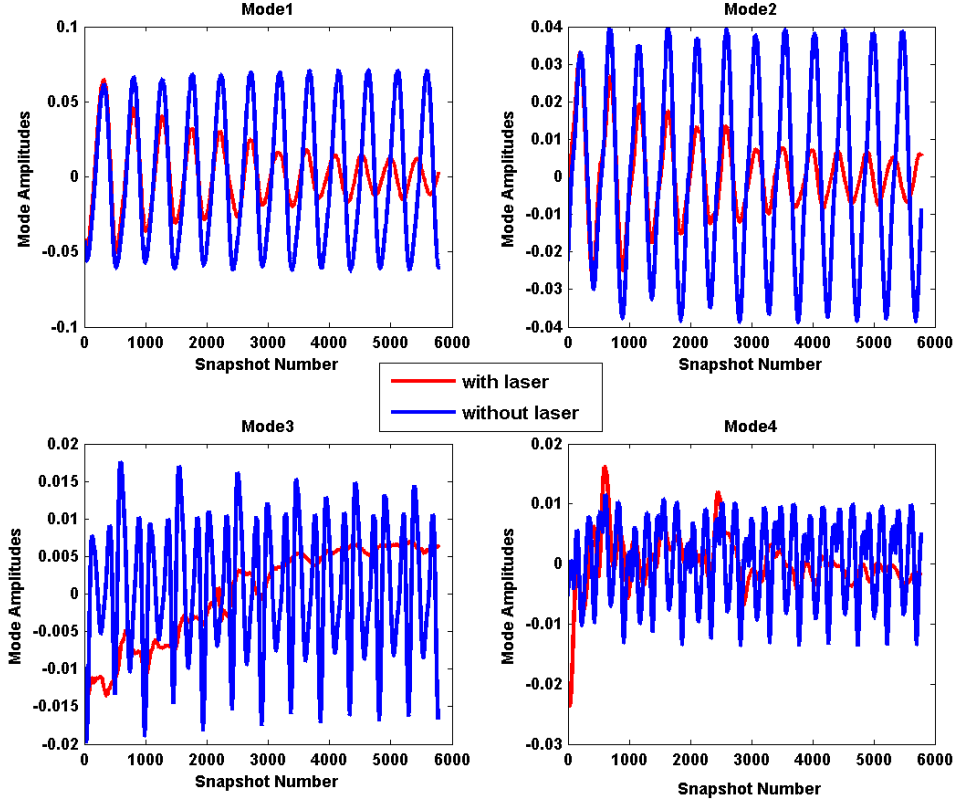
Şekil 4.6’da kontrollü ve kontrolsüz DAY sonuçları sonucu elde edilen en yüksek enerjili ilk 4 kipi karşılaştırılması verilmektedir. Çizelge 4.2 ve Şekil 4.6 kullanılarak, kontrollü ve kontrolsüz durum için elde edilen en yüksek enerjili kipler karşılaştırıldığında, ilk iki kipi akış içerisinde benzer özellikleri barındırdığı, diğer kiplerin ise farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Lazerli durumda en yüksek enerjili ilk iki kipi taşıdığı enerji içeriklerinin, lazersiz duruma göre azaldığı ve diğer kiplere dağıldığı görülmektedir. Bu durum sistemin daha çok kiple ifade edilebilmesine yol açmaktadır.



Şekil 4.6. Kontrollü ve kontrolsüz durum için DAY kiplerinin karşılaştırması

Şekil 4.7’de lazerli ve lazersiz durumlar için en yüksek enerjili ilk 4 kipi zaman içerisindeki hareketlerinin karşılaştırılması verilmektedir. Akışa lazer verilmesine paralel olarak görüldüğü üzere, ilk iki kipi genlikleri sürekli azalmıştır. Yani

kontrollü durumda zamanla, büyük yapıların hareketlerinin şiddeti azalmıştır. Diğer iki kip ise zaman içerisinde düzgün bir salınım göstermemişlerdir



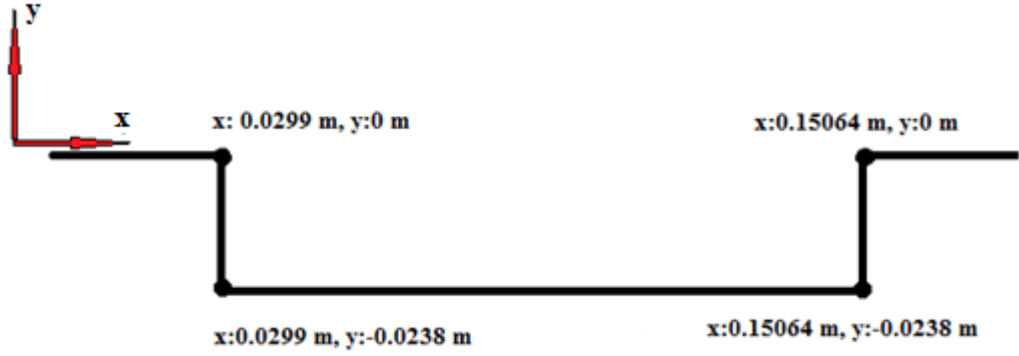
Şekil 4.7. Kontrollü ve kontrolsüz durum için zaman katsayıları karşılaştırması

4.3. Akış Kontrolü Amaçlı Sensör Yerleştirme Çalışmaları

Gerçek zamanlı bir kontrol çalışması için düzgün ve verimli bir şekilde, en az noktadan gerekli veriyi toplayabilmek önemli bir konudur. Optimum sensör konumlarını belirleyebilmek için, akışın en hareketli ve enerjisi en yüksek konumları bilmek gerekmektedir. Dikgen ayrıştırma yöntemi ile akış enerji içeriğine göre kiplerle ifade edilebilmektedir. Akışın en hareketli ve yüksek enerjili kısımları, DAY sonucu elde edilen kiplerin maksimum ve minimum noktalarına denk gelmektedir [63, 64]. Bu nedenle, sensör yerleşimleri yapılabilecek kavite duvarları üzerindeki basınç verileri toplanmış ve basınç verilerine bir boyutlu DAY yöntemi

uygulanmıştır. DAY süresi için, yine akış periyodikleştikten sonraki 6 periyotluk veri kullanılmıştır yani 5784 görüntü kullanılmıştır. Bu süreç, kontrollü ve kontrolsüz akış analizlerinin ikisi içinde uygulanmıştır.

Kavite geometrisi ve koordinatlar Şekil 4.8’de verilmektedir.



Şekil 4.8. L/D=5.07, kavite geometrisi ve koordinatlar

Dikgen ayrıştırma yönteminin lazersiz kavite akışının duvarlarında elde edilen basınç değerlerine uygulanması sonucunda elde edilen en yüksek enerjili 4 kip ve bu kiplerin minimum ve maksimum noktalarına karşılık gelen koordinatlar Çizelge 4.3’te verilmektedir.

Çizelge 4.3. Lazersiz kavite, kiplerin enerji içerikleri ve minimum, maksimum noktaları

Kip Numarası	Enerji İçerikleri,%	Koordinatlar, x(m)	Koordinatlar, y(m)
1	73.88	0.15064	-0.0023
		0.15064	-0.0139
		0.0986	-0.0238
		0.1473	-0.0238
2	19.02	0.15064	-0.0046
		0.0866	-0.0238
		0.119	-0.0238
		0.1478	-0.0238
3	2.24	0.15064	-0.0185
		0.0810	-0.0238
		0.1009	-0.0238
		0.1251	-0.0238
Toplam,%	95.14	-	-

Dikgen ayrıştırma yönteminin lazerli kavite akışının duvarlarında elde edilen basınç değerlerine uygulanması sonucunda elde edilen en yüksek enerjili 4 kip ve bu kiplerin minimum ve maksimum noktalarına karşılık gelen koordinatlar Çizelge 4.4’te verilmektedir.

Çizelge 4.4. Lazerli kavite, kiplerin enerji içerikleri ve minimum, maksimum noktaları

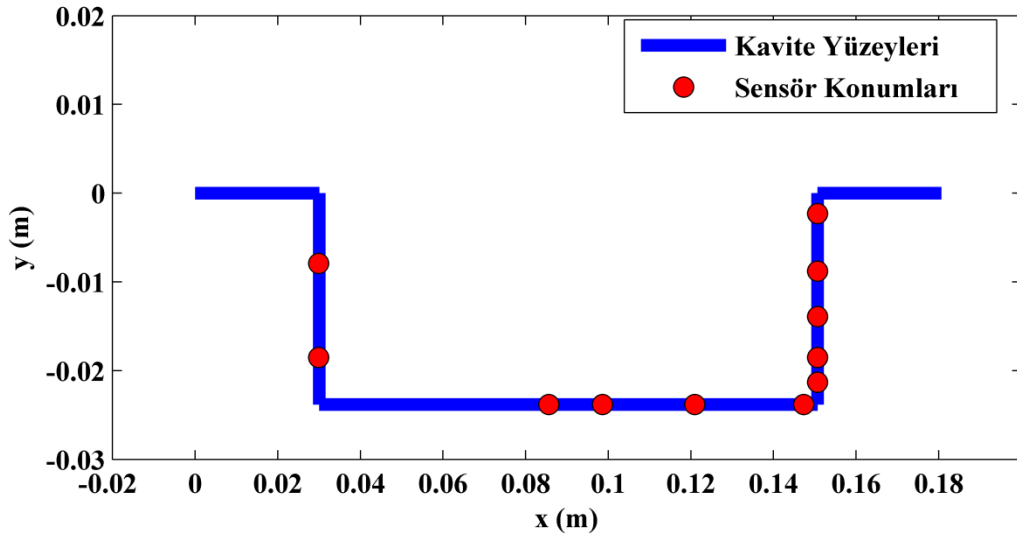
Kip Numarası	Enerji İçerikleri,%	Koordinatlar, x(m)	Koordinatlar, y(m)
1	68.34	0.15064	-0.0023
		0.15064	-0.0139
		0.0921	-0.0238
		0.1473	-0.0238
2	16.04	0.15064	-0.0042
		0.15064	-0.0213
		0.0856	-0.0238
		0.1209	-0.0238
3	5.05	0.15064	-0.0088
		0.15064	-0.0199
		0.0861	-0.0238
		0.1227	-0.0238
4	1.7	0.0299	-0.0019
		0.0299	-0.0079
		0.0299	-0.0130
		0.0299	-0.0185
Toplam, %	91.22	-	-

Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4 incelenerek, lazerli ve lazersiz durum için ortak noktalar ele alınmıştır. İki durumda da aktif olan bölgelere sensör koyulması amaçlanmıştır. Daha sonra üst üste oturmayan fakat birbirine aktif yakın koordinatlarda dikkate alınarak sensör koyulmasına karar verilen konumlar belirlenmiş ve Çizelge 4.5' te sunulmuştur.

Çizelge 4.5. Karar verilen sensör yerleri

Koordinat, x (m)	Koordinat, y(m)	Konum
0.15064	-0.0023	Arka Duvar
0.15064	-0.0088	Arka Duvar
0.15064	-0.0139	Arka Duvar
0.15064	-0.0185	Arka Duvar
0.15064	-0.0213	Arka Duvar
0.0856	-0.0238	Alt Duvar
0.0986	-0.0238	Alt Duvar
0.1209	-0.0238	Alt Duvar
0.1473	-0.0238	Alt Duvar
0.0299	-0.0079	Ön Duvar
0.0299	-0.0185	Ön Duvar

Şekil 4.9’ da sensör yerleşimi için kararlaştırılan konumların kavite üzerindeki yerleşimleri görülmektedir.



Şekil 4.9. Sensör konumları

DAY uygulaması, beklendiği üzere, kavite akışı sırasında, en kritik basınç değerlerinin ve dalgalanmalarının olduğu kavite arka duvarında ve alt duvarın arka duvara yakın yarısında daha çok sensör konulması yönünde sonuç vermiştir. Ön duvara kontrollü durum sonuçları dikkate alınarak, emniyet amaçlı iki adet sensör yerleşimine karar verilmiştir.

4.4. Farklı L/D Oranlarına Sahip Sesüstü Kavite Akışlarının DAY Sonuçları

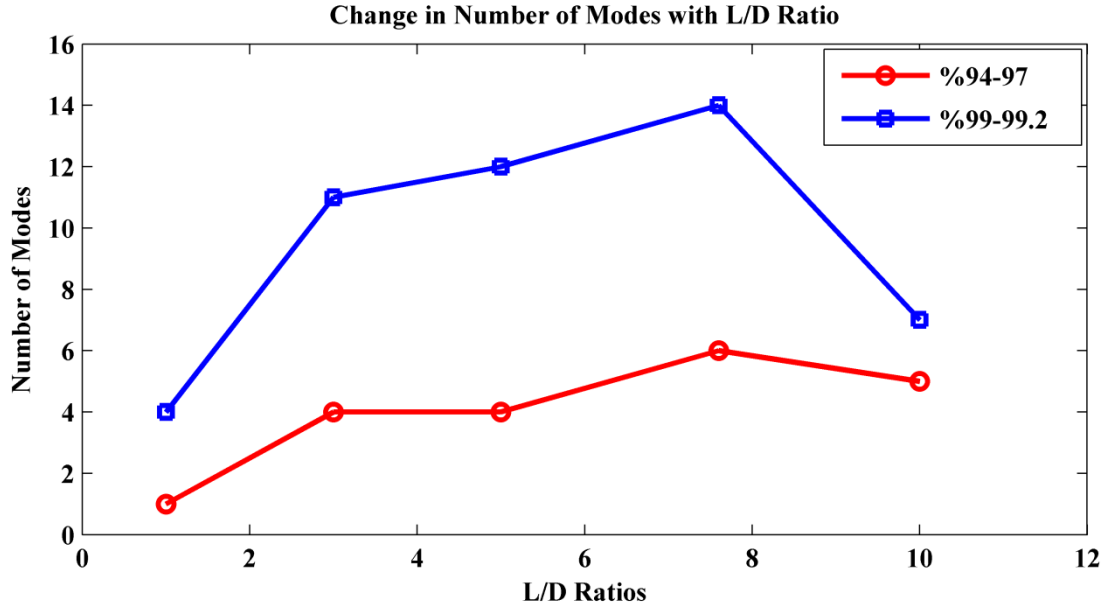
L/D oranı 1, 3, 5.07, 7.6 ve 10 olmak üzere 5 farklı kavite akışına DAY uygulanmıştır. DAY her kavite akışı için elde edilmiş basınç dalgalanmaları grafikleri dikkate alınarak periyodikleşmenin ardından 6 periyot boyunca elde edilmiş x-hız verilerine uygulanmıştır. Her bir akış konfigürasyonunun periyodu için Ayli [49] tarafından yapılan HAD analizleri sonucu bulunmuş frekans değerleri dikkate alınmıştır. Farklı kavite akışını temsil edebilecek olan kip sayıları Çizelge 4.6' da verilmektedir.

Çizelge 4.6. Farklı kavite akışlarını temsil edebilmek için gerekli kip sayıları

Kavite Konfigürasyonu	Toplam Enerji İçeriği, %		Kip Sayısı	
L/D=1	94.33	99.41	1	4
L/D=3	95.58	99.17	4	11
L/D=5.07	96	99.18	4	12
L/D=7.6	95.33	99.19	6	14
L/D=10	96.82	99.18	5	7

Şekil 4.10' da görüldüğü gibi, L/D oranı arttıkça akışı temsil etmek için gerekli kip sayısı artış göstermektedir. L/D = 10 olan kavite akışı bu trende uymamaktadır. Bunun nedeni akışın açık ve kapalı kavite akışları arasında yani geçiş bölgesinde olmasıdır. En az kip sayısı L/D =1 olan kavite akışı konfigürasyonu için elde edilmiştir. Bunun nedeni, HAD analizleri sonucunda görüldüğü gibi kavite akışı etkileşimlerinin düşük seviyede görülmesidir [49]. L/D =3 ve 10 arasında, akış L/D

oranı arttıkça daha da karmaşıklaşmakta ve sistemi temsil edebilecek olan kip sayısı da dolaylı olarak artmaktadır.



Şekil 4.10. L/D oranına bağlı olarak kip sayılarındaki değişim

DAY sonucu elde edilen her bir kip belli bir enerji değeri içermektedir. Bu kiplerin sahip oldukları bu enerji miktarları, sistemin karakteristiğini ne kadar yansıtılabildikleri ile doğru orantılıdır. Farklı kavite akışları için elde edilmiş olan kip sayıları ve enerji içerikleri Çizelge 4.7’de verilmektedir. Görüldüğü üzere sistemlerin % 99 civarında enerjisini temsil edebilecek kipler ele alındığında çok fazla düşük enerjili kiplerin olduğu görülmektedir. Bu kipler küçük türbülans yapılarını temsil etmektedir. Bu küçük türbülans yapıları akış karakteristiğini etkilememektedir. HAD analizleri sonucu elde edilen sonuçlarda, L/D oranı 1 ve 10 olan kavite akışlarının tek mod, diğer kavite için ise çoklu moda sahip olduğu görülmüştür. Çoklu mod, akışın küçük yapılardan etkilendiği durumlarda ortaya çıkmaktadır [49]. L/D=3, 5.07 ve 7.6 kavite akışlarını temsil edebilecek olan kiplerin sayısı ve enerji içerikleri bu durumu doğrulamaktadır. Sistemlerin toplamda %99 enerji içeriğini karşılamak için birçok küçük enerji içerikli kipler dikkate alınmalıdır dolayısıyla akışların küçük yapılardan etkilendikleri söylenebilir.

Çizelge 4.7. Tüm konfigürasyonlar için elde edilmiş kiplerin enerji içerikleri

Tüm Kiplerin Enerji İçerikleri, %										
Kip Sayısı	L/D=1		L/D=3		L/D=5.07		L/D=7.6		L/D=10	
	1	94.33	94.33	67.02	67.02	70.65	70.65	60.87	60.87	46.38
2	-	2.88	20.60	20.60	21.19	21.19	18.15	18.15	31.06	31.06
3	-	1.64	4.86	4.86	2.63	2.63	7.12	7.12	12.15	12.15
4	-	0.56	3.10	3.10	1.54	1.54	5.17	5.17	4.2	4.2
5	-	-	-	0.090	-	0.96	2.16	2.16	3.02	3.02
6	-	-	-	0.078	-	0.61	1.86	1.86	-	1.67
7	-	-	-	0.067	-	0.58	-	1.14	-	0.69
8	-	-	-	0.048	-	0.32	-	0.71	-	-
9	-	-	-	0.030	-	0.23	-	0.55	-	-
10	-	-	-	0.0026	-	0.18	-	0.40	-	-
11	-	-	-	0.0020	-	0.15	-	0.36	-	-
12	-	-	-	-	-	0.13	-	0.30	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	0.23	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	0.17	-	-
Toplam Enerji İçeriği, %	94.33	99.41	95.58	99.17	96.01	99.18	95.33	99.19	96.82	99.18

5. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Süpersonik kavite akış fiziğinin Ayli [49] tarafından çalışılan HAD simülasyonları ile anlaşılmasının ardından, akıştaki zararlı yapıları ortadan kaldırmak amacı ile aktif bir kontrol tekniği olan lazer enerjisi bırakımı yöntemi $L/D=5.07$ olan kaviteye uygulanmıştır. Lazerin akışı nasıl etkileyeceği ve hangi büyüklük ve ya sıklıkta akışa verildiğinde daha etkin olacağı gibi durumlar araştırılmıştır. Lazerin kavite akışına Aradag [36] tarafında yapılan çalışma örnek alınarak kavite giriş kenarının hemen üzerinden uygulanmış ve periyot başı bir kez olmak üzere altı periyot boyunca akışa verilmiştir. Bu sırada farklı büyüklükler kullanılarak analizler yapılmış ve kavite giriş kenarının hemen üstünden 1,5, 10 ve 100mJ enerji büyüklükleri periyot başı bir defa olmak üzere akışa verildiğinde büyük farklılıklar oluşturmamıştır. Fakat 100mJ enerji değeri ufakta olsa diğerlerine göre daha farklı olduğu görülerek diğer çalışmalar için sabit enerji büyüklüğü olarak ele alınmıştır.

Kavite akışının kendini tekrar eden bir mekanizması olduğu ve sürekli kesme tabakası hareketlenmeleriyle kavite içerisine kütle girişi ve çıkışı gerçekleştiği HAD analizleri sonucunda görülmüştür [49]. Lazerin farklı konumlardan etkin olabileceği düşüncesi ile kavite kesme tabakası kısımlarında kavite ön kenarının üstü de dahil olmak üzere üç farklı konum denenmiştir. 100 mJ lazer enerji değeri üç farklı noktadan, periyot başı bir kez olmak üzere akışa verilmiş ve etkileri ses basınç seviyeleri dağılımlarıyla görülmeye çalışılmıştır. Fakat lazersiz durum ile lazer verildikten sonra büyük değişiklikler gözlemlenmemiştir. Bu durum lazerin etkinlik süresinin, periyot başı sadece bir kez verilmesi sonucu akışı değiştirebilecek kadar yeterli olamayabileceği dolayısıyla frekans parametresinin araştırılmasının yani lazerin akışa periyot boyunca birden çok kez verilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

100mJ lazer enerjisi akışa farklı frekans değerlerinde yani akışa, periyot başı 1, 10, 20, 30 ve 40 kez olmak üzere altı periyot boyunca uygulanmıştır. 31110 Hz frekans değerinde yani lazer enerjisi akışa periyot başı 30 kez verildiğinde, ses basınç seviyelerinde düşüşler görülmüştür. Kavitenin en kritik bölgesi olan arka duvarı

boyunca ses basınç seviyelerinde lazersiz duruma göre 7dB civarında düşüşler elde edilmiştir. Yine bu durum altında basınç dalgalanmaları incelendiğinde, genliklerin düştüğü gözlemlenmiştir.

Belirlenen şartlar altında lazerin akışa olan etkisinin lazer verdikçe devam edip etmeyeceğini anlamak amacı ile süre parametresi değerlendirilmiştir. Lazer enerjisi yapılan çalışmalara ek olarak ilave 6 periyot daha akışa uygulanmıştır. Sonuçlar lazer vermeye devam edildikçe hala ses basınç seviyelerinin azaldığını göstermiştir. Bu durumda lazerin etkinliğinin sabitleneceği zaman saptanamamıştır. Ayrıca 6 periyotluk zaman dilimleri boyunca elde edilen ses basınç dağılımları birbirleri ile karşılaştırılmış ve farklılık olduğu ortaya çıkmıştır. Bu durum lazer enerjisi verildikten sonra periyot değerlerinde değişim olduğunu göstermektedir.

Sistemleri daha düşük dereceden ifade edebilmek amacıyla kontrolcüler arasında oldukça popüler olan Uygun Dikgen Ayırıştırma yöntemi, kontrollü ve kontrolsüz akış fizikleri arasındaki farkı daha iyi anlamak için L/D oranı 5.07 olan kavitenin lazersiz ve lazerli olmak üzere periyodikleştikten sonra 6 periyot boyunca elde edilmiş x-hız verilerine uygulanmıştır. Sonuç olarak, lazer verildikten sonra, sistemi yeniden tanımlamak için gerekli kip sayılarının arttığı görülmüştür. En yüksek enerjili ilk iki kipi enerji içeriklerinin daha sonraki kiplere dağıldığı, yani akış alanı içerisinde normalde baskın olan büyük hareketlerin etkilerinin biraz daha azaldığı görülmüştür. Kiplerin zaman içerisindeki hareket genlikleri incelendiğinde lazer verilmesiyle yüksek enerjili kiplerin şiddetlerinin azaldığı görülmektedir.

Gerçek zamanlı kontrol çalışmaları için verimli bir şekilde veri toplamak amacı ile sensör yerleştirmelerinin doğru ve etkin yerlere yapılması gerekmektedir. Dikgen Ayırıştırma Yöntemi, akışı konumsal ve zamansal olarak ayırmakta ve baskın özellikleri kiplerle ifade etmektedir. Kiplerin taşıdığı bu olgular akış alanı içerisinde gerçekleşen olayları yansıtmaktadır. Bu nedenle bir boyutlu DAY yöntemi L/D oranı 5.07 olan kavite akışının kontrollü ve kontrolsüz durumlar için duvarları üzerinden akış periyodikleştikten sonra 6 periyot boyunca toplanan basınç verilerine uygulanmıştır. Elde edilen en yüksek enerjili ilk dört kipler akış alanı içerisinde

baskın ve yüksek enerjili olguları temsil etmektedir. Bu kiplerin maksimum ve minimum noktaları tespit edilmiş ve kavite duvarları üzerinde en yüksek aktiviteli alanlara sensör yerleştirilmesi uygun görülmüştür. Bu konumların genellikle arka duvar çıkması ya da alt duvarın arka duvarda yakın yarısında çıkması, HAD simülasyonları sonucunda en aktif hareketlenmelerinin arka duvar üzerinde olduğu sonucu ile paralellik göstermektedir [49]. Bu durum DAY ile aktif konumların düzgün bir şekilde belirlenebildiğini ortaya koymaktadır.

L/D oranı 5.07 olan kavite akışı başta olmak üzere L/D oranı 1, 3, 7.6 ve 10 olan kavite HAD analizleri sonucunda elde edilmiş x-hız verilerine DAY uygulanmıştır. Her bir DAY analizi için akış alanları içerisindeki basınç salınımları periyodikleştikten sonra 6 periyot boyunca toplanan veriler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile farklı kavite geometrilerinde ortaya çıkan akış mekanizmaları arasındaki farklar açıklanmıştır. Kaviteyi DAY kipleri ile yeniden ifade edebilmek için gerekli kip sayıları ve kip enerji içerikleri dikkate alındığında, HAD sonuçları ile uyumlu olarak, L/D oranı 3 ile 10 arasında artarken akışın benzer olduğu fakat biraz daha karmaşıklaştığı gerekli kip sayıları ile ortaya çıkmış, L/D oranı 1 ve 10 olan kavite HAD analiz sonuçlarında olduğu gibi DAY sonuçları ile de diğerlerinden daha basit akışlar olarak tanımlanmıştır. Fakat DAY sonuçları L/D oranı 10 olan kavite akışının L/D oranı 1 olana göre daha karmaşık olduğunu göstermiştir. Bu durum, L/D=10 konfigürasyonunun açık kavite ile kapalı kavite arasındaki geçiş bölgesinde olması ile açıklanabilir.

Çalışma içerisinde, kavite akışı içerisinde ortaya çıkan zararlı basınç dalgalanmalarını ve ses basınç seviyelerini azaltabilmek amacı ile yeni bir kontrol yöntemi olan lazer enerjisi bırakımı etkinliği araştırılmış, konum, miktar, frekans ve süre gibi parametrelerin değerlendirilmesi sonucunda kavite içerisindeki basınç dalgalanmalarının genlikleri azaltılmış ve buna bağlı olarak ses basınç seviyeleri düşürülmüştür. Dikgen Ayırıştırma yöntemi kullanılarak, kontrollü ve kontrolsüz kavite akışı sonuçları ayrıntılı bir biçimde sunulmuştur. Gerçek zamanlı kontrol yapılması gibi bir durumda veri toplamak amacı ile konumlandırılması önemli olan sensörler için kavite yüzeylerinden elde edilmiş basınç verilerine DAY uygulanarak,

kavite duvarları boyunca en aktif ve yüksek enerjili yerler belirlenmiş ve en az sayıda verimli bir şekilde sensörlerin yerleşimi için gerekli konumlar belirlenmiştir. Son olarak ise, L/D oranının kavite akışına olan etkileri DAY kullanılarak sunulmuştur. Farklı kavite konfigürasyonlarının akış mekanizmaları irdelenmiştir.

Gelecek İçin Önerilen Çalışmalar

Çalışma içerisinde lazer enerjisinin uygulanmasına devam edilmesiyle beraber basınçlardaki düşüşün devam ettiği görülmüştür. Lazerin etkilerinin sabitlendiği zaman diliminin bulunabilmesi için daha çok periyot boyunca lazer enerjisi bırakımının gerçekleştirilmesi uygun olabilir. Bu çalışmada 12 periyotluk dilim için lazer enerjisi etkileri gözlemlenmiştir.

İki ve üç boyutlu kavite HAD analizlerinin farklı sonuçlar ortaya koyması [49], lazer enerjisinin de üç boyutlu kavite akışında farklı sonuçlar doğurabilme ihtimalini ortaya çıkarmıştır. Lazer enerjisi bırakımı 3 boyutlu kavite akışı için gerçekleştirilebilir. Lazer bırakım işleminin sayısal olarak uygulanması ve literatürde deneysel herhangi bir örneğinin bulunmaması çalışma sonuçlarını onaylayabilecek bir unsur olmamasına sebep olmuştur. Sesüstü hızlarda çalışabilen hava tüneli içeren test merkezlerinde bu çalışma deneysel olarak gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Aradag, S., CFD for High Speed Flows in Engineering, *VDM Verlag Dr. Müller*, Saarbrücken, Germany, 2008.
- [2] Rossiter, J., Wind Tunnel Experiments on the Flow over Rectangular Cavities at Subsonic and Transonic Speeds, Technical Report 64037: Royal Aircraft Establishment, UK, 1964.
- [3] Syed, A., 2012, Detached Eddy Simulation of Turbulent Flow Over an Open Cavity With and Without Cover Plates, *Yüksek Lisans Tezi*, Wichita State University, Department of Aerospace Engineering, USA.
- [4] Lai, H., Luo, K., H., Large Eddy Simulation and Control Of Cavity Aeroacoustic, Conference on Turbulence and Interactions,-TI2006, Porquerolles, France, 29 Mayıs- 02 Haziran 2006.
- [5] Unalmis, Ö. H., Clemens, N. T., Dolling D. S., Cavity Oscillation Mechanisms in High- Speed Flows, *AIAA Journal*, 42(10), 2035-2041, 2004.
- [6] Perng, S. W., Dolling, D. S., Suppression of Pressure Oscillations in High Mach Number Turbulent Cavity Flow, *Journal of Aircraft*, 38(2), 248-256, 2001.
- [7] Lazar, E., Elliot, G., Glumac, N., Control of the Shear Layer Above a Supersonic Cavity Using Energy Deposition, *AIAA Journal*, 46(12), 2987-2997, 2008.
- [8] Kral, D. L., Active Flow Control Technology, ASME Fluids Engineering Division Technical Brief, 1999.
- [9] Bueno, P.C., Unalmis, Ö.H., Clemens, N.T., Dolling, D.S., The Effects of Upstream Mass Injection on a Mach 2 Cavity Flow, 40th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2002.
- [10] Rizetta, D. P., Visbal, M. R., Large Eddy Simulation of Supersonic Cavity Flowfields Including Flow Control, *AIAA Journal*, 41(8), 1452-1462, 2003.
- [11] Hamed A., Das K., Basu D., Numerical Simulations of Fluidic Control for Transonic-Cavity Flows, 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno-NV, AIAA Paper No. 2004-0429, 2004.
- [12] Zhuang, N., Alvi, F., Alkisar, M. B., Shih, C., Sahoo, D., and Annaswamy, A. M., Aeroacoustic Properties of Supersonic Cavity Flows and Their Control, 9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit, South Carolina-USA, AIAA Paper No. 2003-3101, 2003.
- [13] Zhuang, N., Alvi, S. F., Shih, C., Another Look at Supersonic Cavity Flows and Their Control, 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, California-USA, AIAA Paper No. 2005-2803, 2005.
- [14] Chan, S., Zhang, X., and Gabriel, S., Attenuation of Low-Speed Flow-Induced Cavity Tones Using Plasma Actuators, *AIAA Journal*, 45(7), 1525–1538, 2007.
- [15] Miles R. B., Flow Control by Energy Addition into High-Speed Air, Fluids 2000 Conference and Exhibit, Denver-CO, AIAA Paper No. 2000-2324, 2000.
- [16] Knight, D., Kuchinskiy, V., Kuranov, A., Sheikin, E., Aerodynamic Flow Control at High Speed Using Energy Deposition, Fourth Workshop on Magneto- and Plasma Aerodynamics for Aerospace Applications, IVTAN, Moscow-Russia, 2002.
- [17] Levin, V. And Terent'eva L., Supersonic Flow Over a Cone with Heat Release in the Neighborhood of the Apex, *Mikhanika Zhidkosti i Gaza*, 110-114, 1993.

- [18] Yuriev, A., Korzh, S., Pirogov, S., Savischenko, N., Leonov, S., Ryizhov, E., Transonic Streamlining of Profile at Energy Addition in Local Supersonic Zone, Third Workshop on Magneto-Plasma-Aerodynamics in Aerospace Applications, Moscow, 2001.
- [19] Golyatin, V., Kuranov, A., Kuchinsky, A., Sukhomlinov, V., The Mechanism of Influence of Low-Temperature Plasma on Aerodynamic Streamlining, 32nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Anaheim-CA, AIAA Paper No. 2001-3055, 2001.
- [20] Poggie, J., Gaitonde, D., Computational Studies of Magnetic Control in Hypersonic Flow, 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno-NV, AIAA Paper No. 2001-0196, 2001.
- [21] Knight, D., Kolesnichenko, Y., Brovkin, V. and Khmara, D., High Speed Flow Control Using Microwave Energy Deposition, 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA Paper No. 2008-1354, 2008.
- [22] Samimy, M., Kim, H. J., Kastner, J., Adamovich, I., Utkin, Y., Active Control of a Mach 0.9 Jet for Noise Mitigation Using Plasma Actuators, AIAA Journal, 45(4), 890-901, 2007.
- [23] Samimy, M., Adamovich, I., Webb, B., Kastner, J., Hileman, J., Keshav, S., Palm, P., Development and characterization of plasma actuators for high-speed jet control, Experiments in Fluids, 37(4), 577-588, 2004.
- [24] Aradag, S., Cohen, K., Seaver, C., McLaughlin, T., Integrating CFD and Experiments for Undergraduate Research, Computer Applications in Engineering Education, 18(4), 727-735, 2010. (DOI:10.1002/cae.20278, 2009.)
- [25] Cohen, K., Aradag, S., Seidel, J., Siegel, S., McLaughlin, T., A Methodology Based on Experimental Investigation of a DBD-Plasma Actuated Cylinder Wake for Flow Control, Transition at Low Reynolds Numbers, *InTech Publishing*, ISBN 979-953-307-627-9, March 2012.
- [26] Meyerand, R., Haught, A., Gas break down at optical frequencies, Physical Review Letter, 11(9), 401-403, 1963.
- [27] Ghosh, S., Manesh, K., Numerical Simulation of the Fluid Dynamic Effects of Laser Energy Deposition in Air, J. Fluid Mech., 605, 329-354, 2008.
- [28] Glumac, N., Elliot, G., The Effect Of Ambient Pressure On Laser-Induced Plasmas In Air, Optics and Laser in Engineering, 45, 27-35, 2007.
- [29] Schülein, E., Zheltovodov, A.A., Loginov, S.M., Pimonov, A. E., Experimental and Numerical Study of Shock Wave Transformation by Laser- Induced Energy Deposition, International Conference on Methods of Aerophysical Research, ICMAR, Russia, 2008.
- [30] Zaidi H. S., Shneider N. M., Manusfield K. D., Ionikh Y. Z., Miles R. B., Influence of Upstream Pulsed Energy Deposition On a Shockwave Structure in Supersonic Flow, 22nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, St. Louis-USA, AIAA Paper No. 2002-2703, 2002.
- [31] Adelgren, R., Elliot, G., Knight, D., Laser Energy Deposition in Transverse Wall Jets and Intersecting Shocks, Second Workshop on Thermochemical Process in Plasma Aerodynamics, St. Petersburg, Russia, 2001.
- [32] Adelgren, R., Elliott, G., Knight, D., Zheltovodov, A., and Buetner, T., Energy Deposition in Supersonic Flows, 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno,-Nevada, AIAA Paper No. 2001-0885, 2001.

- [33] Adalgren, R., Yan, H., Elliott, G., Knight, D., Beutner, T., Zheltovodov, A., Control of Edney IV Interaction by Pulsed Laser Energy Deposition, *AIAA Journal*, 43(2), 256-269, 2005.
- [34] Adalgren, R., Elliott, G., Knight, D., Zheltovodov, A. and Beutner, T., Localized Flow Control in Supersonic Flows by Pulsed Laser Energy Deposition, In V. Bityurin, editor, *Third Workshop on Magneto-Plasma-Aerodynamics in Aerospace Applications*, pp.216, Moscow, 2001.
- [35] Khotyanovsky, D. V., Kudryavtsev, N. A., Knight, D. D., Ivanov, M. K., Control of Shock Wave Interaction by Impulse Laser Energy Deposition, *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Jyväskylä-Finlandiya 2004*.
- [36] Yan, H., Adalgren, R., Elliott, G., Knight, D., Ivanov, M., Khotyanovsky, D., and Beutner, T., Control of Mach Reflection-Regular Reflection Transition in Dual Solution Domain by Laser Energy Deposition, *Fifth Workshop on Magneto- and Plasma Aerodynamics for Aerospace Applications, IVTAN, Moscow, Russia, 2003*.
- [37] Yan, H., Adalgren, R., Elliott, G., Knight, D., Beutner, T., Ivanov, M., Kudryavtsev, A., Khotyanovsky, D., Laser Energy Deposition in Quiescent Air and Intersecting Shocks, *Fourth Workshop on Magneto- and Plasma Aerodynamics for Aerospace Applications, IVTAN, Moscow, Russia, 2002*.
- [38] Aradag, S., Yan, H., Knight, D., The Effects of Laser Energy Deposition on Supersonic Cavity Flow, *J. of Thermal Science and Technology*, 29(2), 67-73, 2009.
- [39] Holmes, P., Lumley, J. L., Berkooz, G., *Turbulence and Coherent Structures, Dynamical Systems and Symmetry*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1996.
- [40] Chatterjee, A., *An Introduction to the Proper Orthogonal Decomposition*, Computational Science Section Tutorial, Department of Engineering Science and Mechanics, Pennsylvania State University, 2000.
- [41] Lumley, J.L., *The Structure of Inhomogeneous Turbulent Flows*, *Atmospheric Turbulence and Radio Propagation*, 166-178, 1967.
- [42] Aubry, N., Holmes, P., Lumley, J.L., Stone, E., *The Dynamics of Coherent Structures in the Wall Region of a Turbulent Boundary Layer*, *Journal of Fluid Mechanics*, 192, 115-173, 1988.
- [43] Rowley, C.W., Colonius, T., Murray, R. M., POD based models of self-sustained oscillations in the flow past an open cavity, in *Proceedings of the 6th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, AIAA Paper No. 2000-1969, June 2000.
- [44] Nagarajan, K. K., Cordier, L., Airiau, C., Kourta, A., POD based reduced order modelling of a compressible forced cavity flow, in *Proceedings of the 19th French Congress on Mechanics*, Marseille, France, 2009.
- [45] Bortz, D. M., Rubio, A. D., Banks, H. T., Cain, A. B., Smith, R. C., *Reduced Order Modeling in Control of Open Cavity Acoustics*, Tech. Rep. CRSC-TROO-18, Center for Research in Scientific Computation, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA, 2000.

- [46] Colonius, T., An overview of simulation, modeling and active control of flow/acoustic resonance in open cavities, in Proceedings of the 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA Paper No. 2001-0076, Reno, Nev, USA, 2001.
- [47] Caraballo, E., Yuan, X., Little, J., Debaisi, M., Serrani, A., Myatt, J., Samimy, M., Further Development of Feedback Control of Cavity Flow Using Experimental Based Reduced Order Model, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, AIAA Paper No. 2006-1405, 2006.
- [48] Kasnakoglu, C., 2007, Reduced order modeling, nonlinear analysis and control methods for flow control problems, *Doktora Tezi, The Ohio State University*, Columbus, Ohio, USA.
- [49] Ayli, E., 2012, Numerical Analysis of Supersonic Cavity Flow, Master Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [50] Feeny, B. F., Kappagantu R., On the physical interpretation of proper orthogonal modes in vibrations, *Journal of Sound and Vibration*, 211, 607-616, 1998.
- [51] Ravindra, B., Comments on "On the physical interpretation of proper orthogonal modes in vibrations", *Journal of Sound and Vibration*, 219, 189-192, 1999.
- [52] Kappagantu, R., Fenny, B. F., An "optimal" modal reduction of a system with frictional excitation, *Journal of Sound and Vibration*, 224, 863-877, 1999.
- [53] Liang, Y. C., Lee, H. P., Lim, S. P., Lin, W. Z., Lee, K. H., Wu, C. G., Proper orthogonal decomposition and its applications-Part I: Theory, *J. Sound and Vibration*, 252(3), 527-544, 2002.
- [54] Cao, Y., Zhu, J., Luo, Z., Navon, I., Reduced Order Modeling of the Upper Tropical Pacific Ocean Model Using Proper Orthogonal Decomposition, *Computer and Mathematics with Applications*, 52(89), 1373-1386, 2006.
- [55] Newman, A. J., Model Reduction via the Karhunen-Loève Expansion Part II: Some Elementary Examples, Institute for Systems Research, Technical Report No. 9633, 1996.
- [56] Deane, A. E., Kevrekidis, I. G., Karniadakis, G. E., Orszag, S. A., Low Dimensional Models for Complex Geometry Flows Application to Grooved Channels and Circular Cylinders, *Physics of Fluids*, 3, 2337-2354, 1991.
- [57] Ly, H. V., Tran, H. T., Modeling and Control of Physical Processes Using Proper Orthogonal Decomposition, *Mathematical and Computer Modeling*, 33, 223-236, 2001.
- [58] Ahlman, D., Söderlund, F., Jackson, J., Kurdila, A., Shyy, W., Proper Orthogonal Decomposition for Time Dependent Lid Driven Cavity Flows, *Numerical Heat Transfer Part B: Fundamentals*, 42(4), 285-306, 2002.
- [59] Sanghi, S., Hasan, N., Proper Orthogonal Decomposition and Its Applications, *Asia Pacific Journal of Chemical Engineering*, 6, 120-128, 2011.
- [60] Smith, T.R., Moehlis, J., Holmes, P., Low Dimensional Modeling of Turbulence Using the Proper Orthogonal Decomposition: A Tutorial, *Nonlinear Dynamics*, 41, 275-307, 2005.
- [61] Sirovich, L., Turbulence and the Dynamics of Coherent Structures Part 1 Coherent Structures, *Quarterly Applied Mathematics*, 45(3), 561-571, 1987.
- [62] Volkwein, S., Proper orthogonal decomposition and singular value decomposition, *Spezialforschungsbereich F003 Optimierung und Kontrolle*,

Projektbereich Kontinuierliche Optimierung und Kontrolle, Bericht Nr. 153, Graz, 1999.

- [63] Berkooz, G., Holmes, P., Lumley, J. L., The Proper Orthogonal Decomposition in the Analysis of Turbulent Flows, *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, 25, 539-575, 1993.
- [64] Cohen K., Siegel, S., McLaughlin, T., A Heuristic Approach to Effective Sensor Placement for Modeling of a Cylinder Wake, *Computers and Fluids*, 35, 103-120, 2006.
- [65] Lam, N. S., Spatial interpolation methods: A review, *The American Cartographer* 10(2), 129-150, 1983.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YILMAZ, İbrahim
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 29.08.1988, Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (507) 786 03 95
e-mail : iyilmaz@etu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2013
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2011
Lise	Ankara Atatürk Anadolu Lisesi	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011–2013	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi
2011	DSK Group GmbH	Stajyer
2009	Nüve Sanayi Malzemeleri ve Ticaret A.Ş.	Stajyer
2008	Anadolu İş Makinaları Ltd. Şti.	Stajyer

Yabancı Dil

İngilizce (ileri düzeyde), Almanca (temel düzeyde)

Yayınlar

Dergi Yayınları

1. **Yılmaz, I.**, Ayli, E., Aradag, S., “A Review of Control Methods for Cavity Flows and Feasibility of Laser Energy Deposition as an Actuator”, International Journal of Flow Control, Vol. 4, No. 1-2, pp. 29-46, 2012.
2. **Yılmaz, I.** Aradag, S., “An assessment of the effects of laser energy deposition for cavity flows”, International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, Vol.1, No.2, pp.158-161, 2013.
3. **Yılmaz, I.**, Ayli, E. and Aradag, S., “Investigation of the Effects of Length to Depth Ratio on Open Supersonic Cavities Using CFD and Proper Orthogonal Decomposition,” The Scientific World Journal, Vol. 2013, Article ID 810175, 12 pages, 2013. (doi:10.1155/2013/810175)
4. **Yılmaz, I.**, Aradag, S., "Numerical laser energy Deposition on Supersonic Cavity Flow and Sensor Placement Strategies to Control the Flow", The Scientific World Journal, Vol. 2013, Article ID 141342, 8 pages, 2013. (doi:10.1155/2013/1413429)

Uluslararası Konferans Yayınları

5. Ayli, E., **Yılmaz. I.**, Aradag, S., “Numerical Analysis of Supersonic Cavity Flow”, 6th International Conference on Thermal Systems: Theory and Applications, May-June 2012.
6. **Yılmaz, I.**, Ayli, E., Aradag, S., “Control of Supersonic Cavity Flow”, 6th International Conference on Thermal Systems: Theory and Applications, May-June 2012.

7. **Yılmaz, I.**, Ayli, E. and Aradag, S. , “Reduced Order Modeling for Supersonic Cavity Flows”, in Proc. of the 10th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics, Recent Researches in Mechanical Engineering, pp.107-112, January 2013.
8. **Yılmaz, I.**, Aradag, S., “An assessment of the effects of laser energy deposition for cavity flows”, in Proc. of the 2nd International Conference on Fluid Dynamics and Thermodynamics Technologies, 15-16 Mar, 2013.
9. **Yılmaz, I.**, Aradag, S., "Effects of Duration of Laser Energy Deposition on Supersonic Cavities and Sensor Placement Strategies for Flow Control", 7th Ankara International Aerospace Conference, September 2013.

Ulusal Konferans Yayınları

10. Özkaya, E., **Yılmaz, İ.**, Çakmak, A. Y., Aradag, S., ”Gövde Boru Tipi Isı Değiştirgeci Tasarımı”, ULIBTK’11 18. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Eylül 2011.