

**T.C.**  
**İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKUSTİK KARA DELİKLERİN BAS TUZAĞI OLARAK KULLANIMININ**  
**İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mehmet İZCİ**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Olgun Adem KAYA**

**MAYIS 2025**

**T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKUSTİK KARA DELİKLERİN BAS TUZAĞI OLARAK KULLANIMININ  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mehmet İZCİ  
(36223612901)**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Olgun Adem KAYA**

**MAYIS 2025**

## TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmamın her aşamasında bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemeyen, her konuda yönlendiren ve yardımcı olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Olgun Adem KAYA' ya,

Bu süreci tamamlamamda katkısı olan idareci ve öğretmen arkadaşlarıma,

Tasarım çalışmasının yapım ve montaj aşamasında emeği geçen herkese,

Her zaman olduğu gibi bu süreçte de beni yalnız bırakmayan aileme

teşekkür ederim.



## ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Akustik Kara Deliklerin Bas Tuzağı Olarak Kullanımının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlâk ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

**Mehmet İZCİ**



## İÇİNDEKİLER

|                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ .....                                                             | i         |
| ONUR SÖZÜ .....                                                                     | ii        |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                    | iii       |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                                | iv        |
| SEMBOLLER VE KISALTMALAR .....                                                      | vi        |
| ÖZET .....                                                                          | vii       |
| ABSTRACT .....                                                                      | viii      |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>                                                                | <b>1</b>  |
| 1.1 Ses Dalgasının Temel özellikleri.....                                           | 1         |
| 1.2 Kara Delik Kavramı.....                                                         | 4         |
| 1.3 Akustik Kara Delik Kavramı ve İlgili Literatür .....                            | 5         |
| 1.4 Akustik Kara Deliklerin Teorik Arka Planı.....                                  | 16        |
| <b>2. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>                                                  | <b>20</b> |
| 2.1 COMSOL Multiphysics Yazılım Paketi ve 2D Eksensel Simetrik Akustik Modülü ..... | 20        |
| 2.2 COMSOL Modelleri Tasarımı.....                                                  | 22        |
| 2.3 REW (Room EQ Wizard Room Acoustics Software) (ODA AKUSTİĞİ YAZILIMI).....       | 25        |
| <b>3. TASARIM ÇALIŞMALARI VE BULGULAR .....</b>                                     | <b>27</b> |
| 3.1 Benzetim Çalışmaları ve Bulguları.....                                          | 27        |
| 3.2 Deneysel Çalışmalar ve Bulgular .....                                           | 37        |
| 3.2.1 EDT bulguları.....                                                            | 41        |
| 3.2.2 T20 ve T30 bulguları .....                                                    | 42        |
| 3.2.3 Anlaşılabilirlik (Clarity C50, C80) bulguları .....                           | 43        |
| <b>4. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>                                          | <b>45</b> |
| 4.1 Sonuçlar.....                                                                   | 46        |
| 4.2 Öneriler.....                                                                   | 46        |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                               | <b>48</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                               | <b>53</b> |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1: Ses dalgasının zamana bağlı yayılımı. ....                                                                                                                                                                                                                                                           | 2  |
| Şekil 1.2: Ses dalgasının konuma bağlı yayılımı. ....                                                                                                                                                                                                                                                           | 2  |
| Şekil 1.3: Normal koşullarda havadaki dalga boyu ve frekans.....                                                                                                                                                                                                                                                | 3  |
| Şekil 1.4: El Ouahabi ve arkadaşları tarafından ölçülen yansıma katsayısını göstermektedir.....                                                                                                                                                                                                                 | 7  |
| Şekil 1.5: İnce sönümleme katmanlarıyla kaplı kesikli kuadratik kamalar .....                                                                                                                                                                                                                                   | 9  |
| Şekil 1.6: Kalın bir emici film ile kaplı kama için yansıma katsayısı.....                                                                                                                                                                                                                                      | 9  |
| Şekil 1.7: Yansıma katsayısının frekansa bağlılığı R: $X_0 = 1.5$ ve $2.5$ cm (sırasıyla daha kalın ve daha ince eğriler); dolu ve noktalı eğriler emici filmlere sahip kama ve kaplanmamış kama ile örtüşmektedir; film malzeme kayıp faktörü $v = 0.2$ ' dir ve film kalınlığı $\square = 5\mu m$ ' dir ..... | 10 |
| Şekil 1.8: Spiral akustik kara delikli kirişin şekli. ....                                                                                                                                                                                                                                                      | 10 |
| Şekil 1.9: 720 mm akustik kara delik (gri çizgi), referans üniform ışın (siyah çizgi) ile kirişin sürüş noktası hareketliliği.....                                                                                                                                                                              | 11 |
| Şekil 1.10: (a) Karbon fiber kompozit numune ve numunenin boylamasına kesiti.....                                                                                                                                                                                                                               | 11 |
| Şekil 1.11: (b) Akustik kara delik yuvalı plaka (kesikli çizgi) ve referans plaka için ivme (kesikli çizgi) .....                                                                                                                                                                                               | 12 |
| Şekil 1.12: (a) Merkez delikli tekil iki boyutlu akustik kara delik, (b) Merkez delikli üç tane iki boyutlu akustik kara delik.....                                                                                                                                                                             | 12 |
| Şekil 1.13: Altı adet iki boyutlu akustik kara delik içeren üretilmiş çelik levha .....                                                                                                                                                                                                                         | 13 |
| Şekil 1.14: 14 mm' lik merkezi deliklere ve ek sönümleme katmanlarına sahip altı adet iki boyutlu akustik kara delik içeren bir plaka (kesikli çizgi) ve bir referans plaka (kesikli çizgi) için ölçülen ivme.....                                                                                              | 13 |
| Şekil 1.15: 8671 Hz' de akustik kara deliksiz (a) ve 8117 Hz' de akustik kara delikli (b) eliptik bir plakanın hız alanları .....                                                                                                                                                                               | 14 |
| Şekil 1.16: Ses gücü seviyesi karşılaştırması. Karşılaştırma altı girinti içeren ve bir sönümleme katmanı (siyah çizgi) ile kaplı bir plaka ile referans plaka (gri çizgi) arasında yapılmıştır.....                                                                                                            | 14 |
| Şekil 1.17: Düzgün bir plaka ve değişen çaplı sönümleme malzemesine sahip akustik kara delik plaka için 1-3 oktav ses yayılan bant gücü .....                                                                                                                                                                   | 15 |
| Şekil 1.18: Referans motor kapağından (kesikli çizgi) gelen ses radyasyonu, 2100 devir/dakika da kaput kapalı iken akustik kara delikli motor kapağı bağlantı plakaları (siyah çizgi) ile karşılaştırılmıştır .....                                                                                             | 16 |
| Şekil 1.19: (a) Üstel $m=1$ olan akustik kara deliğin ve (b) üstel $m=2$ olan akustik kara deliğin fotoğrafı .....                                                                                                                                                                                              | 16 |
| Şekil 1.20: Bir boyutta akustik kara deliğin şematik gösterimi .....                                                                                                                                                                                                                                            | 17 |
| Şekil 1.21: Akustik dalga kılavuzunun içine gömülü 3 boyutlu akustik kara delik gösterimi .....                                                                                                                                                                                                                 | 18 |
| Şekil 1.22: Ei Quahabi vd. tarafından incelenen doğrusal akustik kara deliğin eksen simetrik modeli [34,35]. Burada $r_w$ halkaların yüzeyidir. ....                                                                                                                                                            | 18 |
| Şekil 2.1: Akustik kara delik ve empedans tüpü geometrisi. ....                                                                                                                                                                                                                                                 | 23 |
| Şekil 2.2: Modellerde kullanılan örnek ızgaralama .....                                                                                                                                                                                                                                                         | 25 |
| Şekil 3.1: Akustik kara delik geometrisi ve ilgili parametreler. ....                                                                                                                                                                                                                                           | 27 |
| Şekil 3.2: Oran 2, $n = 1$ için a) $m=4$ , $f=100$ Hz, b) $m=2$ , $f=200$ Hz ve c) $m=1$ , $f=400$ Hz değerlerinde hesaplanan akustik basınç alanları grafikleri. ....                                                                                                                                          | 28 |
| Şekil 3.3: Oran=1 için $n$ , $m$ ve frekansa bağlı soğurma katsayısı grafikleri. ....                                                                                                                                                                                                                           | 29 |
| Şekil 3.4: Oran=1,5 için $n$ , $m$ ve frekansa bağlı soğurma katsayısı grafikleri. ....                                                                                                                                                                                                                         | 30 |

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.5:</b> Oran=2 için n, m ve frekansa bağlı soğurma katsayısı grafikleri. ....                                                       | 31 |
| <b>Şekil 3.6:</b> Oran=2,5 için n, m ve frekansa bağlı soğurma katsayısı grafikleri. ....                                                     | 32 |
| <b>Şekil 3.7:</b> Oran=3 için n, m ve frekansa bağlı soğurma katsayısı grafikleri. ....                                                       | 33 |
| <b>Şekil 3.8:</b> Oran=3,5 için n, m ve frekansa bağlı soğurma katsayısı grafikleri. ....                                                     | 34 |
| <b>Şekil 3.9:</b> Tüm oran değerlerinde m ve frekansa soğurma katsayısı grafikleri. ....                                                      | 36 |
| <b>Şekil 3.10:</b> Oran=3,5 ve m=0,4 ile m= 4 arasında 0,6 adımla değiştirilerek çizdirilen<br>frekansa bağlı soğurma katsayısı grafiği. .... | 37 |
| <b>Şekil 3.11:</b> Akustik kara delik parametreleri.....                                                                                      | 38 |
| <b>Şekil 3.12:</b> Akustik kara delik üretim aşamaları. ....                                                                                  | 39 |
| <b>Şekil 3.13:</b> Akustik kara delik.....                                                                                                    | 40 |
| <b>Şekil 3.14:</b> Deney düzeneği.....                                                                                                        | 41 |
| <b>Şekil 3.15:</b> Frekansa bağlı EDT grafikleri. ....                                                                                        | 42 |
| <b>Şekil 3.16:</b> Yapılan ölçümlerden elde edilen T20 grafikleri. ....                                                                       | 43 |
| <b>Şekil 3.17:</b> Yapılan ölçümlerden elde edilen T30 grafikleri. ....                                                                       | 43 |
| <b>Şekil 3.18:</b> Yapılan ölçüm sonuçlarından C50 değeri grafikleri. ....                                                                    | 44 |



## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

|                        |                                                                    |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| $\nabla^2$             | : Laplace Operatörü                                                |
| <b>AKD</b>             | : Akustik Kara Delik                                               |
| <b>c</b>               | : Ses Hızı                                                         |
| <b>C<sub>g</sub></b>   | : Grup Hızı                                                        |
| <b>C<sub>p</sub></b>   | : Faz Hızı                                                         |
| <b>E</b>               | : Young Modülü                                                     |
| <b>f</b>               | : Frekans                                                          |
| <b>FEM</b>             | : Sonlu Elemanlar Yöntemi                                          |
| <b>JCA</b>             | : Johnson-Champoux-Allard Modeli                                   |
| <b>k</b>               | : Dalga Sayısı                                                     |
| <b>L</b>               | : Akustik Kara Deliğın Uzunluğu                                    |
| <b>L<sub>th</sub></b>  | : Termal Karakteristik Uzunluk                                     |
| <b>L<sub>v</sub></b>   | : Viskoz Karakteristik Uzunluk                                     |
| <b>m</b>               | : Kuvvet Yasasına Dayalı Eğrinin Üssü                              |
| <b>P</b>               | : Akustik Basınç                                                   |
| <b>r</b>               | : Radyal Koordinat                                                 |
| <b>Re</b>              | : Karmaşık Sayının Reel Kısmı                                      |
| <b>REW</b>             | : Oda Akustik Yazılımı                                             |
| <b>R<sub>f</sub></b>   | : Viskoz Akış Direnci                                              |
| <b>SPL</b>             | : Ses Basınç Seviyesi                                              |
| <b>t</b>               | : Zaman                                                            |
| <b>T</b>               | : Periyot                                                          |
| <b>T<sub>0</sub></b>   | : Dalganın Yayılma Zamanı                                          |
| <b>V</b>               | : Dalganın İlerleme Hızı                                           |
| <b>x</b>               | : Artık Kalınlık Bulunan Kuvvet Yasa Eğrisinin Ucundan Olan Mesafe |
| <b>X</b>               | : İdeal Kuvvet Yasasının Ucundan Olan Mesafe                       |
| <b>X<sub>0</sub></b>   | : Akustik Kara Deliğın Bitiş Noktası                               |
| <b>X<sub>AKD</sub></b> | : Akustik Kara Deliğın Başlangıç Noktası                           |
| <b>z</b>               | : Eksensel Koordinat                                               |
| <b>ρ (r)</b>           | : Basınç Genliğı                                                   |
| <b>ρ</b>               | : KütleYoğunluğu                                                   |
| <b>φ</b>               | : Eksensel Simetri Dönüş Açısı                                     |
| <b>Ω</b>               | : Dalga Kılavuzunun Hava Bölgesi                                   |
| <b>ω</b>               | : Açısal Frekans                                                   |
| <b>ν</b>               | : Poisson Oranı                                                    |
| <b>νX<sub>12</sub></b> | : Mikrofonlar Arası Uzaklık                                        |
| <b>λ</b>               | : Dalga boyu                                                       |
| <b>τ</b>               | : Kıvrımlılık                                                      |

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### AKUSTİK KARA DELİKLERİN BAS TUZAĞI OLARAK KULLANIMIN İNCELENMESİ

Mehmet İZCİ

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

viii + 53 Sayfa

Mayıs 2025

Danışman: Prof. Dr. Olgun Adem KAYA

Bu çalışmada düşük frekans bandında çalışan akustik kara delik temelli bas tuzaklarının yapılabirliği araştırılmıştır. Öncelikle benzetim tabanlı akustik kara delik tasarımları yapılmıştır. Bu amaca yönelik akustik kara deliklerin kaburga arası mesafe ve yüksekliklerinin bağlı olduğu üstel güç yasası formülleri parametrik taramalar ile belirlenmiştir. En iyi soğurum katsayısını veren ve uygulanabilir olan geometri hayata geçirilerek bir sınıfın akustik soğurumu üzerine etkisi frekans tepkisi ölçümleri ile belirlenmiştir. Yapılan ölçümler benzetim çalışmaları ile uyumlu sonuçlar vermiştir. Özellikle EDT, T20, T30 ve netlik gibi temel oda akustiği parametrelerinde 200 Hz ve üzerinde gözle görülür iyileşmelerin olduğu görülmüştür. Akustik kara delik tasarımlarında kullanılan üstel güç yasası fonksiyonlarının optimizasyon yöntemleriyle araştırılıp ve tesir kesitinin artırılması için kara delik sayısının performansa etkisinin incelenmesi ile gelecekte soğurmanın maksimum düzeyde gerçekleşeceği düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Akustik Kara Delik, Soğurma Katsayısı, Oda Akustiği

# **ABSTRACT**

Master Thesis

## **INVESTIGATING THE USE OF ACOUSTIC BLACK HOLES AS BASS TRAPS**

Mehmet İZCİ

Inonu University  
Graduate School of Nature and Applied Sciences  
Department of Physics  
viii + 53 Pages

May 2025

Supervisor: Prof. Dr. Olgun Adem KAYA

In this study, the feasibility of acoustic black hole based bass traps operating in the low frequency band is investigated. First of all, simulation-based acoustic black hole designs were made. For this purpose, the exponential power law formulas on which the rib distances and heights of acoustic black holes depend were determined by parametric scans. The geometry that gives the best absorption coefficient and is feasible is realized and its effect on the acoustic absorption of a classroom is determined by frequency response measurements. The measurements yielded results consistent with the simulation studies. It was observed that there were noticeable improvements at 200 Hz and above, especially in basic room acoustic parameters such as EDT, T20, T30 and clarity. It is thought that the exponential power law functions used in acoustic black hole designs will be investigated by optimization methods and the effect of the number of black holes on the performance in order to increase the cross section will be examined.

**Keywords:** Acoustic Black Hole, Absorption Coefficient, Room Acoustics

## 1. GİRİŞ

Ses, doğanın temel bir olgusudur ve hem fiziksel hem de duyuşsal bir fenomen olarak bilim dünyasında büyük bir öneme sahiptir. Ses fiziği, dalgaların yayılma mekânizmalarını, titreşim kaynaklarını ve bu süreçlerin çevreyle etkileşimini inceleyen geniş bir disiplin olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, ses dalgalarının temel özelliklerinden başlayarak akustik kara deliklerin düşük frekans bölgesindeki ses yutum özellikleri ile bas tuzağı olarak kullanılabilirliği incelenecektir.

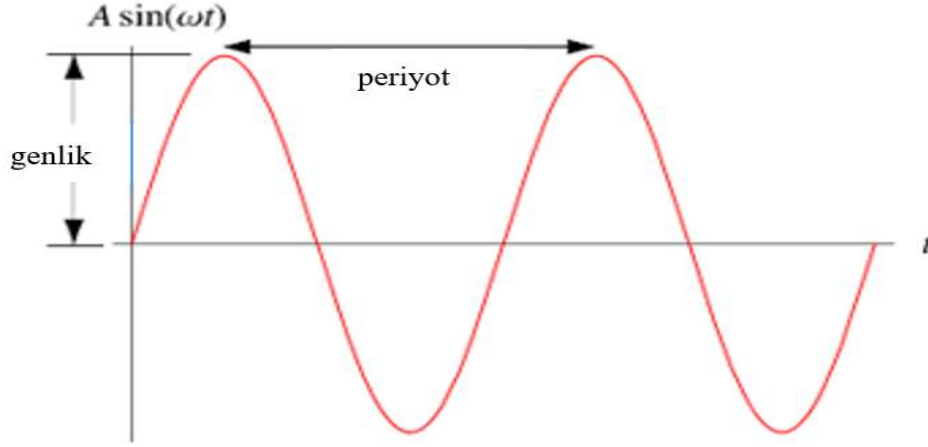
Bu amaca yönelik olarak bu tezde ses dalgasının temel özellikleri ve akustik kara delik kavramı ile literatür özetine, bu bölümün ilerleyen kısımlarında kullanılan benzetim ve deneysel yöntemle ikinci bölümde, sayısal ve deneysel akustik kara delik tasarım çalışmalarına üçüncü bölümde ve son olarak dördüncü bölümde de sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

### 1.1 Ses Dalgasının Temel özellikleri

Akustik; maddenin mekanik titreşimleri olan sesin üretimi, yayılımı ve alımı ile ilgilenen çok disiplinli bir bilim dalıdır ve bu alanda yapılan çalışmalar; mühendislikten sanata, tıptan çevre bilimlerine kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Ses; gaz, sıvı veya katı bir ortamda yayılan akustik dalga titreşimidir; bu titreşim, ortamdaki moleküllerin veya atomların denge konumları etrafında salınım yapmasıyla meydana gelir. Sesin yayılması için bir ortama ihtiyaç duyulması, onun mekânîk bir dalga olmasının temel bir özelliğidir zira boşlukta moleküler etkileşimin olmaması, sesin iletilmesini imkansız kılar. Titreşim, bir sistemin denge noktası etrafında periyodik olarak yaptığı salınım hareketidir ve bu hareketin frekansı, sesin yüksekliğini (perdesini) belirlerken, genliği ise sesin şiddetini ifade eder. Ortamda yayılan bu titreşimler, dalgalar halinde hareket eder ve dalgalar, titreşim yönüne göre boyuna ve enine dalgalar olarak sınıflandırılır; enine dalgalarda titreşim yönü ilerleme doğrultusuna dik iken, boyuna dalgalarda titreşim yönü ilerleme doğrultusuyla aynıdır. Ses dalgaları, moleküllerin sıkışması ve genleşmesi şeklinde yayıldığı için boyuna dalgalar kategorisine girer. Periyot, bir dalganın oluşması için geçen süreye (Şekil 1.1) denir.

Eğer bir olay tekrarlanıyorsa bu durum periyodik olarak isimlendirilir. " T " ile gösterilir ve birimi saniyedir.

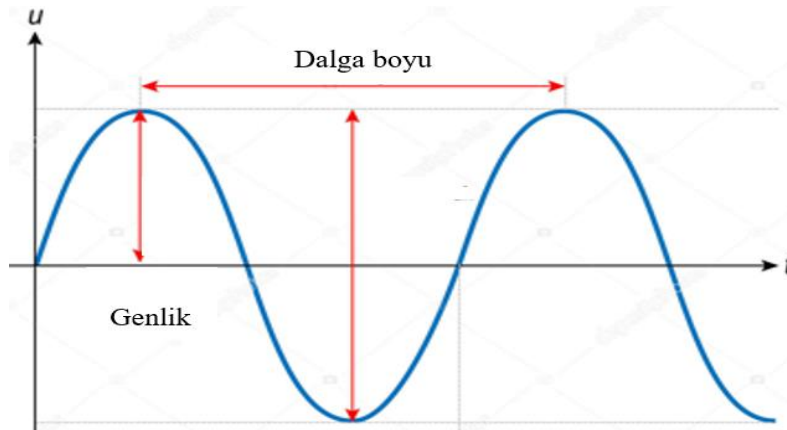
$$\text{Periyot} = 1/\text{frekans} \quad (1.1)$$



**Şekil 1.1:** Ses dalgasının zamana bağlı yayılımı.

Frekans saniyede gerçekleşen titreşim sayısına denir ve " f " ile gösterilir. Birimi Hertz (Hz) veya 1/s'dir.

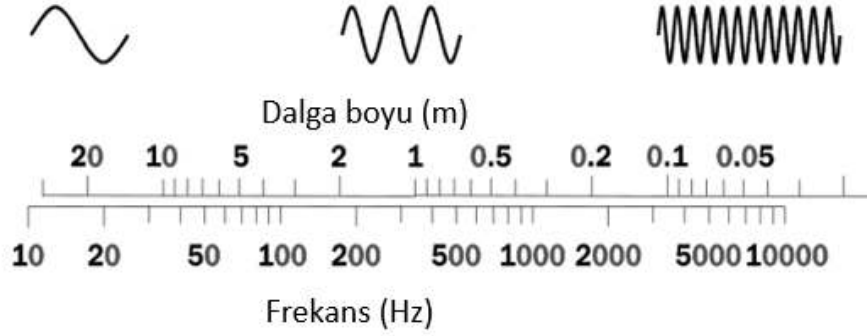
Bir dalga'nın büyüklüğüne yani birbirini takip eden iki tepe noktası ya da iki çukur noktası arasındaki mesafeye dalga boyu (Şekil 1.2) denir. " λ " ile gösterilir. Birimi metredir.



**Şekil 1.2:** Ses dalgasının konuma bağlı yayılımı.

$$\lambda = \text{Sesin hızı} / \text{Sesin frekansı} \quad (1.2)$$

Eşitlik (1.2)'de verilen bu bağıntı dağınıklık bağıntısıdır. Bu eşitliğe göre sesin dalga boyu ile frekansı arasında ters orantı vardır. Frekans arttıkça dalga boyu küçülürken frekans azaldıkça dalga boyu artar. Yani daha yüksek frekansta sesin dalga boyu daha küçük olur (Şekil 1.3).



**Şekil 1.3:** Normal koşullarda havadaki dalga boyu ve frekans

Doğrusal bir dalganın dağıtıklık bağıntısında dalga hızı tanımı da yapılabilir. Buna göre bir dalganın ilerleme hızı olan  $V$ ;

$$V = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \quad (1.3)$$

şeklinde yazılabilir. Dalga, bir periyot süresince dalga boyu kadar ilerlediği için eşitlik (1.3)'te verilen dağıtıklık bağıntısı elde edilir.

Akustik dalganın uzayda ve zamanda nasıl değiştiğini ifade eden akustik dalga denkleminin üç boyutta diferansiyel formu aşağıdaki gibidir.

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1.4)$$

Burada  $\nabla^2$  Laplace operatörü,  $p$  akustik basınç ve  $c$  ses hızıdır.

Akustiğin kapsamı sadece insanlar tarafından duyulabilen ses aralığı ile sınırlı değildir. Bu ses dalgaları frekans değerlerinin büyüklüklerine göre üç farklı grupta incelenebilir [1].

- **Duyulabilir ses dalgaları**

İnsan kulağı, 20 Hz ile 20 kHz aralığındaki ses dalgalarından oluşan ses dalgalarını algılayabilir. Bu aralık, işitilebilir ses olarak da adlandırılır.

- **Ses altı dalgalar**

Frekans aralığı 0,001 Hz ile 20 Hz arasında olan bu ses dalgaları, insan kulağının algılayamadığı frekanslarda yer alır. Bu dalgalar, işitilebilir ses aralığının altında olduğundan insanlar tarafından duyulamaz.

- **Ses Üstü Dalgalar**

İnsan kulağının algılayabileceği maksimum frekans değeri olan 20 kHz' nin üzerinde yer alan ses dalgalarıdır.

Akustik; sesin üretilmesi, yayılması ve kontrol edilmesiyle ilgilenir. Bu yüzden mimariden müziğe birçok alanda uygulamaları vardır. Bir odada herhangi bir ses oluşturulduğunda duyduğumuz şey aslında duvarlardan, tabandan ve tavandan yansıyan ses dalgalarıdır [2]. Odanın duyulabilen sesi yansıtma özelliğine odanın akustiği denir. Farklı odaların farklı akustik sesleri ve farklı yansıtıcı yüzeyleri vardır. Uygun oda akustiği elde etmek için ses emiliminin gerçekleştirilmesi gerekir. Emilim, ses emici özelliklere sahip malzemelerin kullanımı ile sağlanır.

Yüksek frekanslı sesler açık hücreli ya da lifli yapıdaki malzemeler tarafından kolayca soğrulabilmektedir. Bu yüzden kayıt stüdyoları ve benzeri ortamlarda yansımayı azaltmak ve kayıt kalitesini artırmak için sıklıkla kullanılmaktadırlar. Düşük frekanslı ses enerjilerini kontrol etmek çok daha zordur. Çünkü dalga boyları daha uzundur. Bu durumda bas tuzakları farklı bölgelere konumlandırılarak kullanılır.

## **1.2 Kara Delik Kavramı**

Kara deliklerin oluşumu genel göreliliğin öngördüğü temel kavramlardan biri olan olay ufku ile ilişkilidir [3]. Olay ufku, kara deliğin yüzeyine yakın bir noktada, kütle çekiminin o kadar güçlü olduğu bir sınırdır ki bu sınırı geçtikten sonra hiçbir şey hatta ışık bile dışarı çıkamaz. Bu, kara deliklerin gözlemlenemez olmasının temel nedenidir.

Genel görelilik, kara deliklerin oluşumunu anlamada temel teoridir. Albert Einstein tarafından 1915 yılında ortaya koyulan bu teoriyi, yer çekimini uzay zamanın eğriliği olarak tanımlar. Yüksek kütleli bir yıldız yaşam döngüsünün sonuna geldiğinde çekirdek çökmesi gerçekleşir. Bu çökme, yıldızın içindeki kütle çekim kuvvetinin, yıldızın dış basıncı ile dengelenememesine bağlıdır. Sonuç olarak, yıldız, kendi kütlelerinin etkisi altında bir noktaya kadar çökebilir. Kara delikler, birkaç güneş kütlelerine sahip yıldız kütleli kara deliklerden, milyarlarca güneş kütlelerine sahip olan ve galaksilerin merkezlerinde bulunan süper kütleli kara deliklere kadar çeşitli boyutlarda oluşabilir. Kara deliklerin incelenmesi, kuantum mekaniği, termodinamik ve genel görelilik gibi birçok fizik dalının ilgi alanına girmektedir. Kara delikler fiziksel teorilerin sınanabileceği doğal laboratuvarlar olarak hizmet eder. Bu sayede bilim insanları, genel görelilik ve kuantum mekaniği arasındaki etkileşimi inceleme

olanağı bulurlar. Kara delikler, yoğun kütle çekimi ve yüksek enerji ortamları sayesinde bu iki önemli teorinin denendiği uç örneklerdir. Bu çalışmalar, temel fizik yasalarının daha detaylı anlaşılmasını sağlar ve evrendeki en temel süreçlerin nasıl işlediğini anlamamıza yardımcı olur. Kara deliklerin incelenmesinin diğer bir açıdan önemi de galaksilerin dinamiğini anlamamızda önemli bir rol oynamasıdır. Özellikle büyük kütleli kara deliklerin galaksilerin oluşumunu ve büyümesini etkilediğine inanılmaktadır. Bu da kozmolojik yapıyı ve evreni anlamamıza yardımcı olur. Ayrıca bu kara deliklerin araştırılması, gama ışını patlamaları ve kuasarlar gibi yüksek enerjili olayları anlamamıza da yardımcı olur. Bu olaylar evrendeki en güçlü enerji çıkışlarını ve bazı yüksek enerjili oluşumların davranışlarını açıklamak için önemlidir. Yapılan bu çalışmalar kara delikleri açıklayan fiziğin mevcut durumuna geniş bir bakış açısı sunmayı, teorik perspektifleri, gözlemsel kanıtları ve çözülmemiş paradoksları bir araya getirmektedir. Buradaki amaç, son gelişmeleri sentezlemek ve devam eden tartışmaları ve zorlukları vurgulamaktır.

### **1.3 Akustik Kara Delik Kavramı ve İlgili Literatür**

Akustik kara delikler, ses dalgalarının yutulduğu veya soğrulduğu özel ses emici yapılar olarak tanımlanabilir. Bu yapılar ses enerjisinin etkili bir şekilde emilmesini sağlamak amacıyla tasarlanır. Ses dalgalarının enerjisinin yüzeyler, malzemeler veya yapılar tarafından emilmesi yerine, bu dalgaların kara delik içine nüfuz etmesini ve içerideki yapı ve malzemeler tarafından etkili bir şekilde emilmesini hedeflemektedir.

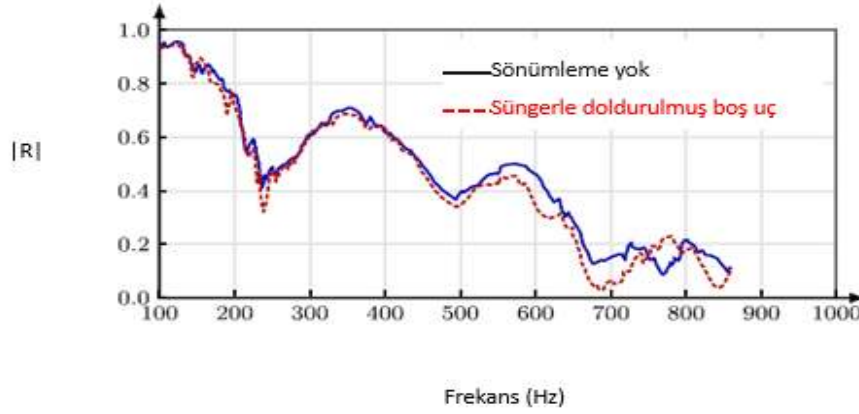
Akustik kara delik etkisi [4] yapısal titreşimler ve ses yayılımı üzerinde geniş bantlı kontrol sağlamak için verimli bir yöntemdir. Bu etkinin arkasındaki çalışma mekanizması, belirli bir yavaşlatıcı yapı aracılığıyla dalga hızının sürekli olarak azaltılmasını sağlamaktır. Beklenen sonuç yayılma hızının dalgaların akustik kara deliğin sonuna doğru gittikçe sıfıra inmesidir. Bu durumda dalgalar hiçbir zaman son noktaya ulaşamayacak ve yansıma oluşamayacaktır.

Bu etki ilk olarak 1988 yılında Mironov tarafından incelenmiştir [5]. İncelemesini kalınlığı üstel bir fonksiyona göre (güç yasası formülü) düzgün bir şekilde sıfıra azalan bir giriş için yapmıştır. Mironov, böyle bir girişte bir enine dalga yayıldığında dalga sayısının ve genliğinin arttığını, yayılma hızının ise girişin ucuna doğru giderken sıfıra yaklaştığını göstermiştir. Birkaç yıl sonra Krylov [6-8] aynı etkiyi kalınlığı güç yasası formülüne göre azalan bir çukura sahip olan levha için göstermiştir. O zamandan beri girişler ve levhalar için yapılan akustik kara delik üzerine yapılan çalışmalar oldukça artmıştır [9-10]. Bu

Çalışmaların çoğu levhaların kalınlık profiline ilişkin kullanılan g yasası formüllerinde bir kusuru ele almaktadır. Çünkü pratikte kalınlığı sıfıra indirmek mümkün değildir. İdeal profilin kısmi olarak kesilmesi Krlyov ve Tilman tarafından önerilmiştir [11]. Bu öneriye göre dalgaların hızının yavaşladığı ve dalga genliğinin arttığı plakanın ince kısmına küçük bir miktar sönümleyici malzeme kullanılarak titreşimler en aza indirebilir. Böylece küçük miktar sönümleyici malzeme kullanılarak titreşimler verimli bir şekilde söndürülmesi mümkün olabilir.

Son zamanlarda akustik kara delik etkisi, titreşimlerin kontrol edilmesi ve emilmesi [12-20], dalga yayılımı manipülasyonu [21-27] ve vibro akustik [28-32] gibi çeşitli uygulamalarda incelenmiştir. Bugüne kadar bu alan üzerinde yapılan çalışmaların çoğu kirişler ve plakalar üzerindeki titreşimlere odaklanmış olup hava ortamında ses emilimi için akustik kara delikler üzerine yalnızca birkaç çalışma yapılmıştır. Mironov ve Pislyakov böyle bir çalışmayı tanıtan ilk kişilerdir [33]. Ses dalgalarının hızının sıfıra yaklaşabileceği bir dalga kılavuzu sonlandırma tasarımı incelediler. Bu durum, yapısal akustik kara deliklerde gözlemlenen enine dalga davranışına benzemektedir. Tasarımları apı belirli bir üstsel g yasası formülü ile değişen ve duvarlarının akustik iletkenliğinin konuma bağlı olarak farklılık gösterdiği silindirik bir dalga kılavuzunu içermektedir. Buna ek olarak sabit çaplı bir silindirik kanal içerisinde aralarında belirli boşluklar bulunan ve ses dalgalarının yayılımını etkileyen bir dizi halkadan oluşan alternatif bir dalga kılavuzu rneği de sundular. Bu halkaların i çapı üstsel g yasası formülüne göre düzgün bir şekilde sıfıra doğru azalacak şekilde tasarlanmıştır. Ancak pratikte halkaların i çapını, tıpkı kirişlerde kalınlığın sıfıra indirilememesi gibi sıfıra indirmek mümkün değildir. Bu nedenle formül belirli bir noktada kesintiye uğrayacaktır. Dalga kılavuzunun sonunda bir miktar sönümleme ile ses dalgalarının hızı düşecek ve genliği artacaktır. Bu etkiler sayesinde özellikle yüksek frekanslarda yansıma katsayısını azaltmak amacıyla bu tasarımın kullanılabileceği gösterilmiştir. Bu sonuçlardan ilham alarak El Ouahabi ve arkadaşları, i çapları doğrusal ve kartezyen çaplara göre azalan halkalar içeren iki silindirik kanal inşa ettiler [34-35]. Bu iki düzeneği sırasıyla doğrusala akustik kara delik ve kartezyen akustik kara delik olarak isimlendirdiler. Ayrıca g yasası formülünün kesintiye uğramaması için dalga kılavuzunun sonunda sönümleme malzemeleri kullandılar. Sönümleme malzemelerini kullanacakları yerin seğimini yaparken akustik kara deliklerin kesilme hatasını azaltmak için ince bölüme sönümleme malzemesi eklemeyi uygun buldular. Doğrusal ve kartezyen akustik kara deliklerde dalga kılavuzunun sonundaki yansımalar, farklı frekanslarda çeşitli miktarda ve

çeşitli türde sönümlleme malzemeleri kullanılarak ölçülmüştür. Sonuçlar, Mironov ve Pislyakov' un teorik tahminleriyle oldukça uyumlu olan ve hiçbir sönümlleme malzemesi kullanmadan bir akustik kara delik etkisi göstermiştir [33]. Aksine, ucuna eklenen sönümlleme malzemesi yansıma katsayısını daha fazla azaltmamıştır.



**Şekil 1.4:** El Ouahabi ve arkadaşları tarafından ölçülen yansıma katsayısını göstermektedir.

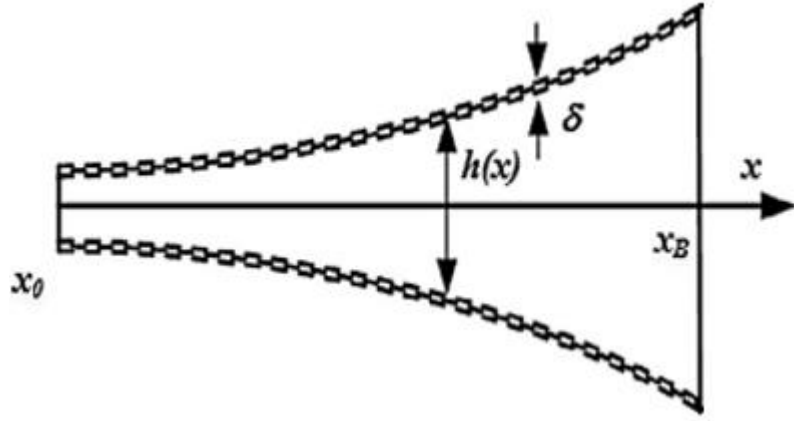
Sönümlleme malzemesinin eklenmesinin yansımalar üzerindeki etkisi çok azdır. Guasch ve arkadaşları [36] doğrusal ve kartezyen akustik kara deliklerde yansıma katsayısı üzerinde kalınlık ve halka sayısı, güç yasası profilinin bozulma uzunluğu, halkaların minimum çapı ve sönümlleme miktarı gibi etkili parametreleri incelemek için transfer matris yöntemi kullandılar. Halkalar arasındaki boşlukları lifli malzeme ile doldurduklarını ve boşluklardaki ses emiliminin etkilerini yaklaşık olarak belirlemek için deneysel formüller kullandılar. Ayrıca yakın zamanda yapılan bir çalışmada Guasch ve arkadaşları [37] halkaların ve boşlukların sayısı yeterince büyükse böyle bir tasarımdaki dalga yayılımının sürekli bir problem olarak ele alınabileceğini gösterdiler. Ayrıca böyle bir problemin denkleminin bir ses emici sıvı ile doldurulmuş basit bir dalga kılavuzunda dalga yayılımını yöneten denklemlerle aynı olduğunu gösterdiler. Bu, transfer matris yönteminin kullanılarak problemin çözülmesini ve farklı frekansta yansıma katsayılarının hesaplanmasını sağlamıştır. Transfer matris yöntemi dışında Holkamp ve Semperlotti [38] akustik kara delik sonlandırmalarıyla akustik kanalların simülasyonlarında kesirli dereceli operatörlerin kullanılmasını incelediler.

Bahsedilen bütün çalışmalarda akustik kara deliklerin kanatçıklı tasarımının bir varyasyonu olarak, Jimenez ve arkadaşları [39] geniş bir frekans aralığında neredeyse mükemmel ses emilimi elde etmek için Helmholtz rezonatörlerinin bir kademesini

kullandılar. Her rezonatörün rezonans değerini ayarlayarak mükemmel emilimin gerçekleştiği frekans değerini belirlediler. Son yıllarda yapılan çalışmalardan birini de Mi ve arkadaşları gerçekleştirmiştir [40]. Açık uçlu kartezyen akustik kara deliklerde dalga kılavuzunun sonundaki yansımaları, farklı miktar ve farklı türde sönümlleme malzemelerinin kullanımı durumunda çeşitli frekanslarda ölçtüler. Ancak bu çalışmada herhangi bir sönümlleme malzemesi kullanılmamıştı. Bu durumda iletim ve yansıma davranışlarını analitik ve deneysel olarak incelediklerinde sönümlleme malzemesi olmadığı için dalga kılavuzunun sonunda ortaya çıkan yansımaların daha yüksek frekanslarda belirgin hale geldiğini ve akustik kara delik prensiplerinin temel mekanizmasının sadece geometrik yapı ve malzeme özellikleriyle şekillendiğini buldular. Mironov ve Pislyakov [41] kanatçıklı bir tasarımı deneysel bir çalışmada kullanmış ve son boşluklara farklı sönümlleme malzemeleri eklemenin yansıma katsayısı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuçları farklı emilim malzemelerinin düşük frekanslar için yansıma katsayılarını etkilediğini göstermişlerdir. Ancak daha yüksek frekanslarda yansıma katsayısı esasen emici malzemenin seçiminden bağımsızdır. Bu bulgular yapılan diğer sonuçlarla uyum göstermektedir. Ayrıca başka bir akustik kara delik daha tasarlamışlardır. Bu tasarımda kara deliğin sonuna doğru yoğunluğu artan bir yansıma önleyici sıvı kullanmışlardır. Düzenegin içindeki ortamın yoğunluğu kâğıt, karton ve keçe gibi malzemelerle arttırılmıştır. Katmanların yoğunluğu düzenegin sonuna doğru giderek artmaktadır. Ölçülen yansıma katsayısı ise teoride yapılan tahminlerle oldukça uyumlu çıkmıştır.

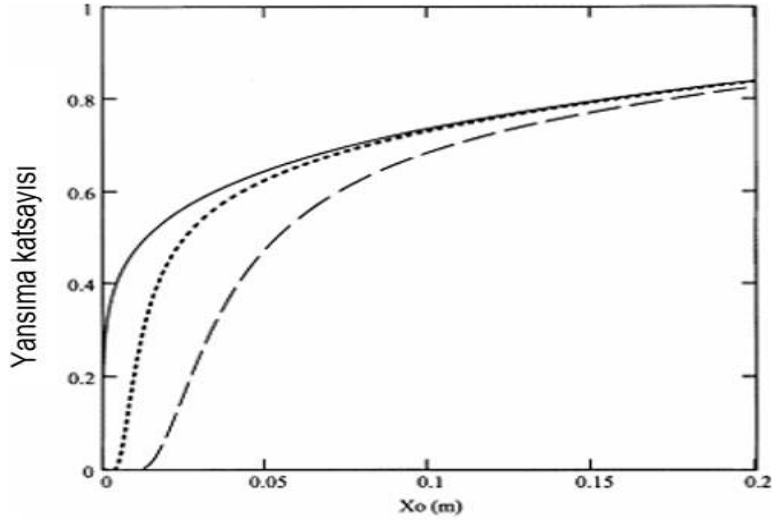
Sönümllemenin bir akustik kara deliğin performansında kritik rol oynadığı iyi bilinmektedir [39]. Ancak çeşitli deneysel çalışmalar, özellikle yüksek frekanslarda dalga kılavuzunun sonuna emici malzeme eklemenin yetersiz olduğunu göstermiştir [34-35], [41]. Diğer deneysel çalışmalarda herhangi bir emici malzeme dikkate alınmadan yansıma katsayısında önemli bir azalma olduğu kayıt edilmiştir. Bu emilim mekanizmasının boşluklardaki visko termal kayıplar olduğu iddia edilmiştir [40].

Krylov 2003 yılında ilk kez kara delik terimini kullanmıştır [42]. Şekil 1.5' te gösterildiği gibi bir boyutlu akustik kara delik üzerindeki teorik ve sayısal çalışmalar geliştirilmiştir [11].

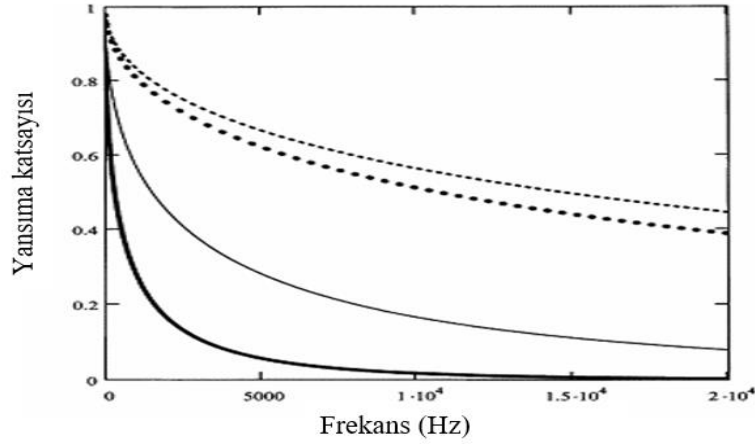


**Şekil 1.5:** İnce sönümleme katmanlarıyla kaplı kesikli kuadratik kamalar [11,43].

Şekil 1.6 ve Şekil 1.7’ de ise çeşitli uzunluktaki kesimlerin ve soğurucu film kalınlıklarının akustik kara deliğin yansımaya katsayısı üzerindeki etkisini göstermektedir.



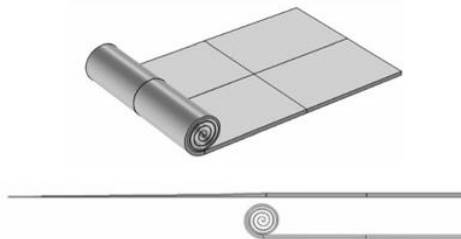
**Şekil 1.6:** Kalın bir emici film ile kaplı kama için yansımaya katsayısı. Düz çizgi eğrisi örtülmemiş bir kamaya aitken kesikli ve noktalı çizgi eğrileri ise sırasıyla göreceli sertlik  $E_2/E_1 = 2/30$  ve  $E_2/E_1 = 2/3$  değerlerine sahip ince filmlerle örtülü kamalara karşılık gelir [11,43].



**Şekil 1.7:** Yansımaya katsayısının frekansa bağıllığı R:  $X_0 = 1.5$  ve  $2.5$  cm (sırasıyla daha kalın ve daha ince eğriler); dolu ve noktalı eğriler emici filmlere sahip kama ve kaplanmamış kama ile örtüşmektedir; film malzeme kayıp faktörü  $\nu = 0.2$ ’ dir ve film kalınlığı  $\square = 5\mu m$ ’ dir [11,43].

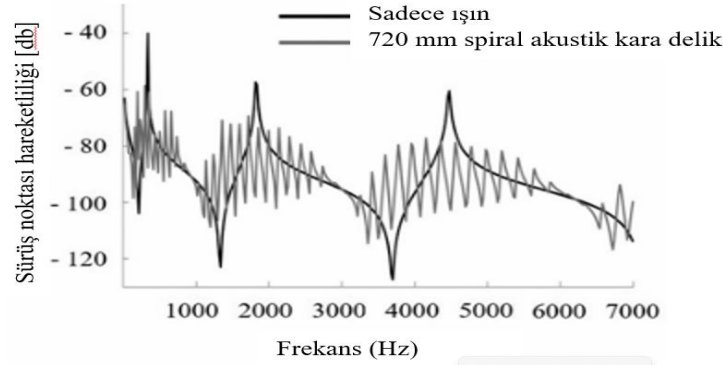
İlk olarak kesim uzunluğu çok kısa olduğunda bile kaplanmamış kama (kesikli çizgi) üzerindeki yansımaya katsayısının büyük oranda artacağı gözlemlenmiştir. İkinci olarak yansımaya katsayısının kesim uzunluğundaki artışla birlikte arttığı görülmektedir. Üçüncü olarak daha yüksek dereceli sertliğe sahip sönümlenme katmanları yansımaya katsayısını daha da azaltmaktadır. Son olarak yansımaya katsayısı, uyarım frekansındaki artışla azalır. Şekil 1.6 ve Şekil 1.7 akustik kara delik kamalarının yüzeylerindeki soğurucu ince katmanların, kenarlardan gelen eğilme dalgalarının yansımaya katsayılarını çok düşük seviyelere indirebileceğini göstermektedir.

Jeon ve arkadaşları, spiral akustik kara delik kirişlerinin analizi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir [44,45]. Spiral akustik kara delik, Şekil 1.8’de gösterildiği gibi dağıtılmak üzere dengeli spiral temel çizgiler arasında eşit bir mesafede bulunan Arşimed spirali içeren kompakt ve eğrisel bir yapıya sahiptir.



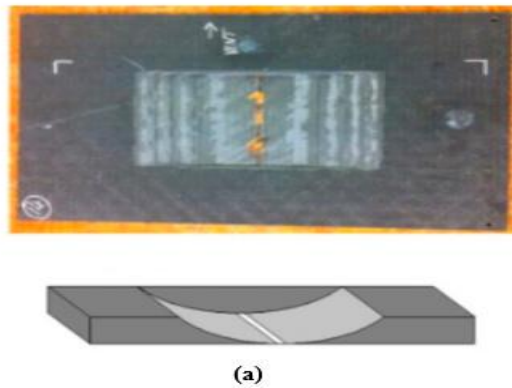
**Şekil 1.8:** Spiral akustik kara delikli kirişin şekli. Akustik kara deliğin uzunluğu  $720\text{ mm}$ ’ dir [11,45].

Şekil 1.9, 720 mm uzunluğundaki spiral akustik kara delik içeren bir kirişin sürücü noktası hareketliliğini referans homojen kirişle (siyah çizgi) karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Spiral akustik kara deliğe sahip kirişi, referans kirişe göre %10 daha hafif olmasına rağmen rezonans zirvede büyüme yada ek sönümleme olmaksızın %90 oranında azalmaktadır. Bu durum sarmal akustik kara deliklerin seçiminin sönümleme konusunda büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

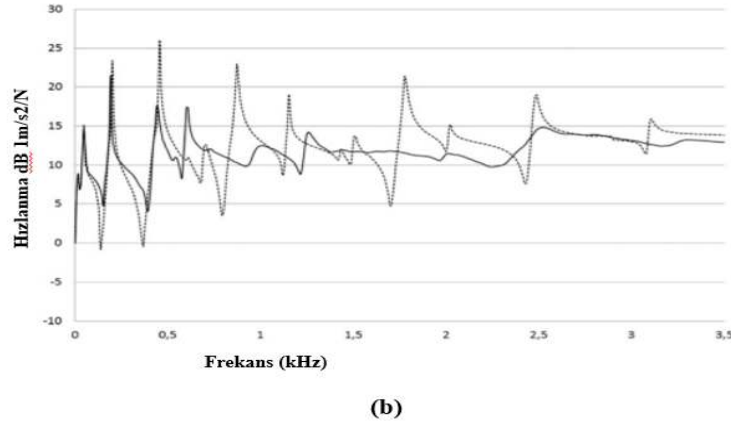


**Şekil 1.9:** 720 mm akustik kara delik (gri çizgi), referans üniform ışın (siyah çizgi) ile kirişin sürüş noktası hareketliliği [11,45].

Bowyer, çeşitli bir boyutta akustik kara delik yuvalı levhaların titreşim performansını incelemiştir [46]. Numunelerden biri şekil 1.10 (a)' da gösterilmiştir. Bu numunenin deneysel sonucundan referans levhaya kıyasla önemli bir ivme düşüşünün elde edildiği gözlenmiştir. Çeşitli yuvalı diğer çelik levhaların ve kompozit levhaların deneysel sonuçları da kabul edilebilir sönümleme performansı göstermektedir. Kompozit levhalar, büyük malzeme kaybı faktörü nedeniyle sönümleyici tabaka eklenmeden bile iyi sönümleme performansına sahiptir.



**Şekil 1.10:** (a) Karbon fiber kompozit numune ve numunenin boylamasına kesiti [11,46].



**Şekil 1.11:** (b) Akustik kara delik yuvalı plaka (kesikli çizgi) ve referans plaka için ivme (kesikli çizgi) [11,45].

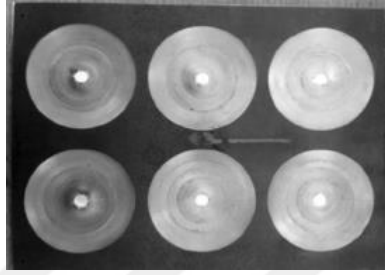
Bowyer ve arkadaşları tarafından iki boyutlu akustik kara delik kullanılarak fleksural titreşimlerin sönümlenmesi üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir [47]. Şekil 1.12 deneysel örneklerin şemalarını göstermektedir. Zorlanmış uyarım, plakanın merkezine 0-9 kHz frekans aralığında bir sarsıcı aracılığı ile uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar, referans plakaya kıyasla tek bir iki boyutlu akustik kara delik ile gömülü plakanın 3 kHz' in altında çok az sönümlenme sağladığını göstermektedir. 3kHz, 8-9 kHz bölgesinde sönümlenme 3-8 db arasında değişmekte olup maksimum sönümlenme 6 kHz de gerçekleşmektedir. Uzun dalga boyu nedeniyle akustik kara deliklerin sönümlenme performansı düşük frekansta belirgin değildir. Ancak daha yüksek frekanslar için daha iyi sönümlenme performansına sahiptir. Bu çalışmada ayrıca mevcut rastgele düzende çoklu delikli plakaların tek iki boyutlu akustik kara delikli plakaya kıyasla iki boyutlu akustik kara deliklerin sönümlenme performansını önemli ölçüde arttırmadığı da belirtilmektedir.



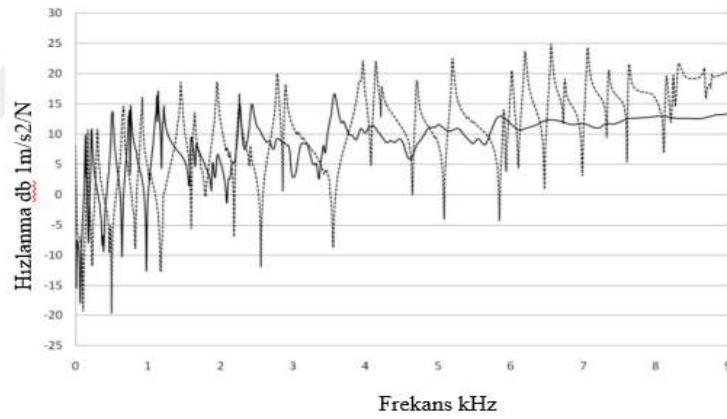
**Şekil 1.12:** (a) Merkez delikli tekil iki boyutlu akustik kara delik, (b) Merkez delikli üç tane iki boyutlu akustik kara delik [11,47].

Bowyer ve arkadaşları daha sonra plakalardaki fleksural titreşimlerin sönümlenmesi üzerine bir başka deneysel çalışma yapmışlardır [47]. Şekil 1. 13'te altı adet iki boyutlu kara

delik içeren çelik plakayı göstermektedir. Şekil 1.14'te akustik kara deliksiz referans plakaya kıyasla altı akustik kara delikli plakanın ivmesinin keskin bir şekilde azaldığını açıkça göstermektedir. Ayrıca etkili sönümleme performansının minimum frekansının yaklaşık 1,5 kHz olduğunu göstermektedir. Bu iki deneysel çalışma, sönümleme katmanlı akustik kara deliklerin plakaların titreşimini azaltabileceğini ve akustik kara delik sayısı ile konfigürasyonunun titreşim sönümlemesi performansını etkilediğini göstermektedir. Akustik kara delik sayısındaki artış, iki boyutlu akustik kara delik ve sönümleme katmanlı plakanın etkili sönümleme performansı frekansını genişletebilir.



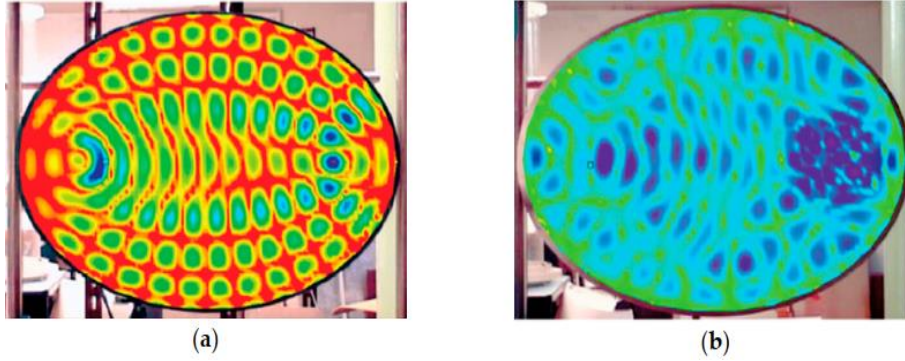
**Şekil 1.13:** Altı adet iki boyutlu akustik kara delik içeren üretilmiş çelik levha [11,47].



**Şekil 1.14:** 14 mm' lik merkezi deliklere ve ek sönümleme katmanlarına sahip altı adet iki boyutlu akustik kara delik içeren bir plaka (kesikli çizgi) ve bir referans plaka (kesikli çizgi) için ölçülen ivme [11,47].

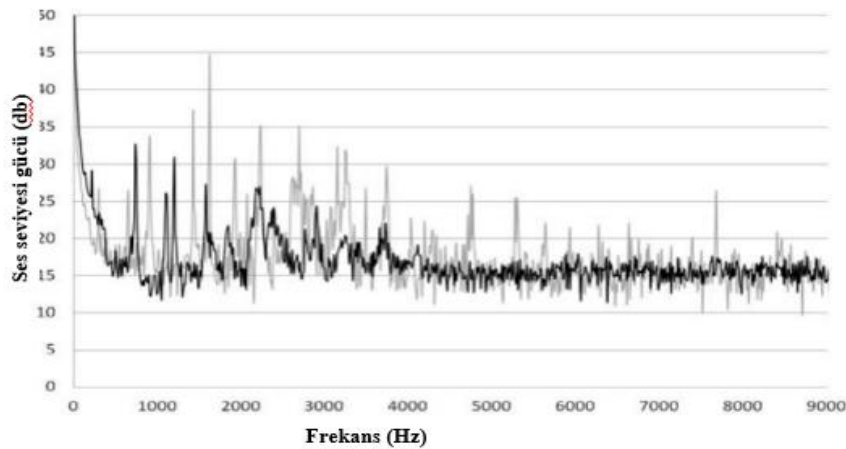
Akustik kara delikli diğer plaka şekilleri de incelenmiştir. İnce bir sönümleme tabakası ve kısıtlayıcı bir tabaka ile merkezi bir akustik kara delikli dairesel bir plaka için hareketlilikler O'Boy ve Krylov tarafından incelenmiştir [48]. Nokta ve çapraz hareketlilikler, referans plakaya kıyasla 17 db'ye kadar rezonans piklerinin bastırıldıklarını göstermektedir. Eliptik plakalarda titreşim sönümlemesi için akustik kara delik etkisinin sayısal ve deneysel bir çalışması Georgiev ve arkadaşları tarafından incelenmiştir [12]. Akustik kara delikli ve akustik kara deliksiz eliptik plakalar test edilmiştir. Şekil 1.15 akustik kara delikli (b) ve akustik kara deliksiz (a) plakaların hız alanlarını göstermektedir.

Uygulama noktası sol odak noktasına uygulanırken akustik kara delik sağdaki odak noktasındadır. Akustik kara delikli plakanın daha düşük bir titreşim genliğine sahip olduğu gözlenmektedir.



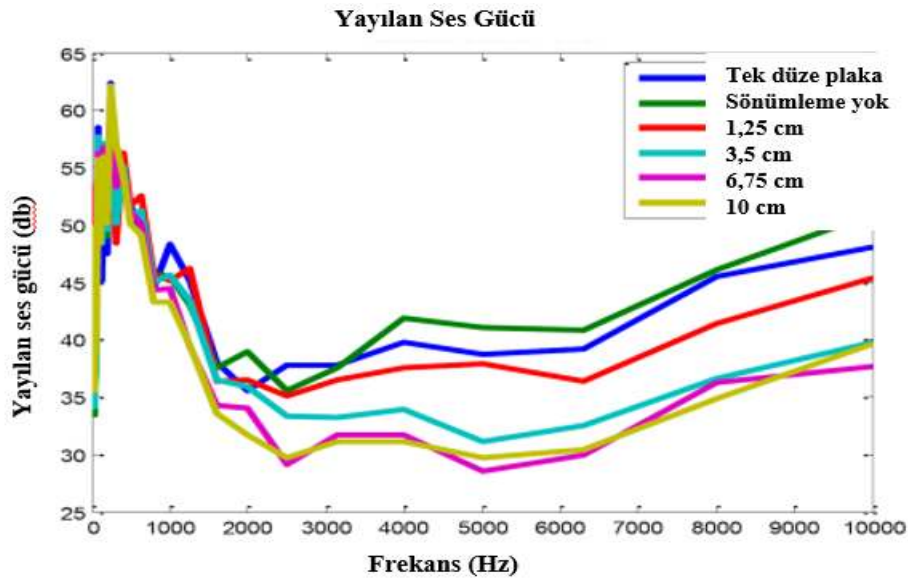
**Şekil 1.15:** 8671 Hz' de akustik kara deliksiz (a) ve 8117 Hz' de akustik kara delikli (b) eliptik bir plakanın hız alanları [11,12].

Bowyer ve Krylov tarafından yapılan diğer bir çalışmada, her bir akustik kara deliğin merkezinde sönümlenme bulunan altı adet iki boyutlu akustik kara delik gömülü 300 x 400 x 5 mm kalınlığında bir plaka dikey olarak asılmıştır [60]. Uyarma kuvveti plakanın merkezine uygulanmıştır. Sonuçlar, sönümlenme katmanlı altı adet iki boyutlu akustik kara delik içeren bir plakanın ses radyasyon güç seviyesini, referans plakanın ses radyasyon güç seviyesi ile karşılaştırmaktadır. Bu karşılaştırma Şekil 1.16'da gösterilmiştir. 1 kHz'nin altında ses güç seviyesinde çok azalma olmuştur. 1 ile 3 kHz arasında ses güç seviyesi referans plakaya göre 10-18 desibel arasında azalmış ve ses radyasyonundaki maksimum azalma 1,6 kHz'de gerçekleşmiştir. 3 kHz'in üzerinde ise neredeyse tüm ses sönümlenmiştir. Bu çalışma çelik levhanın ses radyasyonunu etkili bir biçimde azalttığını göstermektedir.



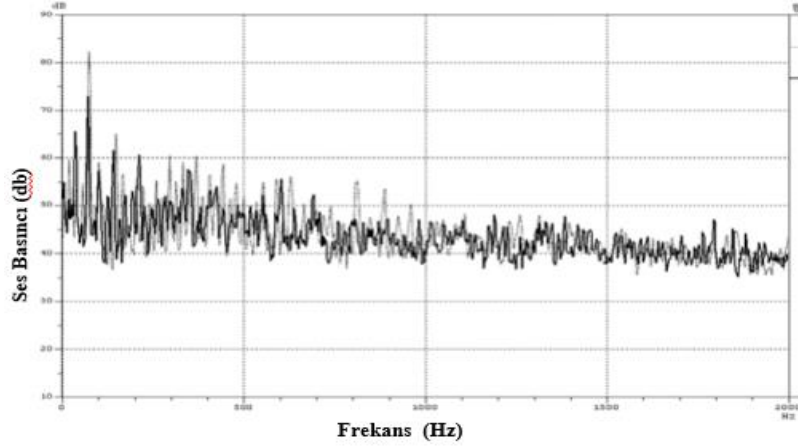
**Şekil 1.16:** Ses gücü seviyesi karşılaştırması. Karşılaştırma altı girinti içeren ve bir sönümlenme katmanı (siyah çizgi) ile kaplı bir plaka ile referans plaka (gri çizgi) arasında yapılmıştır [11,49].

Feurtado ve Conlon, bir akustik kara delik dizisine sahip bir plakanın ses gücü üzerine etkisini araştırmak için bir başka çalışma yapmışlardır [50]. Sönümlleme katmanının miktarının akustik kara delik performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için çeşitli çaplarda akustik kara delik katmanlı akustik kara delikler test edilmiştir. Şekil 1.17’de tek düzen bir plaka ve çeşitli çaplarda sönümlleme malzemesi olan akustik kara delik plakası için bir yoğunluk algılayıcısı tarafından test edilen üçte bir oktav bant ışınlanan ses gücünü göstermektedir. Bir sönümlleme katmanlı akustik kara deliğin referans plakaya kıyasla (mavi çizgi) 15 kHz’in üzerinde ışınlanan ses gücünü etkili bir şekilde azalttığı gözlenmiştir.



**Şekil 1.17:** Düzgün bir plaka ve değişen çaplı sönümlleme malzemesine sahip akustik kara delik plaka için 1-3 oktav ses yayılan bant gücü [11,50].

Bowyer ve Krylov tarafından akustik kara deliklerin motor kapağının ses radyasyonu üzerindeki etkisini araştırmak için pratik bir deney çalışması daha yapılmıştır [51]. Akustik kara delikler iki plakaya işlenmiştir. Daha sonra motor kapağına yapıştırılmıştır. Şekil 1.18’de kaput kapalı iken 2100 rpm’ de akustik kara delikli plakaların bağlandığı motor kapağı ile referans motor kapağının (kesikli çizgi) ses radyasyonunu karşılaştırmaktadır. Referans numunesine göre toplam ortalama 6,5 db azalma kaydedilmiştir. Bu akustik kara delikli motor kapaklarının araç motorundan gelen ses radyasyonunu azaltabileceğini göstermektedir.



**Şekil 1.18:** Referans motor kapağından (kesikli çizgi) gelen ses radyasyonu, 2100 devir/dakika da kaput kapalı iken akustik kara delikli motor kapağı bağlantı plakaları (siyah çizgi) ile karşılaştırılmıştır [11,51].

Başka bir çalışmada Azbaid ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir [33,52,53]. Şekil 1.19’da gösterildiği gibi yapıların iç yarıçapı sırasıyla doğrusal fonksiyon ve güç yasası fonksiyonu izleyerek tasarlanmıştır. İki mikrofön transfer yöntemi kullanılarak deney sonuçları yansıma katsayısında önemli bir azalma olduğunu göstermektedir. Emici gözenekli malzemelerin eklenmesi yansıma katsayısında daha da fazla azalmaya neden olmuştur.



**Şekil 1.19:** (a) Üstel  $m=1$  olan akustik kara deliğin ve (b) üstel  $m=2$  olan akustik kara deliğin fotoğrafı [11,52].

#### 1.4 Akustik Kara Deliklerin Teorik Arka Planı

Referans [5] ve referans [43] e göre Mironov, kalınlığı aşağıdaki gibi azalan kirişler ve plakalar için bükülme dalga hızının sıfıra yaklaştığını göstermiştir.

$$h(X) = aX^m \quad (1.5)$$

Eşitlikte  $h$  kalınlık,  $a$  sabit,  $m$  kuvvet yasasına dayalı eğrinin üssü ve  $X$  ideal kuvvet yasa eğrisinin ucundan olan mesafedir.

Ancak gerçekte üretim tekniklerindeki sınırlamalar nedeniyle sıfır kalınlıkta bir yapı oluşturmak mümkün değildir. Bu yüzden serbest uçta artık bir  $h_1$  kalınlığı olacaktır. Bu durumda bir boyutta kuvvet yasasına dayalı eğrinin denklemi:

$$h(x) = \varepsilon x^m + h_1 \quad (1.6)$$

Burada  $\varepsilon$  m pozitif bir rasyonel sayıdır ve  $m \geq 2$  dir,  $\varepsilon$  parametresi sabittir, x artık kalınlık bulunan kuvvet yasa eğrisinin ucundan olan mesafedir ve şematik gösterimi aşağıdaki gibidir.



**Şekil 1.20:** Bir boyutta akustik kara deliğin şematik gösterimi [54].

Kirişin kalınlığı T için,  $\varepsilon$  parametresi uzunluğu etkiler ve akustik kara deliğin uzunluğu:

$$L_{AKD} = \sqrt[m]{\frac{T-h_1}{\varepsilon}} \quad (1.7)$$

Böylece:

$$\varepsilon = \frac{T-h_1}{L_{AKD}^m} \quad (1.8)$$

O halde akustik kara delik eğrisi şudur:

$$h(x) = \frac{T-h_1}{L_{AKD}^m} x^m + h_1 \quad (1.9)$$

Burada T kirişin kalınlığını,  $h_1$  akustik kara deliğin uç kısmının kalınlık kalıntısını,  $L_{AKD}$  akustik kara deliğin uzunluğunu ve m güç yasası denkleminin üssünü ifade eder [54].

Faz hızı  $C_p$  grup hızı  $C_g$  ile verilir.

$$C_p = \sqrt[4]{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}} \sqrt{\omega h(x)} \quad (1.10)$$

$$C_g = \sqrt[4]{\frac{4E}{3\rho(1-\nu^2)}} \sqrt{\omega h(x)} \quad (1.11)$$

Burada E young modülü [55],  $\nu$  poisson oranı [56],  $\rho$  kütle yoğunluğu,  $h(x)$  kirişlerin akustik kara delik bölümündeki değişen kalınlık,  $\omega$  bükülme dalgasının açısal frekansıdır.

$h_1 = 0$  ve X sıfıra yaklaşırken yani akustik kara deliğin merkezine yaklaşırken faz hızı ve grup hızı sıfıra yaklaşır [57-58].

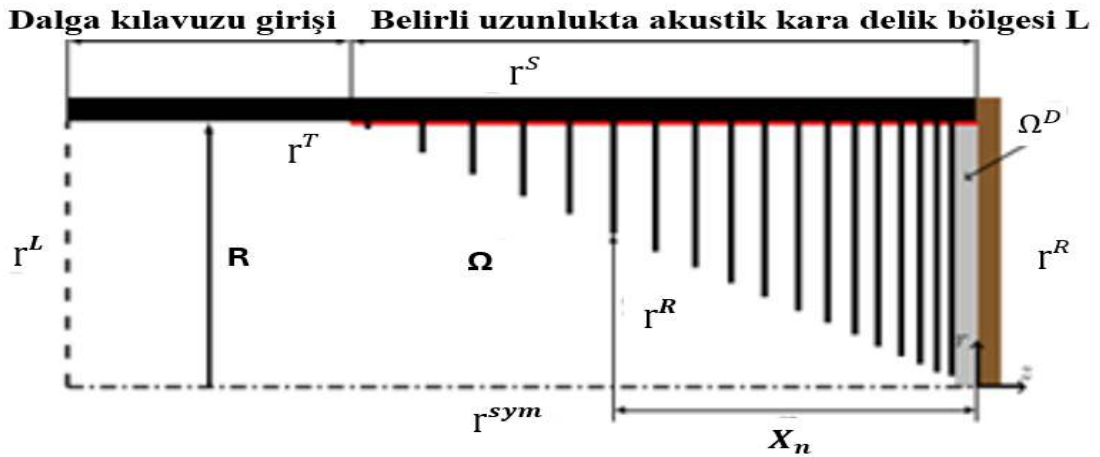
Yayılma zamanı  $T_0$  şekil 1.4' te  $x_{AKD}$  ' den  $x_0$  ' a kadar gösterilmiştir.

$$T_0 = \int_{L_{ABH}}^{x_0} \frac{1}{C_g} dx = \sqrt[4]{\frac{12\rho(1-\nu^2)}{E\omega^2}} \frac{1}{2-m} \left( x_0^{1-\frac{m}{2}} - L_{AKD}^{1-\frac{m}{2}} \right) \quad (1.12)$$

Eşitlik (1.12)' ye göre  $x_0$  sıfıra yaklaştığında ve  $h_1 = 0$  olduğunda yalnızca  $m \geq 2$  olduğunda  $T_0$  sonsuza yaklaşır[59].



**Şekil 1.21:** Akustik dalga kılavuzunun içine gömülü 3 boyutlu akustik kara delik gösterimi [60].



**Şekil 1.22:** Ei Quahabi vd. tarafından incelenen doğrusal akustik kara deliğin eksen simetrik modeli [34,35]. Burada  $r^w$  halkaların yüzeyidir.

Şekil 1.22’de bir dalga kılavuzunun içindeki hava bölgesinde akustik dalgaların doğrusal dalga yayılımı ele alınmaktadır. P akustik basıncı göstermektedir. Dalgaların zamanla sinüzoidal olarak değişimini gösteren ifade:

$$P(x, t) = \text{Re}\{p(x)e^{i\omega t}\} \quad (1.13)$$

şeklindedir. Burada W açısal frekanstır. " Re " ifadesi ise karmaşık sayının reel kısmını ifade eder. Akustik basıncın karmaşık genlik fonksiyonu p, silindirik koordinatlarda;

$$x = (r, z)^T \quad (1.14)$$

ile gösterilir ve Helmholtz denklemini sağlar.

$$\nabla \cdot (r \nabla p) + k^2 r p = 0 \quad (1.15)$$

Burada  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial r}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$  silindirik koordinatlarda gradyanı,  $\Omega$  dalga kılavuzunun hava bölgesini, c ise havadaki ses hızıdır:

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (1.16)$$

Burada k dalga sayısını göstermektedir. Eşitlik (1.15)’te sistem içerisine herhangi bir sönümlenme malzemesi dahil edilmemiştir. Bu başlangıçta hava bölgesinde herhangi bir enerji kaybının hesaba katılmadığını gösterir.  $r^w$  halka yüzeylerinde termal kayıpların etkisini modellemek için Berggren vd. tarafından geliştirilen sınır koşulu kullanılmaktadır [61]. Bu model sınır koşulunu teorik temelini açıklamaktadır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmadaki benzetim hesaplamaları, Sonlu Elemanlar Metodu ile çözümler üretebilen COMSOL Multiphysics yazılım paketinin akustik modülü kullanılarak yapılmıştır.

### **Sonlu Elemanlar Yöntemi:**

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM), başlangıçta büyük bir yapının küçük parçalara ayrılabilceği fikrine dayanıyordu. Bu küçük parçalar, belirli noktalarda bir araya gelip birbirleriyle bağlantı kurarak yapının tamamını oluşturuyordu. İlk olarak bu yöntem yapı mühendisliğinde kullanıldı. Daha sonra bu yöntem daha genel problemlere de uygulanmaya başlandı. Bunu mümkün kılan şey, “sanal iş prensibi” adı verilen bir matematiksel yaklaşımdı [62,63]. Bu prensip, fiziksel bir sistemde oluşan kuvvetler ve hareketler arasındaki ilişkiyi anlamamıza yardımcı oldu ve FEM’ in çok farklı alanlarda kullanılmasını sağladı [64].

Analiz edilecek yapı düğüm noktalarıyla birbirine bağlanan sonlu elemanlara ayrılır. Elde edilen denklem sistemi, bilgisayar destekli matematiksel işlemlerle çözülür. Bu yöntem yüksek doğrulukta yaklaşık (nümerik) çözümler sunar.

### **2.1 COMSOL Multiphysics Yazılım Paketi ve 2D Eksensel Simetrik Akustik Modülü**

COMSOL Multiphysics, Sonlu Elemanlar Yöntemine (FEM) dayalı bir çoklu fizik benzetim ortamıdır. Bu ortam, bir, iki ve üç boyutlu ayrıca bir ve iki boyutlu eksensel simetrik geometrilerde zamana ve frekansa bağlı analizleri yapabilirken özfrekans analizlerini de yapabilen etkileşimli çoklu fizik problemlerini modelleme yeteneğine sahiptir.

COMSOL Multiphysics, mühendislik ve bilim dünyasında bir simülasyon aracı olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yazılım, gerçek dünyadaki olayları matematiksel modellerle ifade ederek bu modeller üzerinde deneyler yapılmasına olanak tanır. Böylece pahalı ve zaman alıcı fiziksel deneylere gerek kalmadan farklı senaryoları test edebilir ve ürün veya süreçleri optimize edilebilir.

Hava-katı ara yüzeyleri gibi akustik empedansları büyük ölçüde farklı olan ortamlarda akustik dalga yayılımını incelemek için; dalganın tüm ortamda boyuna dalga (sadece yoğunluk dalgalanmaları içeren) olarak ilerlediği varsayımı sıklıkla kullanılır. Bu varsayım, katı ortamların akustik dalga için sadece saçıcı olarak modellenmesine olanak tanır. Hatta hava-katı sınırlarının mükemmel yansıtıcı olduğu kabul edilerek katı bölgeler hesaplamalardan çıkarılabilir ve sadece bir sınır koşuluna dönüştürülebilir.

COMSOL Multiphysics akustik modülü, bu tür problemler için sinüzoidal basınç alanını Denklem 2.1 ile ifade eder:

$$p(\mathbf{r}, t) = p(\mathbf{r})e^{i\omega t} \quad (2.1)$$

Burada,  $p(\mathbf{r})$  konuma bağlı basınç genliği,  $\omega$  açısal frekans ve  $t$  zamandır. Bu basınç alanı, Denklem 2.2 ile verilen doğrusal dalga denkleminin sayısal çözümü ile hesaplanır:

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{\rho_0} \nabla p(\mathbf{r}) \right) + \frac{\omega^2 p(\mathbf{r})}{\rho_0 c_0^2} = 0 \quad (2.2)$$

Burada,  $\rho_0$  ortamın yoğunluğu,  $c_0$  ses hızı ve  $\nabla$  Laplace operatörüdür. Bu denklem, ortamın akustik özellikleri ve sınır koşulları dikkate alınarak sayısal olarak çözülür ve hesaplama alanındaki her noktada basınç değeri belirlenir.

Hesaplama maliyetinin düşürülmesi için üç boyutlu geometrilerin eksensel simetrik olarak iki boyutta hesaplanması mümkündür. Eğer geometri bir eksen etrafında dönme simetrisine sahipse simetri eksenini hesaplamalarda sınır koşulu olarak kullanılıp hesaplama alanı iki boyuta indirgenebilir. Bu durumda sinüzoidal basınç alanı silindirik koordinatlarda,

$$p(\mathbf{r}, \phi, z) = p(\mathbf{r}, z)e^{-im\phi} \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $r$  radyal koordinatı,  $z$  eksensel koordinatı,  $\phi$  ise eksensel simetri etrafında dönüş açısını temsil eden azimut koordinatıdır. Böylece azmutal bağımlılık faz farkı terimine dönüştürülmüş olur. Burada  $m$  azmutal dalga sayısıdır. Azmutal koordinatın periyodik olarak değişmesi  $m$ 'in bir tam sayı olmasını gerektirir. İlk azmutal modda  $m=0$  dır ve denklem 2.3'teki ekponansiyel ifadenin yok olmasını sağlar.

Bu basınç tanımı doğrultusunda denklem 1.19 şu forma dönüşür.

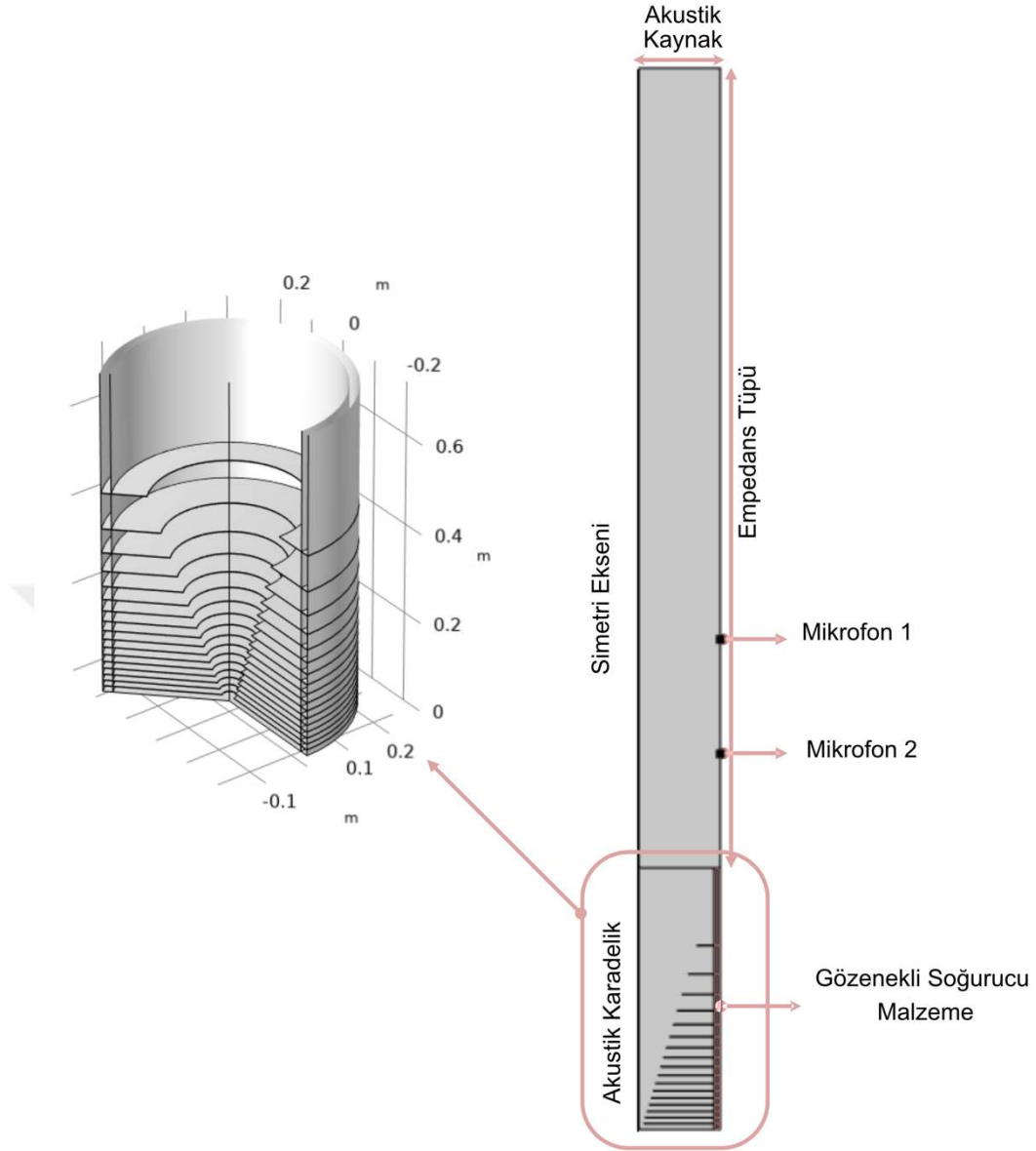
$$\frac{\partial}{\partial r} \left[ -\frac{r}{\rho_0} \left( \frac{\partial p}{\partial r} \right) \right] + r \frac{\partial}{\partial z} \left[ -\frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) \right] - \frac{\omega^2 p}{\rho_0 c_0^2} = 0 \quad (2.4)$$

COMSOL, poroakustik problemleri çözmek için de güçlü bir araçtır. Johnson-Champoux-Allard (JCA) modeli ve Sonlu Elemanlar Metodu'nu birleştirerek karmaşık

geometrilere sahip gözenekli ortamlardaki ses yayılımını detaylı bir şekilde simüle edebilmektedir. Gözenekli olarak tanımlanan bölgedeki ses yayılımının hesaplanabilmesi için Denklem 2.4'te kullanılan ortam parametreleri olan yoğunluk ve ses hızı değerleri, JCA modeli [65] kullanılarak gözeneklilik, viskoz akış direnci, termal akış direnci, viskoz karakteristik uzunluk, termal karakteristik uzunluk ve kıvrımlılık gibi parametreler cinsinden belirlenerek bu bölgedeki ses soğurumu hesaplanabilmektedir.

## 2.2 COMSOL Modelleri Tasarımı

Tasarlanan Akustik kara deliğin soğurum katsayısı hesabında kullanılan eksensel simetrik geometri Şekil 2.1'de verilmiştir. İki mikrofona Empedans Tüp Metodu [66, 67] ile soğurum katsayısının hesaplanabilmesi için akustik kara delik üzerine aynı yarıçaplı bir tüp geometrisi yerleştirilmiştir. Bu yöntemin gerekli kıldığı koşullardan biri  $f_{mak}$  kullanılacak en yüksek frekans değeri olmak üzere  $f_{mak}r \leq 0.58c_0$  eşitsizliğinin sağlanmasıdır [67]. Bu yüzden tüp yarıçapı dolayısıyla karadelik yarıçapı bu koşulu sağlayacak şekilde seçilmiştir. Ayrıca tüpün uzunluğu ise kullanılacak en uzun dalga boyundan daha kısa olmayacak şekilde belirlenmiştir.



**Şekil 2.1:** Akustik kara delik ve empedans tüpü geometrisi.

Şekil 2.1’de empedans tüpünün en üst kısmı iki boyutlu eksensel simetrik geometride basınç koşulu olarak tanımlanmıştır. Bu sayede üç boyutlu yapıda disk şeklinde bir akustik kaynak gibi davranması sağlanmıştır. Simetri eksenini ve akustik kaynak haricindeki tüm sınırlar ise tam yansıtıcı sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Kara delik silindiri içinde yer alan ortası boş diskler yine benzer sınır koşulları ile tanımlanarak tam yansıtıcı yüzeyler olarak belirlenmişlerdir.

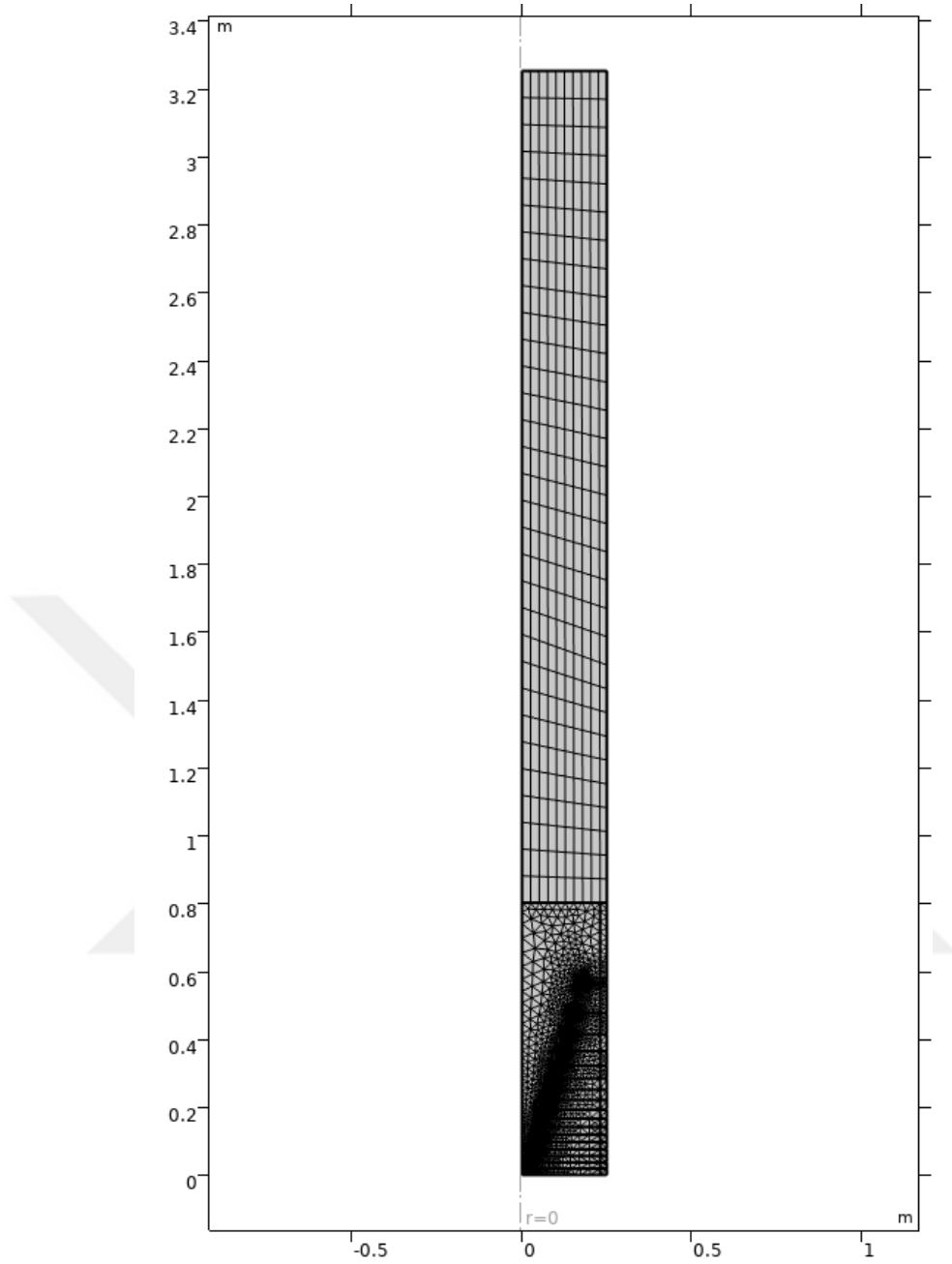
Yine, şekilde mikrofona belirtilen noktalarda ise hesaplama sonuçlarında elde edilen basınç değerleri okunmuştur. Empedans tüpü yöntemiyle soğurum katsayısı ( $\alpha = 1 - |r|^2$ ) hesabı için denklem 2.5’ de verilen ifade kullanılmıştır [68].

$$r = -e^{i2kx_1} \frac{1 - \frac{p_1}{p_2} e^{-ik\Delta x_{12}}}{1 - \frac{p_1}{p_2} e^{ik\Delta x_{12}}} \quad (2.5)$$

Burada  $p_1$  ve  $p_2$  Mikrofon 1 ve Mikrofon 2 noktalarından okunan basınç değerlerini,  $\Delta x_{12}$  mikrofonlar arası uzaklığı ve  $k$  ise dalga sayısını temsil etmektedir.  $2\pi f = kc_0$  eşitliği ile frekansa bağlı olarak hesaplanabilmektedir.

Yapılan hesaplamalarda akustik kara delik ve empedans tüpünün içi hava, şekil 2.1’de belirtilen gözenekli malzeme bölgesi ise soğurucu köpük olarak tanımlanmıştır. Havanın yoğunluk ve ses hızı değerleri sırasıyla  $\rho_0 = 1,22 \text{ kg/m}^3$  ve  $c_0 = 343 \text{ m/s}$  olarak alınmıştır. Gözenekli soğurucu bölgenin materyal parametreleri ise gözeneklilik, viskoz akış direnci, termal karakteristik uzunluk, viskoz karakteristik uzunluk ve kıvrımlılık ise sırasıyla  $\varepsilon = 0.75$ ,  $R_f = 110 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^4}$ ,  $L_{th} = 607 \mu\text{m}$ ,  $L_v = 33 \mu\text{m}$ ,  $\tau = 1.045$  olarak alınmıştır.

Hesaplamalarda kullanılan ızgaralamaya bir örnek şekil 2.2’de verilmiştir. Saçılmanın yoğun olarak meydana geldiği kara delik bölgesinde üçgen ve uyarlanabilir ızgara kullanılmıştır. Maksimum ızgara büyüklüğü kullanılan dalga boyunun onda birine eşitlenmiş en küçük ızgara boyutu ise geometriyi hassas bir şekilde temsil edebilmesi için 1 mm olarak seçilmiştir. Bu aynı zamanda kaburga kalınlıklarına eşittir. Empedans tüpü bölgesinde ise saçılma etkilerinin çok az olması nedeniyle maksimum ızgara büyüklüğünde kare ızgaralama kullanılmıştır. Böylece bu bölgedeki hesaplama yükünün azaltılması sağlanmıştır.



**Şekil 2.2:** Modellerde kullanılan örnek ızgaralama

### **2.3 REW (Room EQ Wizard Room Acoustics Software) (ODA AKUSTİĞİ YAZILIMI)**

REW (Room EQ Wizard), akustik ölçüm ve analiz alanında kapsamlı bir araçtır. Ses basıncı seviyesi (SPL), empedans, frekans tepkisi gibi parametreleri ölçerek, bir ortamın akustik özelliklerini detaylı bir şekilde analiz eder [69,70]. Yankılanma süresi, modalrezonanslar ve frekans bozulmaları gibi akustik problemleri tespit ederek bu

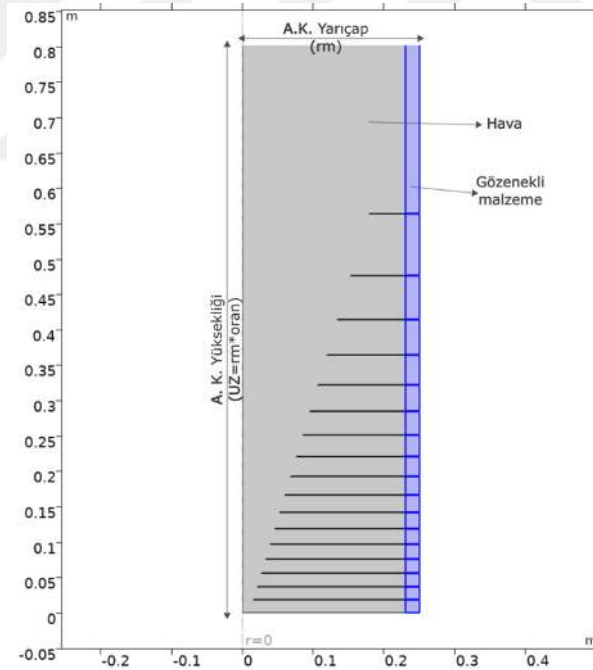
problemlere yönelik çözümler sunar. Ayrıca, parametrik equalizer ayarları ile istenen ses kalitesine ulaşmak için otomatik ayarlama yapabilme özelliği de bulunmaktadır.

Bir sesin bir ortamda veya bir cihazda nasıl yayıldığını ve değiştiğini anlamak için “impuls yanıtı” adı verilen bir ölçüm yapılır. İmpuls yanıtı, bir sisteme kısa ve güçlü bir sinyal verildiğinde sistemin verdiği tepkidir. Bu sistemin karakteristiklerini anlamak için bir ölçüdür. Oda akustiği ölçümlerinde ve hoparlör tepki analizlerinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri sinüs taraması (sinesweep) tekniğidir. Bu yöntem belirli bir frekans aralığında sürekli değişen bir sinüs dalgası sinyali gönderme işlemidir. Bu sinyal genellikle logaritmik olarak artan bir frekansla tarama yapar, yani düşük frekanslardan yüksek frekanslara doğru sürekli bir geçiş sağlar. REW’de sinesweep’in çalışması ise belirlenen bir frekans aralığında(örneğin, 20Hz-20kHz) sinyal üretilir ve bu sinyal hoparlör aracılığıyla odaya gönderilir. Ölçüm ise bir mikrofon aracılığı ile gerçekleştirilir.

### 3. TASARIM ÇALIŞMALARI VE BULGULAR

#### 3.1 Benzetim Çalışmaları ve Bulguları

Tez kapsamında tasarım amaçlı gerçekleştirilen benzetim hesaplamalarında kullanılan geometri ve ilgili parametreler şekil 3.1’de verilmektedir. Akustik kara deliğin hem üretilebilir olması hem de düşük frekans bölgesinde etkili olması için yarıçap uzunluğu  $r_m=0.25$  m olarak seçilmiş ve bu parametre tüm hesaplamalarda sabit olarak alınmıştır. Bu sabit değerin belirlenmesi tez öncesinde yapılan çalışmaların sonuçlarına dayanmaktadır. Akustik kara delik uzunluğu ise yarıçap değerine  $U_z=\text{oran} \times r_m$  şeklinde bir orantı katsayısı ile bağlanmıştır. Böylece bu parametre tasarım hesapları için bir değişken olarak alınmıştır. Kaburga et kalınlıkları ise 2 mm ‘dir.



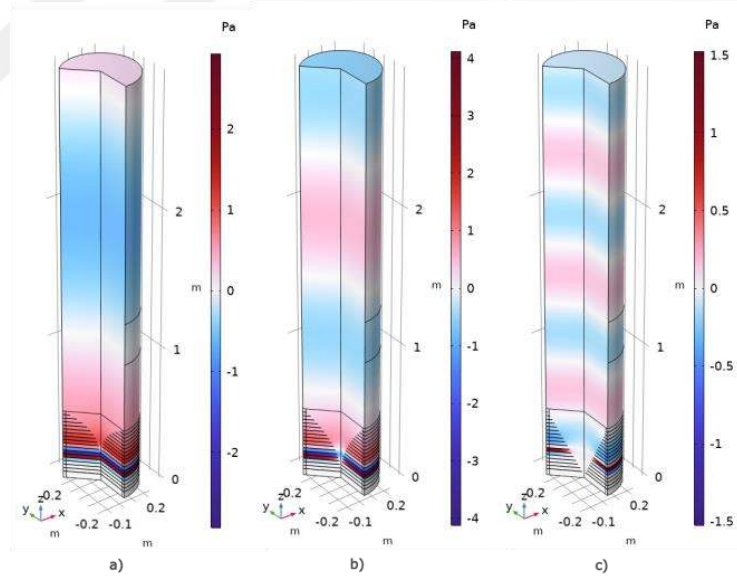
**Şekil 3.1:** Akustik kara delik geometrisi ve ilgili parametreler.

Tasarım aşamasında kullanılan diğer parametreler ise kaburgalar arası uzaklığın ve kaburga yüksekliklerinin hangi fonksiyona göre nasıl değişeceği.

Öncelikle hem kaburga arası mesafelerin hem de kaburga yüksekliklerinin her ikisinin birden üstel olarak değiştiği hesaplamalar yapılmıştır. Kaburgalar arası mesafe  $y =$

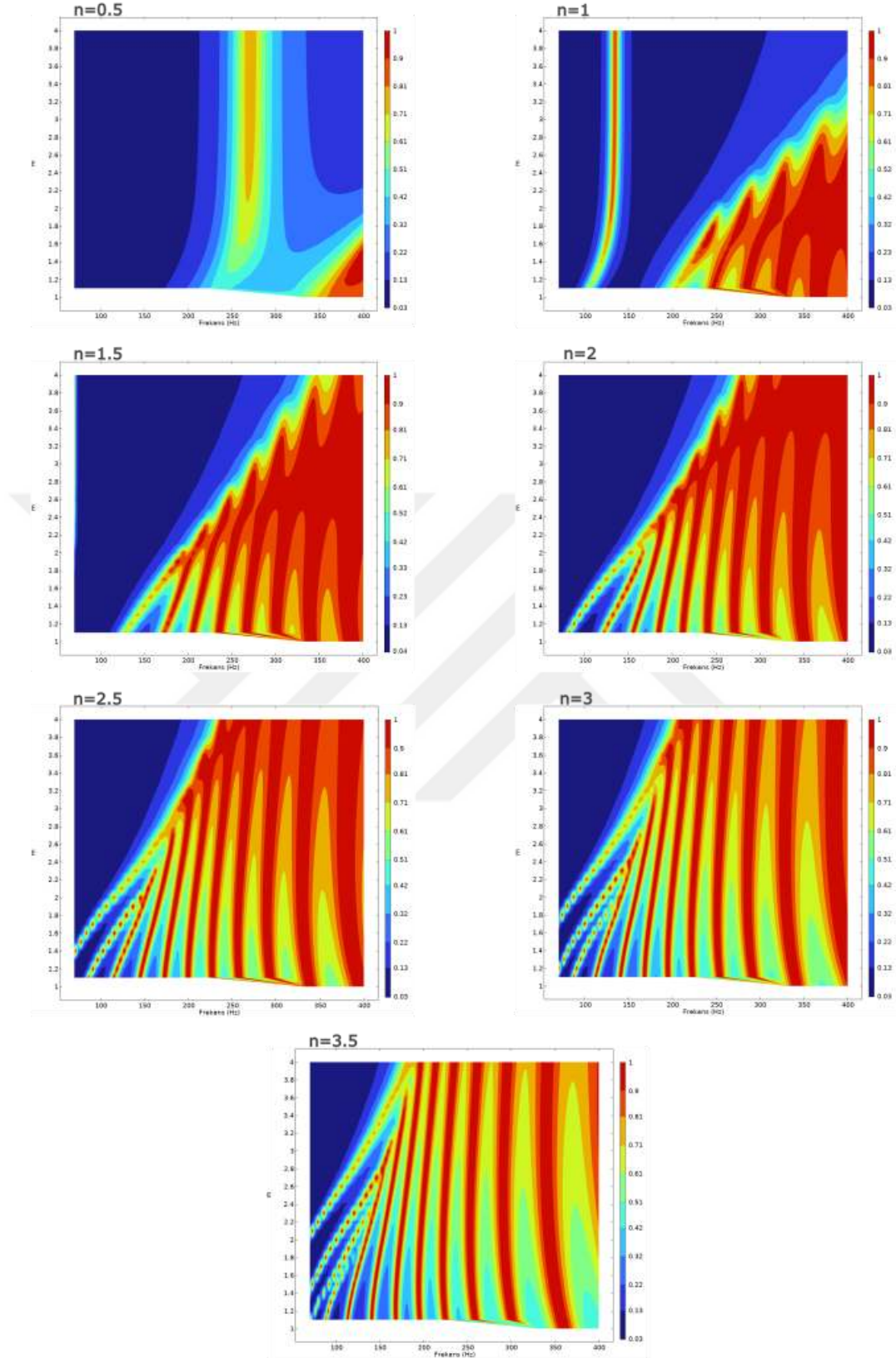
$x^n$  , kaburga yükseklikleri ise  $y = x^m$  şeklinde değişen ve sırasıyla akustik kara delik yüksekliğine ve yarı çapına göre normalize edilen fonksiyonlar kullanılmıştır. Burada n ve m gerçekte sayılardır. Ayrıca yarıçapı uzunluğa bağlayan orantı katsayısının farklı değerleri içinde hesaplamalar yapılmıştır. Orantı katsayısı 1 ile 3,5 arasında 0,5 adımla, n değeri 0,5 ile 3,5 arasında 0,5 adımla ve m değeri ise 0,5 ile 4 arasında 0,1 adımla değiştirilmiştir. Burada orantı katsayısı ve n değeri manuel olarak m ve frekans değeri ise program içinde parametrik süpürme (parametric sweep) şeklinde taranmıştır. Taramada kullanılan frekans değerleri ise 70 Hz ile 400 Hz aralığında 1 Hz adımla alınmıştır.

Şekil 3.2’de yapılan hesaplamalara örnek olması açısından üç farklı basınç alanı grafiği verilmiştir. Şekilde oran=2 ve n=1 sabit değerleri için farklı frekans ve m değerlerinde yapılan hesaplamalardan örnek basınç alanları çıktıları verilmiştir. Bu grafikler parametrelere bağlı olarak akustik kara delik geometrisindeki değişikliğin nasıl olduğuna örnek olması açısından eklenmiştir. Ayrıca frekans değişimine bağlı olarak hem gelen dalganın dalga boyundaki değişim hem de akustik kara delik içinde farklı kaburga boşluklarında oluşan rezonans mod yapılarının nasıl farklılaştığı da açıkça görülmektedir.

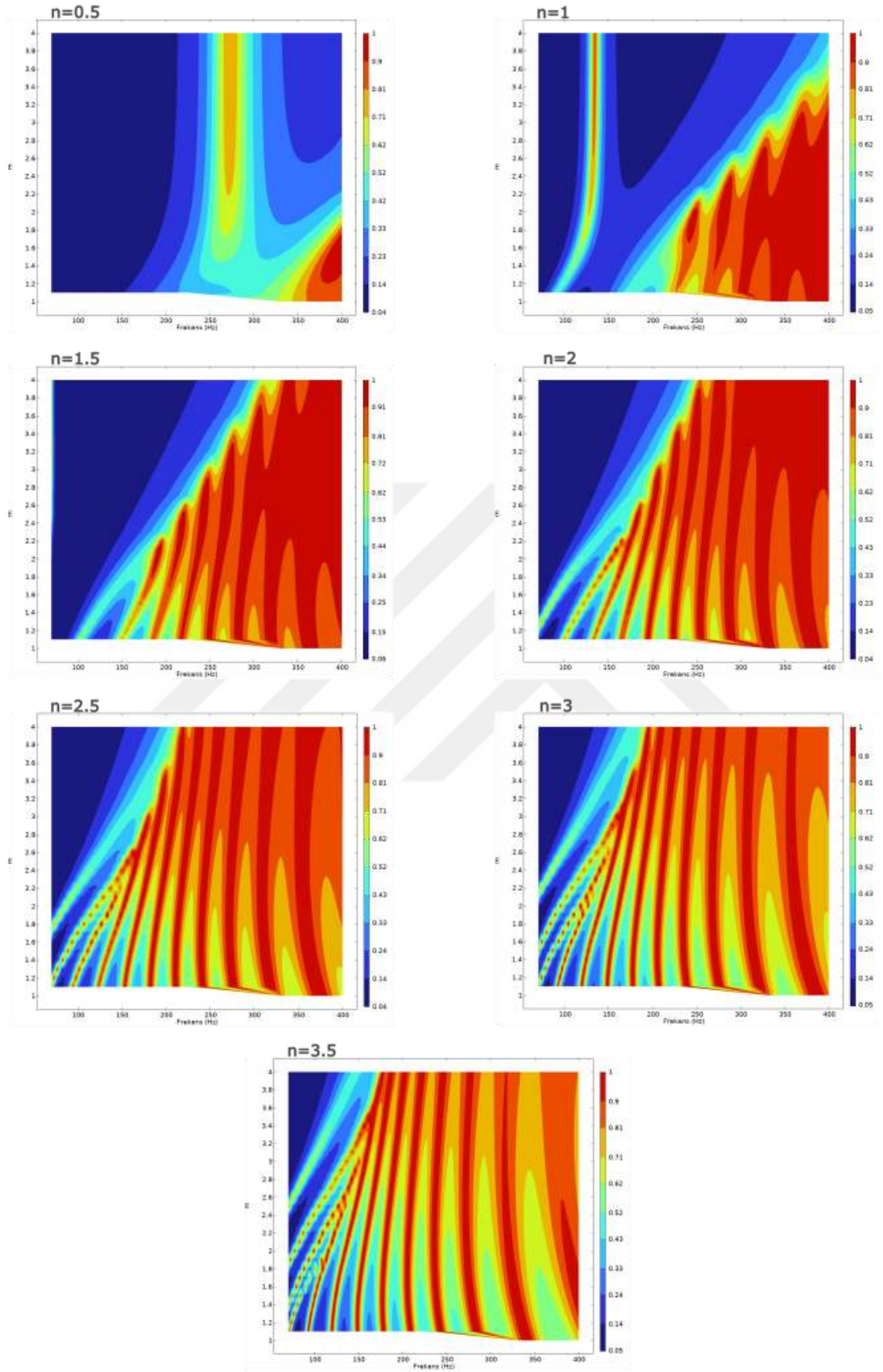


**Şekil 3.2:** Oran 2, n =1 için a) m=4, f=100 Hz, b) m=2, f=200 Hz ve c) m=1, f=400 Hz değerlerinde hesaplanan akustik basınç alanları grafikleri.

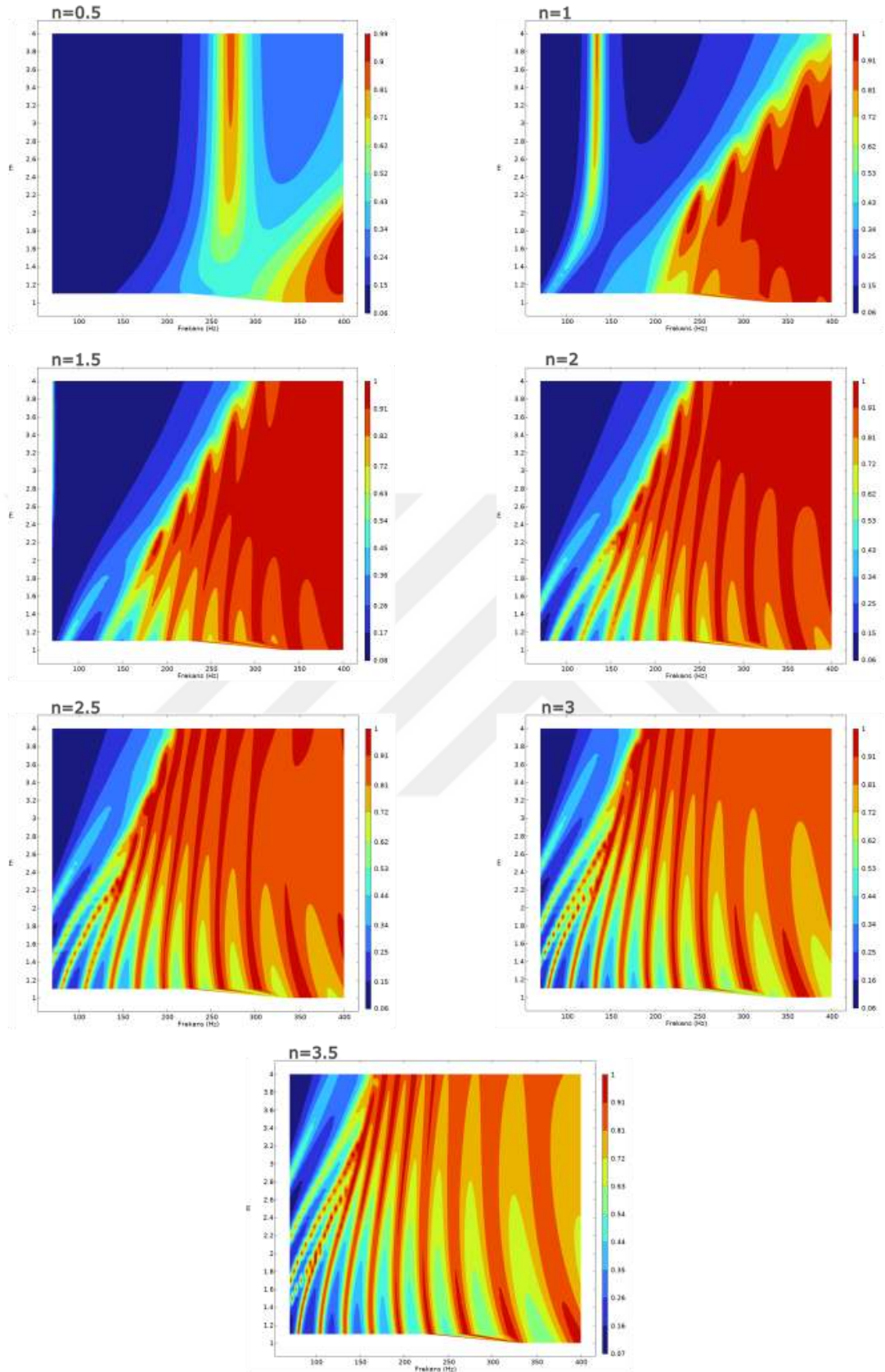
Yukarıda bahsedilen tüm parametre değişimlerine bağlı olarak hesaplanan soğurma katsayısı grafikleri ise farklı oran değerleri için Şekil 3.3 – 3.8’ de verilmiştir. Renk skalaları soğurma katsayısı (0 – 1 arasında) değerlerini temsil etmek üzere yatay eksen frekansı, dikey eksen ise m (1- 4 arasında) değerinin değişimini göstermektedir.



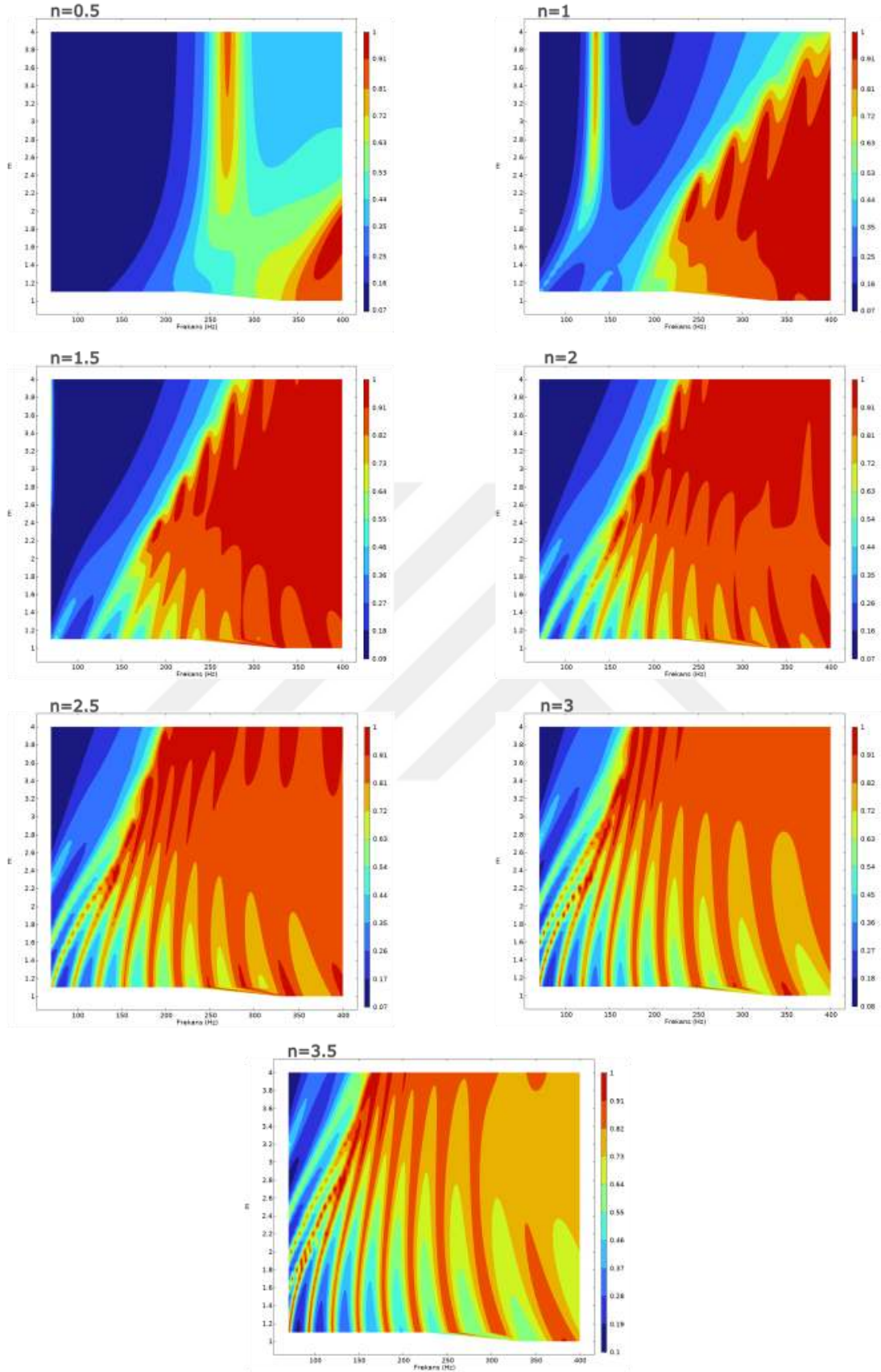
Şekil 3.3: Oran=1 için n, m ve frekansa bağlı soğurma katsayısı grafikleri.



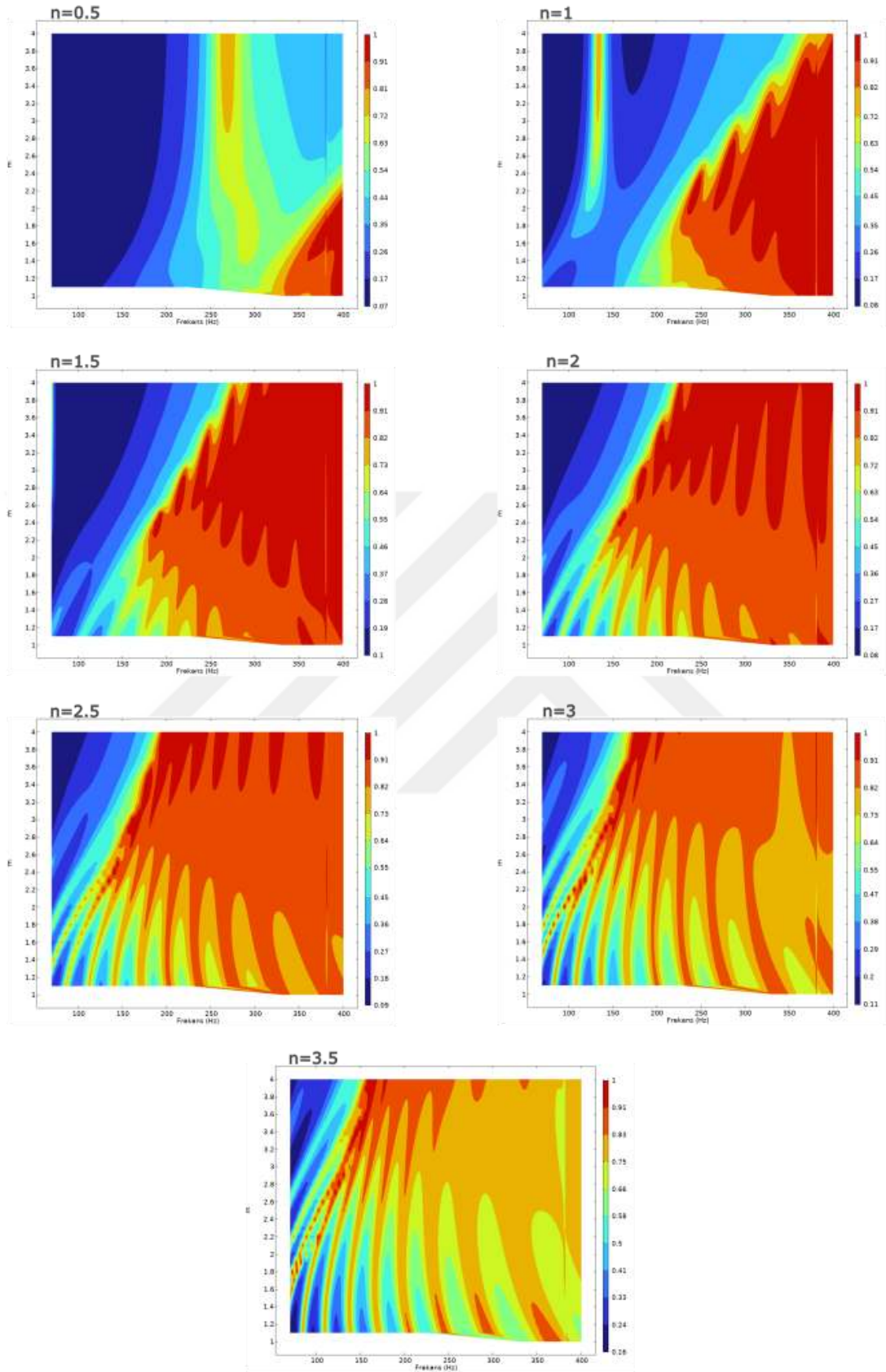
Şekil 3.4: Oran=1,5 için n, m ve frekansa bağlı soğurma katsayısı grafikleri.



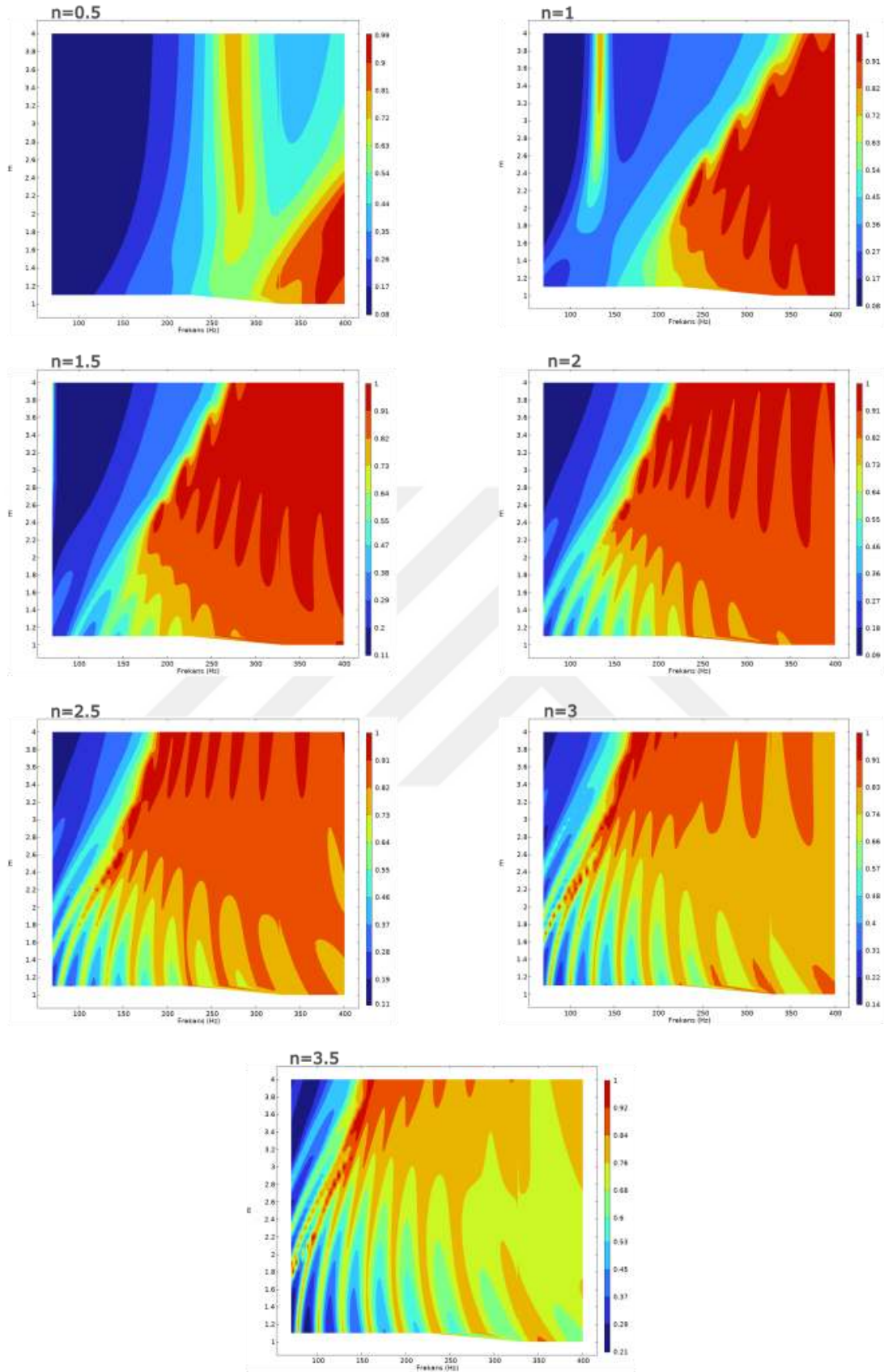
Şekil 3.5: Oran=2 için n, m ve frekansa bağlı soğurma katsayısı grafikleri.



Şekil 3.6: Oran=2,5 için n, m ve frekansa bağlı soğurma katsayısı grafikleri.



Şekil 3.7: Oran=3 için  $n$ ,  $m$  ve frekansa bağlı soğurma katsayısı grafikleri.

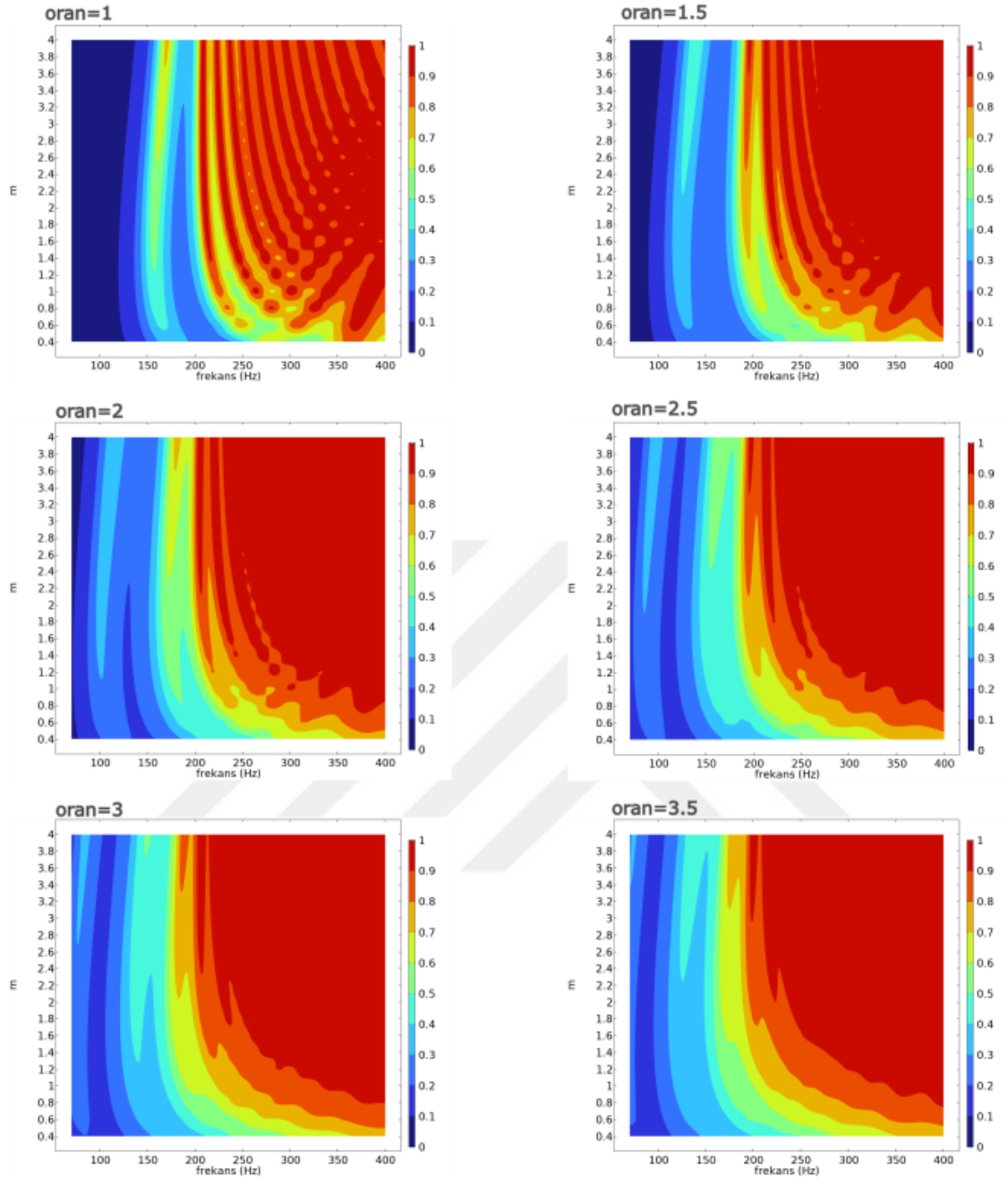


Şekil 3.8: Oran=3,5 için n, m ve frekansa bağlı soğurma katsayısı grafikleri.

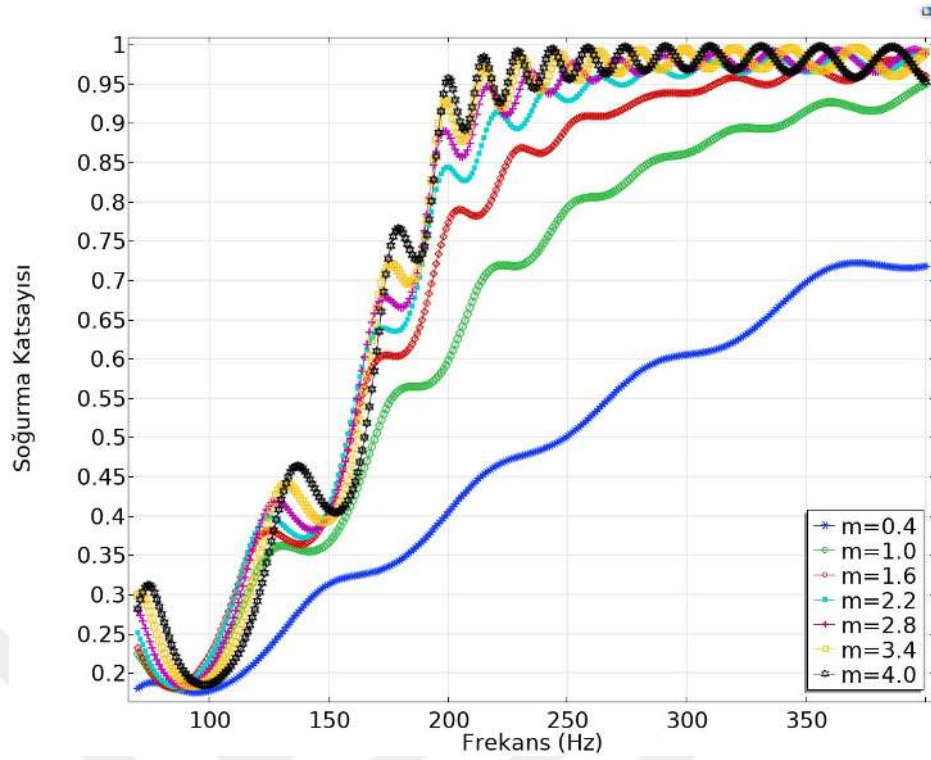
Şekiller incelendiğinde oran değerindeki artışın soğurma katsayısı üzerinde pozitif katkısı olduğu açıkça görülmektedir. Kaburga yüksekliklerinin nasıl değişeceğini belirleyen  $n$  değerleri için ise 1 ve 1,5 değerlerinde soğurma katsayısındaki yükseklik dikkat çekmektedir.  $n=0,5$  değeri kareköklü bir fonksiyona karşılık gelmektedir, soğurum oldukça kötüdür. Sadece  $m$ 'nin düşük değerlerinde ve 400 Hz'e yakın bölgelerde küçük bir alanda bir plato oluşumu söz konusudur. Soğurma katsayısının 1 olduğu sürekli platolar ise özellikle  $n=1$  ve 1,5 değerlerinde 200 Hz ve üzeri frekanslarda ve  $m$ 'nin 2 ile 3 değerleri civarında olduğu görülmektedir. 2 ve üzeri  $n$  değerlerinde ise soğurma katsayısının 1 olduğu platolar küçülmüş ve süreksizlik göstermeye başlamıştır.

Burada  $n$  değerlerine bağlı bu değişim bize kaburga yüksekliklerinin doğrusal bir fonksiyon şeklinde değişiminin akustik kara delik performansı için daha uygun olduğu sonucuna götürmektedir. Bu yüzden ikinci aşama hesaplamalarında kaburga yükseklikleri akustik kara delik ucundan dip ortasına inen köşegen boyunca değişecek şekilde sabitlenmıştır. Dolayısıyla köşegenin eğimi direkt olarak oran değişimine bağlı olacaktır. Bu sabitleme sonucunda yine oran ve  $m$  katsayıları 0,5 ile 3,5 arasında 0,5 adımla değiştirilerek frekansa bağlı soğurum hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalar da frekans değerleri yine 70 Hz ile 400 Hz aralığında 1Hz adımla alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.9' da verilmektedir.

Şekil 3.9 incelendiğinde oran değerindeki artışa paralel olarak soğurma katsayısının 1 olduğu bölgeler sürekli hâle gelerek düşük frekans değerine doğru kaydığı gözlenmektedir. Ayrıca  $m$  değeri arttıkça da soğurma katsayısının 1 olduğu frekans bandı daha düşük değerlere doğru kaymaktadır. Bunun daha anlaşılabilir olması açısından oran =3,5 ve  $m$  değerinin 0,4 ile 4 arasında 0,6 adımla değiştirilerek çizdirilen frekansa bağlı soğurma katsayısı grafiği Şekil 3.10'da verilmiştir. Burada  $m$  değerine bağlı olarak soğurum katsayısının 9,5 'ten büyük olduğu değerler düşük frekanslara doğru kaymış ve 9,5 ile 1 arasında dalgalanma yapacak şekilde devam etmişlerdir. Literatürle uyumlu olarak 2' nin üzerindeki değerlerde istenilen soğurum performansına yaklaşıldığını söylemek mümkündür. En iyi soğurum  $m=4$  için gerçekleşmesine karşın kaburgalar arası mesafe 4. dereceden bir polinoma bağlı bir şekilde değiştiği için bu mesafenin akustik kara deliğin dibine doğru yaklaşıldıkça kaburgaların birbirlerine aşırı şekilde yaklaşması durumu ortaya çıkmıştır. Bu mesafe darlığının üretim aşamasında çıkarabileceği zorluklardan dolayı bir sonraki kısımda anlatılacak olan deneysel çalışmalar, daha üretilebilir olan  $m=2,8$  değeri için yapılmıştır;  $m=2,8$  değeri 200 Hz ve sonrası frekanslar için kabul edilebilir bir soğurum değerine sahiptir.



**Şekil 3.9:** Tüm oran değerlerinde m ve frekansa soğurma katsayısı grafikleri.

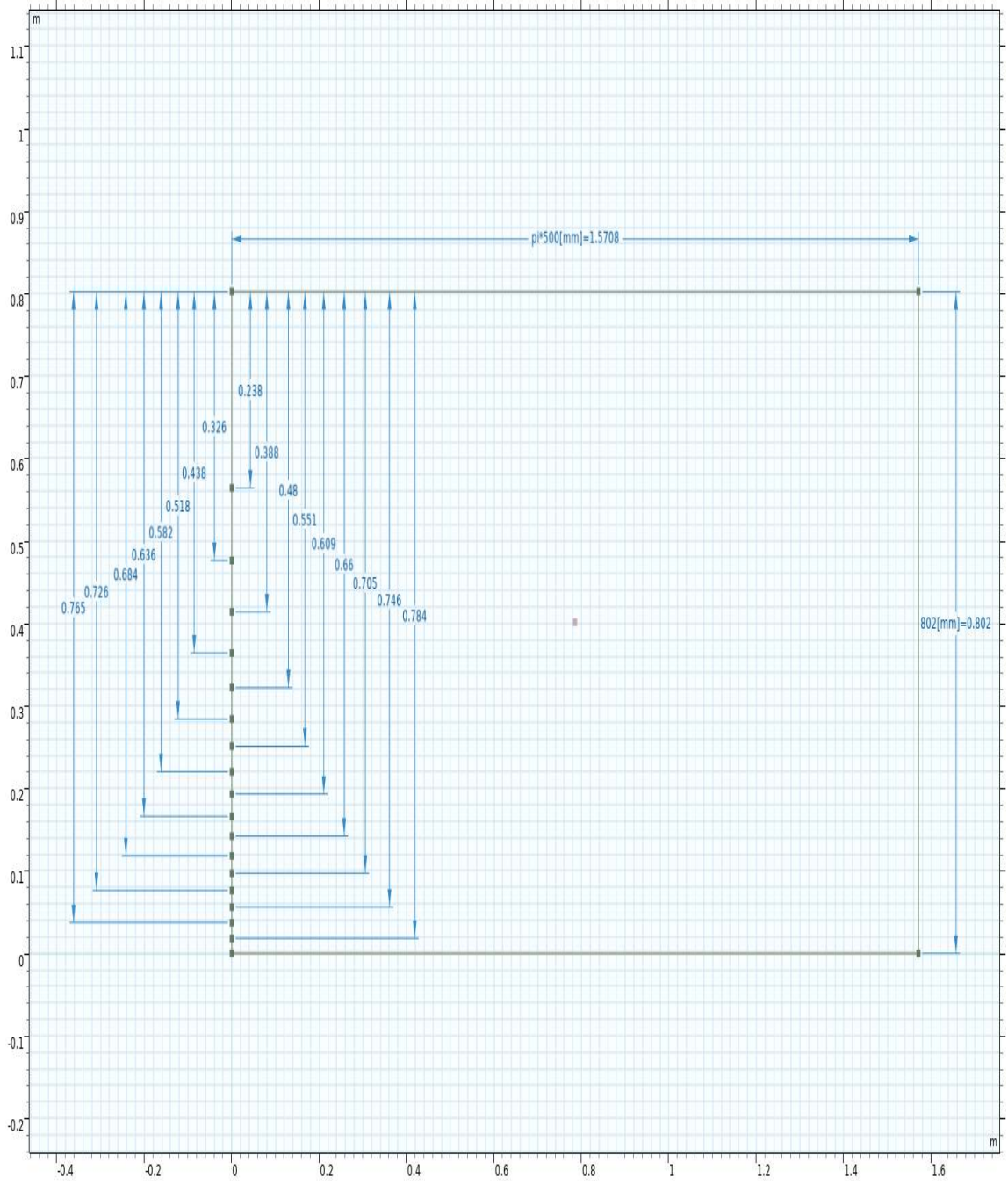


**Şekil 3.10:** Oran=3,5 ve  $m=0,4$  ile  $m= 4$  arasında 0,6 adımla değiştirilerek çizdirilen frekansa bağlı soğurma katsayısı grafiği.

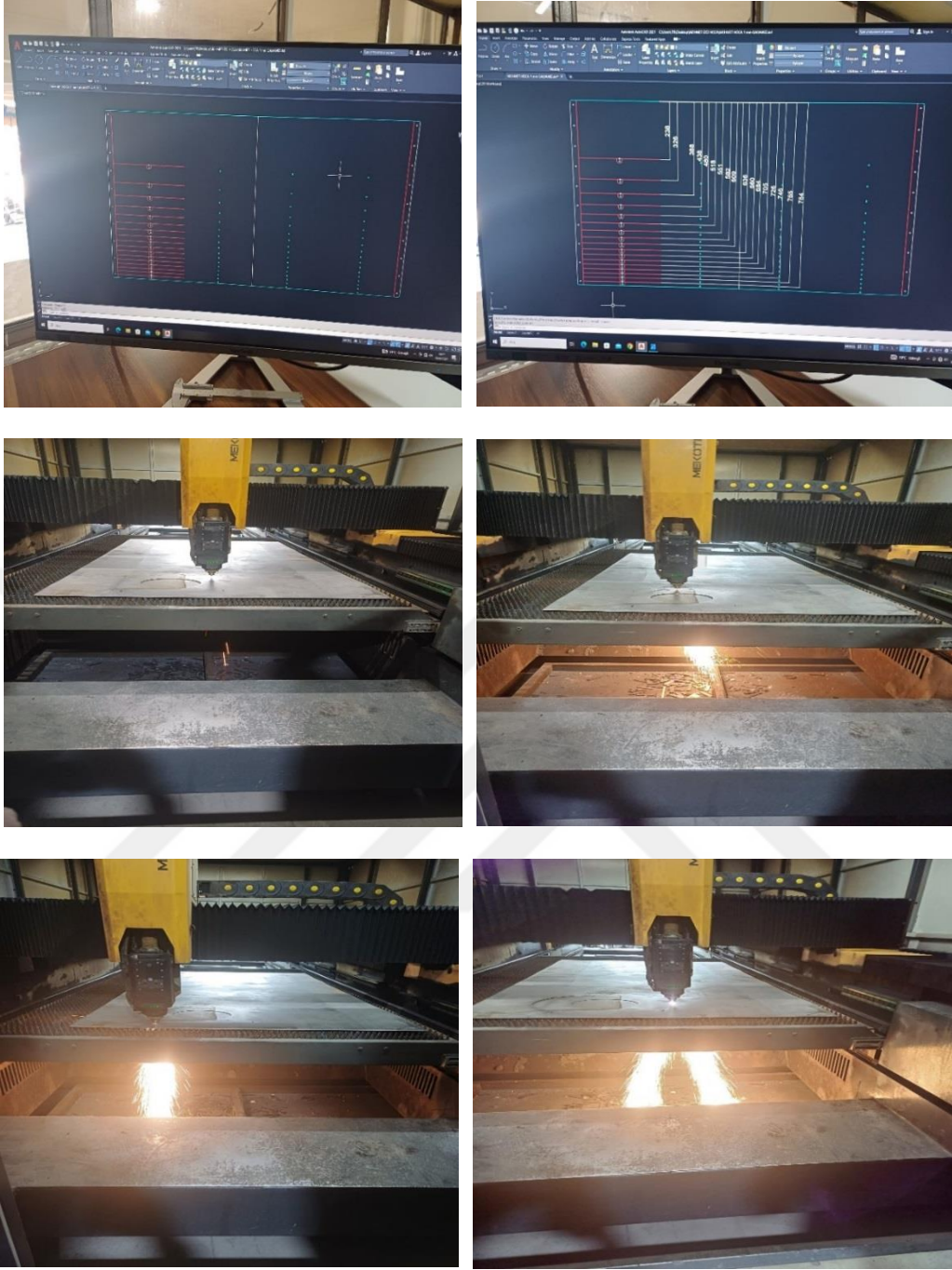
### 3.2 Deneysel Çalışmalar ve Bulgular

Akustik kara deliğin üretimi kapsamında, öncelikle Şekil 3.11'de belirtilen geometrik parametrelere dayanarak tasarım çizimleri oluşturulmuştur. Bu kapsamda, toplamda 17 adet kaburga ve 1 adet dış silindir olmak üzere parçalar modellenmiştir. Üretim aşamasında tasarlanan parçaların her biri 2 mm kalınlığında sac malzeme kullanılarak lazer kesim yöntemiyle hazırlanmıştır. Kesim işlemi Şekil 3.12'de gösterilmektedir.

Kesilen elemanlar, belirlenen teknik ölçülere ve montaj parametrelerine uygun olarak birleştirilmiş ve Şekil 3.13'te gösterilen nihai yapı elde edilmiştir. Montaj işlemi sırasında parçaların doğru konumlandırılması ve sabitlenmesi titizlikle sağlanmıştır.



**Şekil 3.11:** Akustik kara delik parametreleri

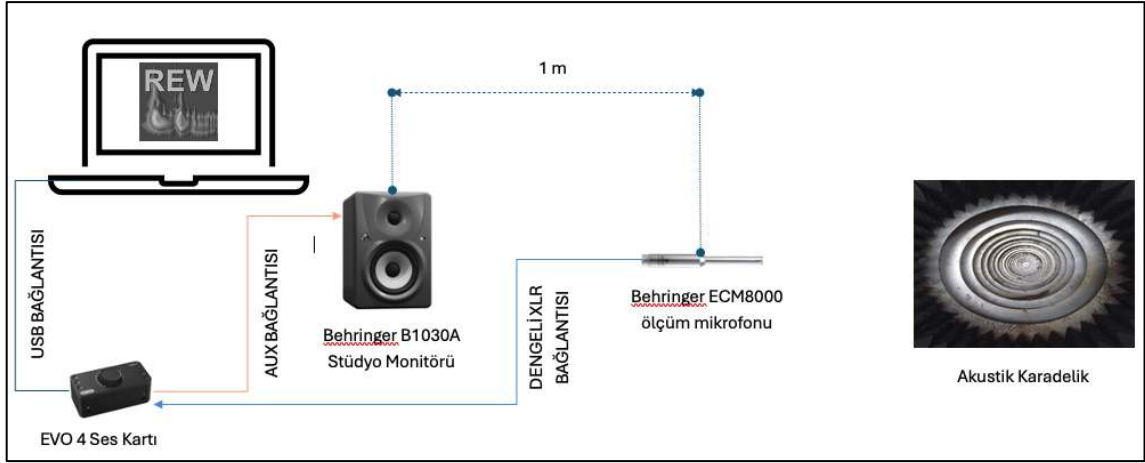


**Şekil 3.12:** Akustik kara delik üretim aşamaları.



**Şekil 3.13:** Akustik kara delik

Yapılan deneysel çalışmalarda yöntem kısmında daha detaylıca açıklanan sinüs taraması (sinesweep) metodu kullanılmıştır. Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi bünyesinde bulunan 109 nolu sınıfın frekans tepkisi öncelikle sınıfın içinde akustik kara delik yok iken ve akustik kara delik yerleştirildikten sonra ölçülmüştür. Ölçümde yine yöntem kısmında detayları verilen REW programı kullanılmıştır. Şekil 3.14’teki gibi akustik kara delik sınıfın ortasına hoparlöre (Behringer B1030A stüdyo monitörü) dönük olarak yerleştirilmiştir. Hoparlör sınıfın giriş kısmında ortaya yerleştirilmiş, Behringer ECM8000 ölçüm mikrofonu ise hoparlörden 1 metre uzakta ve hoparlöre dönüktür. Hoparlör mikrofona ve akustik kara delik yerden eşit yaklaşık bir metre yukarıda konumlandırılmıştır.



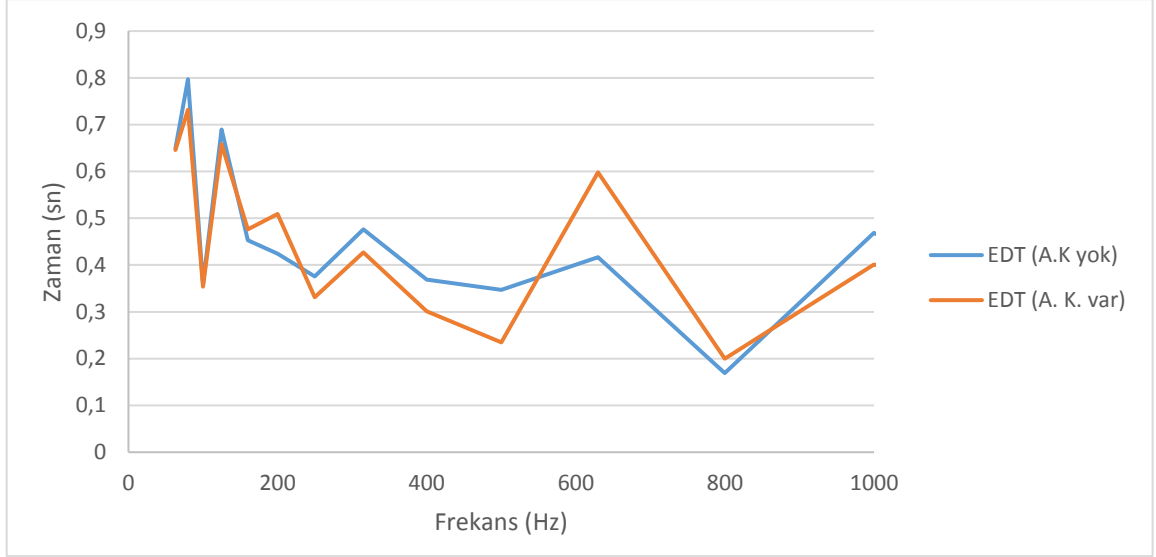
**Şekil 3.14:** Deney düzeneği.

Alınan ölçümler yine REW programı yardımıyla analiz edilerek akustik kara deliğin yerleştirilmesinin akustik parametreler üzerindeki etkisi incelenmiştir.

### 3.2.1 EDT bulguları

Erken Sönümleme Süresi (EDT), akustik bir parametre olarak bir mekândaki ses enerjisinin ilk bozunma sürecini ifade eder. Özellikle mimari akustik ve oda akustiği çalışmalarında önemli bir rol oynar. EDT, bir odanın veya mekânın akustik karakterini anlamak ve değerlendirmek için kullanılan temel ölçümlerden biridir. EDT, ses enerjisinin başlangıç seviyesinden (genellikle 0 dB) -10 dB'e düşmesi için geçen süreyi ifade eder. Bu süre, odanın akustik davranışının ilk aşamasını yansıtır ve dinleyicinin sesin netliği ve canlılığı üzerindeki algısını etkiler. Özellikle konuşma netliği ve müzik performanslarının anlaşılabilirliği üzerinde etkilidir. Matematiksel olarak EDT, ses enerjisi bozunma eğrisinin ilk kısmının eğiminden türetilir. Bu eğim, logaritmik bir ölçekte -10 dB'e kadar olan süreyi temsil eder. Kısa bir EDT, sesin daha net ve anlaşılır olmasını sağlar.

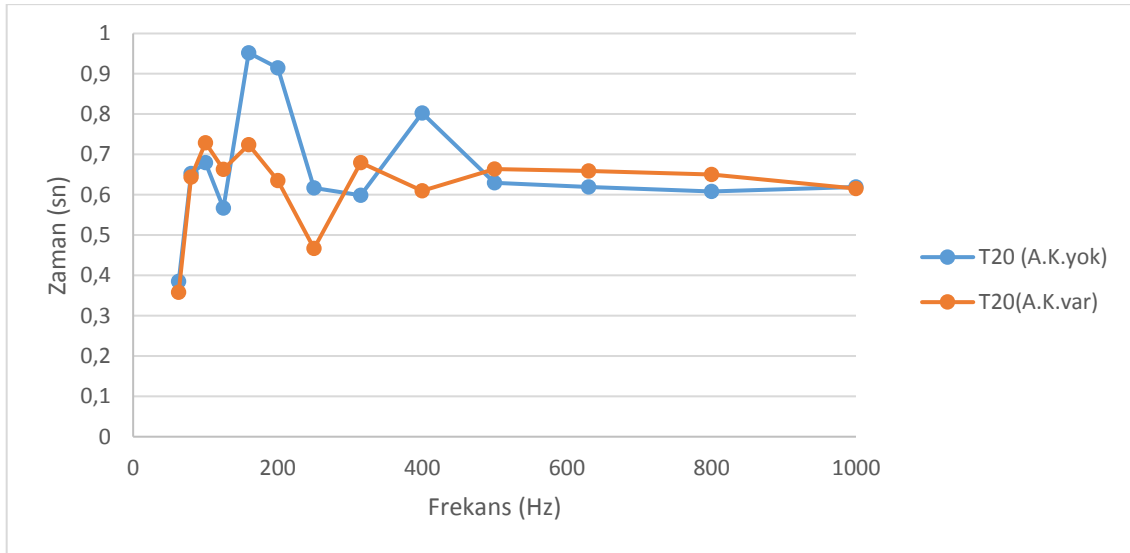
Ölçümlerde elde edilen frekansa bağlı EDT grafikleri Şekil 3.15'de verilmektedir. Akustik kara deliğin varlığı yaklaşık olarak 200 ile 600 Hz aralığındaki EDT değerlerinin düşmesini sağlamıştır. Bu frekansın üzerinde ise negatif bir etki yaptığı söylenebilir. Elde edilen sonuç 200 ile 400 Hz arasındaki yüksek soğurum beklentisi oluşturan benzetim sonuçları ile uyumlu gözükmektedir.



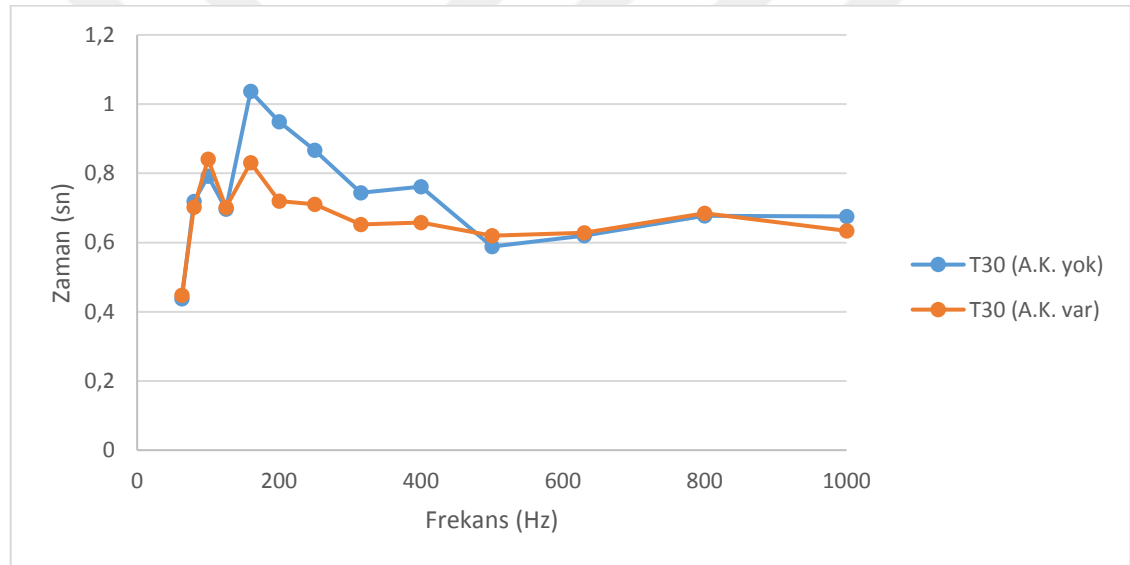
**Şekil 3.15:** Frekansa bağlı EDT grafikleri.

### 3.2.2 T20 ve T30 bulguları

RT60 Yankılanma Süresi (Reverberation Time 60) bir ses kaynağı sustuğunda sesin 60 dB azalması için geçen süredir. Oda akustiğinin en temel parametrelerinden biridir ve özellikle konser salonları, tiyatrolar, sınıflar, ofisler gibi alanlarda büyük önem taşır. Konuşma anlaşılabilirliği açısından bakıldığında RT60 çok yüksekse yankılar artar ve konuşmalar anlaşılmaz hale gelir. RT60 değerinin deneysel olarak ölçülebilmesi için iki süre ölçümü vardır. Bunlardan ilki T20 olarak kısaltılan ve sesin -5 dB'den -25 dB'ye kadar düşmesi için geçen sürenin diğer bir deyişle 20 dB azalması için geçen sürenin ölçülmesidir. Bu sürenin 3 ile çarpılması ile RT60 süresi bulunabilir. İkincisi ise 30 dB azalması için geçen süre ölçümü olan T30'un ölçülüp 2 ile çarpılmasıdır. Her iki ölçümde de bu sürelerin lineer olarak değiştiği farz edilerek ölçüm yapılması bu yöntemlerin dezavantajı olarak görülebilir. Bu yüzden T30 ölçümünün daha güvenilir olduğunu söylemek mümkündür. Yapılan ölçümlerden elde edilen T20 ve T30 grafikleri sırasıyla Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de verilmiştir. Edinilen sonuçlara göre akustik kara delik kullanımının yaklaşık 200 Hz ile 600 Hz bandında T30'da daha belirgin olmak üzere bir düşüş sağladığı görülmektedir.



**Şekil 3.16:** Yapılan ölçümlerden elde edilen T20 grafikleri.

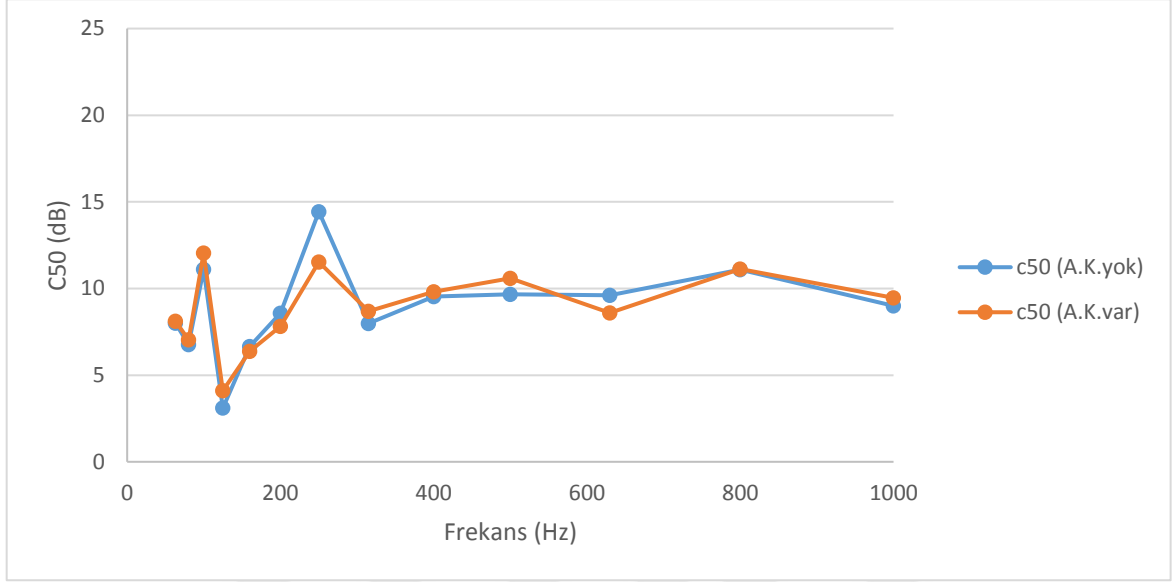


**Şekil 3.17:** Yapılan ölçümlerden elde edilen T30 grafikleri.

### 3.2.3 Anlaşılrlık (Clarity C50, C80) bulguları

Anlaşılrlık (C), bir odanın veya mekânın akustik özelliklerini değerlendirmek için kullanılan bir metriktir. C50 ve C80, ses enerjisinin erken yansımalar ve geç yankılara oranını ölçerek konuşma ve müzik anlaşılrlığını belirler. Konuşma anlaşılrlığını ölçmek için kullanılan C50, 50 ms içinde gelen ses enerjisi ile 50 ms sonra gelen yankı enerjisi arasındaki oranı ölçer. Özellikle sınıflar, konferans salonları vb. mekânlar için önemlidir. 80 ms içerisinde gelen ses enerjisi ile 80 ms sonrası gelen yankı enerjisi arasındaki oranı ölçen C80 ise müzikal netliği değerlendirmek için kullanılır. Konser salonları ve müzik stüdyoları için kritik bir parametredir.

Sınıf içinde yapılan ölçüm sonuçlarından C50 değeri hesaplanmış ve frekansa bağlı olarak Şekil 3.18’de verilmiştir. C50 değerleri yorumlanırken 500 Hz ile 4 kHz bandı dikkate alınır. Çalışma kapsamında odaklanılan frekans bölgesinin dışında olmasına karşın akustik kara deliğin varlığının 300 Hz ile 600 Hz aralığında C50 değerinde az da olsa bir artış sağladığını söylemek mümkündür.



**Şekil 3.18:** Yapılan ölçüm sonuçlarından C50 değeri grafikleri.

#### 4. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapmış olduğumuz akustik kara delik tasarımında düşük frekanslardaki ses emilimi performansı hem Comsol fizik simülasyon programı ile hem de gerçekleştirilen performans ölçümleri ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar daha önce araştırılan literatür çalışmaları ile uyumlu hâldedir. Bu uyum kullanılan yöntemlerin geçerliliğini güçlendirmiştir.

Yapılan bu çalışmada akustik kara deliğin uzunluğu sabit tutularak akustik kara deliğin yarıçapı, kaburga yükseklikleri ve kaburga aralıkları parametrik olarak değiştirilerek soğurum performansı benzetim yöntemleri ile incelenmiştir. Kaburga yüksekliklerinin ve aralıklarının değişimi sırası ile  $y = x^m$  ve  $y = x^n$  şeklindeki fonksiyonlara dayandırılarak  $m$  ve  $n$ 'nin ideal değerleri aranmıştır. Yapılan bu ilk düzey benzetim sonuçlarına göre  $m=2,8$  ve  $n=1$  değerlerinde ideal soğurma elde edilebileceği belirlenmiştir. Bu üst değerleri literatürde Mironov [41] ve Krylov [42] gibi araştırmacıların tasarladıkları geometrik yapıları kara delikler ile uyumludur. Bu çalışmalarda muğlak bir şekilde belirtilen üst seviyesinin ikiden büyük olması gerektiği şartı bu çalışma ile daha keskin bir değer olarak belirlenmiştir. İkincil benzetim çalışmalarında ise  $n=1$  olarak seçilmiş ancak farklı  $m$  ve kara deliğin boy ve yarıçap oranı üzerinden parametrik taramalar yapılmıştır.  $n=1$  olması kaburga yüksekliklerinin doğrusal olarak artması gerektiğini ifade ederken kara deliğin en ve yarıçap oranının değişimi ise bu doğrusal eğrinin eğiminin ne olduğunu belirleyen bir parametredir. Bu tarama sonuçlarına göre kaburgalar arası mesafenin artış hızının maksimum olduğu değerlerde (oran=3,5) ve yine kaburga yüksekliği fonksiyonunun üst değerinin maksimum olduğu değerlerde ( $m=4$ ) soğurma katsayısının maksimum ve en geniş frekans aralığına dağıldığı sonucuna varılmıştır. Ancak “ $m$ ” değerlerinin bu şekilde hızlı artan fonksiyonlar cinsinden değişmesi, kaburgaların kara deliğin dibine yığılması aralarındaki mesafenin çok küçülmesine sebep olmuştur. Bu nedenle üretilebilirlik göz önünde bulundurularak performans açısından büyük bir farklılık göstermeyen  $m=2,8$  değeri deneysel çalışmalar için uygun bulunmuştur.

#### 4.1 Sonuçlar

Benzetim çalışmaları sonucundan elde edilen ideal parametreler ile üretilen akustik kara deliğin soğurum performansı 200 ile 600 Hz arasında frekans taraması şeklinde yapılan REW ölçümleri ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, benzetim çalışmaları ile bekleneni nispeten karşılamaktadır. Bunun sebebi benzetimlerde sadece kara deliğin soğurma katsayısı hesaplanır iken deneysel çalışmalarda ise içinde akustik kara delik olan bir odanın akustik soğurumunun nasıl değiştiği incelenebilmiştir. REW ölçümleri sonucunda elde edilen EDT, T20 ve T30 değerleri, akustik kara deliğin odanın akustik performansı üzerinde sağladığı artışı doğrudan göstermektedir. EDT değerinde gözlenen düşüş miktarı sesin ortamdan yeterince kısa sürede kaybolduğunu ve bunun sonucuna bağlı olarak ses netliğinin arttığını göstermektedir. Aynı şekilde T20 ve T30 yankı sürelerinde gözlenen düşüşler ortamın daha dengeli ve daha kontrollü bir ses yayılımına sahip olduğunu göstermektedir. Anlaşılabilirlik (C50) değerinde de bir artış gözlemlenmiş olup bu artış ortamdaki sesin daha duyulabilir ve anlaşılabilir olmasına belirgin bir şekilde katkı sağlamıştır. Elde edilen iyileşmeler odanın içinde tek bir akustik kara deliğin bulunduğu durumda elde edilmiştir. Tesir kesitinin artması ve oda akustik parametrelerinin daha da düzelebilmesi için farklı açılarda yerleştirilmiş birden fazla akustik kara delik kullanılması gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca etkili soğurumun 200 Hz'den daha düşük frekanslara özellikle modal frekans bölgesinin başlarına çekebilmek için boy ve yarıçap olarak daha büyük akustik kara delikler kullanılmasının gerekli olduğu düşünülmektedir. Böylece hem akustik kara deliğin tesir kesiti artıp hem de etkin bant aralığı daha düşük frekanslara çekilmiş olacaktır.

Sonuçta, akustik kara deliklerin ses emilim özellikleri araştırılarak özellikle düşük frekanslı seslerin kontrolünde bas tuzağı olarak kullanılabilirliği araştırılmış ve elde edilen teorik ve deneysel bulgular ile bunun mümkün olabileceği gösterilmiştir. Akustik kara deliklerin bu tasarımları sayesinde ses yalıtımı gerektiren birçok ortamda sesin emilimini sağlayan malzemelere alternatif olabilir. Akustik kara delikler ses kayıt stüdyolarını, sinema salonlarını, müzik odaları gibi mekânları düşük frekansların kontrolü için uygun hale getirmektedir.

#### 4.2 Öneriler

Bu çalışma akustik kara deliklerin ses kontrolü alanında önemli bir potansiyel taşıdığını ortaya koymuştur. Gerek düşük frekanslarda performans sağlamaları gerekse farklı

tasarım ve malzeme kombinasyonları ile uygulanabilir olmaları, bu yapıları gelecekte daha çok kullanılacak ve sonuç alınacak çözümler hâline getirmektedir. Bu bağlamda, ileride gerçekleştirilecek araştırmalar için aşağıdaki öneriler dikkate değerdir:

- ☐ Kaburga aralıkları ve yüksekliklerindeki değişimleri tanımlayan fonksiyonların (örneğin eksponansiyel, logaritmik vb.) parametrik tarama veya optimizasyon yöntemleriyle belirlenmesi,
- ☐ Bu çalışmada ele alınmayan kaburga sayısının yine optimizasyon yöntemleriyle analiz edilmesi,
- ☐ Akustik kara deliğin iç çeperinde kullanılan soğurucu sünger türlerinin performansa etkilerinin analiz edilmesi,
- ☐ Akustik kara deliğin boyu ve yarıçapının ortalama bir stüdyo hacminde ideal etki kesiti için optimize edilmesi,
- ☐ Oda içerisinde kullanılan akustik kara delik sayısının mekânın akustik performans parametreleri üzerindeki etkisinin araştırılması,
- ☐ Oda içindeki akustik kara deliklerin yönelimlerine bağlı olarak ortaya çıkan akustik performans değişimlerinin belirlenmesi,
- ☐ Dış çeperin silindirik geometri yerine çan formunda tasarlanması durumunda ilgili parametrelerin optimize edilmesi,
- ☐ Akustik kara deliklerin yalnızca iç mekânlarda değil; çevresel gürültünün yoğun olduğu dış mekânlarda, endüstriyel alanlarda ve taşıtların motor, egzoz gibi yüksek sesli bölgelerinde de ses kontrolü amacıyla kullanılabilirliğinin incelenmesi.

## KAYNAKLAR

- [1] Alagöz, S. (2009). *Farklı kristal geometrilerine sahip sonik kristallerin odaklama özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi* (Doktora tezi, İnönü Üniversitesi). Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi Malatya.
- [2] WhisperRoom. (t.y.). *What is acoustics?*. WhisperRoom Sound Isolation Enclosures. Erişim adresi: <https://whisperroom.com/tips/what-is-acoustics/>
- [3] Krishnan, R., Singh, A. K., & Swamy, N. R. (2021). Black Hole Physics: A Review of Theory, Observations, and Paradoxes. *NeuroQuantology*, 19(12), 902-911.
- [4] Mousavi, A. A., Berggren, M., & Wanner, F. (2022). How the waveguide acoustic black hole works: A study of possible damping mechanisms. *JASA Express Letters*, 2(7), 072701.
- [5] Mironov, M. A. (1988). Propagation of a flexural wave in a plate whose thickness decreases smoothly to zero in a finite interval. *Sov. Phys. Acoust.*, 34, 318–319.
- [6] V. (1990). Localized acoustic modes of a quadratic solid wedge. *Moscow Univ. Phys. Bull.*, 45, 65–69.
- [7] Krylov, V. (2007). Propagation of plate bending waves in the vicinity of one- and two-dimensional acoustic ‘black holes.’ In *Proceedings of the ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, June 13–16, Rethymno, Crete, Greece*.
- [8] Krylov, V., & Shuvalov, A. (2000). Propagation of localised flexural vibrations along plate edges described by a power law. *Proc. Inst. Acoust.*, 22(2), 263–270.
- [9] Karlos, A., Elliott, S. J., & Cheer, J. (2019). Higher-order WKB analysis of reflection from tapered elastic wedges. *J. Sound Vib.*, 449, 368–388.
- [10] Lee, J. Y., & Jeon, W. (2019). Exact solution of Euler–Bernoulli equation for acoustic black holes via generalized hypergeometric differential equation. *J. Sound Vib.*, 452, 191–204.
- [11] Krylov, V., & Tilman, F. (2004). Acoustic ‘black holes’ for flexural waves as effective vibration dampers. *J. Sound Vib.*, 274(3), 605–619.
- [12] Georgiev, V., Cuenca, J., Gautier, F., Simon, L., & Krylov, V. (2011). Damping of structural vibrations in beams and elliptical plates using the acoustic black hole effect. *J. Sound Vib.*, 330(11), 2497–2508.
- [13] He, M.-X., & Ding, Q. (2021). Data-driven optimization of the periodic beam with multiple acoustic black holes. *J. Sound Vib.*, 493, 115816.
- [14] Ji, H., Wang, N., Zhang, C., Wang, X., Cheng, L., & Qiu, J. (2021). A vibration absorber based on two-dimensional acoustic black holes. *J. Sound Vib.*, 500, 116024.
- [15] Lee, J. Y., & Jeon, W. (2021). Wave-based analysis of the cut-on frequency of curved acoustic black holes. *J. Sound Vib.*, 492, 115731.

- [16] McCormick, C. A., & Shepherd, M. R. (2019). Optimization of an acoustic black hole vibration absorber at the end of a cantilever beam. *J. Acoust. Soc. Am.*, 145(6), EL593–EL597.
- [17] Raybaud, G., Pelat, A., Ouisse, M., & Gautier, F. (2021). Zero reflections by a 1D acoustic black hole termination using thermally controlled damping. *J. Sound Vib.*, 510, 116282.
- [18] Shepherd, M. R., Feurtado, P. A., & Conlon, S. C. (2016). Multi-objective optimization of acoustic black hole vibration absorbers. *J. Acoust. Soc. Am.*, 140(3), EL227–EL230.
- [19] Tang, L., Cheng, L., Ji, H., & Qiu, J. (2016). Characterization of acoustic black hole effect using a one-dimensional fully-coupled and wavelet decomposed semi-analytical model. *J. Sound Vib.*, 374, 172–184.
- [20] Tang, L., Cheng, L., & Chen, K. (2021). Complete sub-wavelength flexural wave band gaps in plates with periodic acoustic black holes. *J. Sound Vib.*, 502, 116102.
- [21] Deng, J., Guasch, O., & Zheng, L. (2021c). Reconstructed Gaussian basis to characterize flexural wave collimation in plates with periodic arrays of annular acoustic black holes. *Int. J. Mech. Sci.*, 194, 106179.
- [22] Deng, J., Zheng, L., & Guasch, O. (2021e). Elliptical acoustic black holes for flexural wave lensing in plates. *Appl. Acoust.*, 174, 107744.
- [23] Zhu, H., & Semperlotti, F. (2017). Two-dimensional structure-embedded acoustic lenses based on periodic acoustic black holes. *J. Appl. Phys.*, 122(6), 065104.
- [24] Deng, J., Guasch, O., Zheng, L., Song, T., & Cao, Y. (2021d). Semi-analytical model of an acoustic black hole piezoelectric bimorph cantilever for energy harvesting. *J. Sound Vib.*, 494, 115790.
- [25] Maugan, F., Chesne, S., Monteil, M., Collet, M., & Yi, K. (2019). Enhancement of energy harvesting using acoustical-black-hole-inspired wave traps. *Smart Mater. Struct.*, 28(7), 075015.
- [26] Zhao, L., Conlon, S. C., & Semperlotti, F. (2014). Broadband energy harvesting using acoustic black hole structural tailoring. *Smart Mater. Struct.*, 23(6), 065021.
- [27] Zhao, L., Conlon, S. C., & Semperlotti, F. (2015). An experimental study of vibration based energy harvesting in dynamically tailored structures with embedded acoustic black holes. *Smart Mater. Struct.*, 24(6), 065039.
- [28] Conlon, S. C., Fahnlne, J. B., & Semperlotti, F. (2015). Numerical analysis of the vibroacoustic properties of plates with embedded grids of acoustic black holes. *J. Acoust. Soc. Am.*, 137(1), 447–457.
- [29] Deng, J., Guasch, O., Maxit, L., & Zheng, L. (2021a). Annular acoustic black holes to reduce sound radiation from cylindrical shells. *Mech. Syst. Signal Process.*, 158, 107722.
- [30] Deng, J., Guasch, O., Maxit, L., & Zheng, L. (2021b). Transmission loss of plates with multiple embedded acoustic black holes using statistical modal energy distribution analysis. *Mech. Syst. Signal Process.*, 150, 107262.

- [31] Ji, H., Wang, X., Qiu, J., Cheng, L., Wu, Y., & Zhang, C. (2019). Noise reduction inside a cavity coupled to a flexible plate with embedded 2-D acoustic black holes. *J. Sound Vib.*, 455, 324–338.
- [32] Ma, L., & Cheng, L. (2019). Sound radiation and transonic boundaries of a plate with an acoustic black hole. *J. Acoust. Soc. Am.*, 145(1), 164–172.
- [33] Mironov, M. A., & Pislyakov, V. V. (2002). One-dimensional acoustic waves in retarding structures with propagation velocity tending to zero. *Acoust. Phys.*, 48(3), 347–352.
- [34] El Ouahabi, A., Krylov, V., & O’Boy, D. (2015a). *Experimental investigation of the acoustic black hole for sound absorption in air*. In *Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration, July 12–16, Florence, Italy*.
- [35] El Ouahabi, A., Krylov, V., & O’Boy, D. (2015b). *Investigation of the acoustic black hole termination for sound waves propagating in cylindrical waveguides*. In *Proceedings of InterNoise 2015, August 9–12, San Francisco, CA*.
- [36] Guasch, O., Arnela, M., & Sánchez-Martín, P. (2017). Transfer matrices to characterize linear and quadratic acoustic black holes in duct terminations. *J. Sound Vib.*, 395, 65–79.
- [37] Guasch, O., Sánchez-Martín, P., & Ghilardi, D. (2020). Application of the transfer matrix approximation for wave propagation in a metafluid representing an acoustic black hole duct termination. *Appl. Math. Modell.*, 77, 1881–1893.
- [38] Hollkamp, J. P., & Semperlotti, F. (2020). Application of fractional order operators to the simulation of ducts with acoustic black hole terminations. *J. Sound Vib.*, 465, 115035.
- [39] Jimenez, N., Romero-García, V., Pagneux, V., & Groby, J.-P. (2017). Rainbow-trapping absorbers: Broadband, perfect and asymmetric sound absorption by subwavelength panels for transmission problems. *Sci. Rep.*, 7(1), 13595.
- [40] Mi, Y., Zhai, W., Cheng, L., Xi, C., & Yu, X. (2021). Wave trapping by acoustic black hole: Simultaneous reduction of sound reflection and transmission. *Appl. Phys. Lett.*, 118(11), 114101.
- [41] Mironov, M., & Pislyakov, V. (2020). One-dimensional sonic black holes: Exact analytical solution and experiments. *J. Sound Vib.*, 473, 115223.
- [42] Krylov, V. V., & Bowyer, E. P. (2003). Acoustic Black Holes: A new approach to vibration damping in light-weight structures. *Proc. Inst. Acoust.*, 25, 184–191.
- [43] Zhao, C., & Prasad, M. G. (2019). Acoustic Black Holes in Structural Design for Vibration and Noise Control. *Acoustics*, 1(1), 220–231.
- [44] Jeon, W. (2016). *Vibration damping using a spiral Acoustic Black Hole*. In *Proceedings of the Inter-Noise 2016, Hamburg, Germany, 21–24 August 2016*.
- [45] Lee, J. Y., & Jeon, W. (2017). Vibration damping using a spiral Acoustic Black Hole. *J. Acoust. Soc. Am.*, 141(3), 1437.
- [46] Bowyer, E. P., & Krylov, V. V. (2016). Slots of power-law profile as Acoustic Black Holes for flexural waves in metallic and composite plates. *Structures*, 6, 48–58.

- [47] Bowyer, E. P., O'Boy, D. J., Krylov, V. V., & Gautier, F. (2010). *Experimental investigation of damping flexural vibrations using two-dimensional Acoustic 'Black Holes'*. In *Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA 2010)*, Leuven, Belgium, 20–22 September 2010.
- [48] O'Boy, D. J., & Krylov, V. V. (2011). Damping of flexural vibrations in circular plates with tapered central holes. *J. Sound Vib.*, 330, 2220–2236.
- [49] Bowyer, E. P., & Krylov, V. V. (2012). *Sound Radiation of rectangular plates containing tapered indentations of power-law profile*. In *Proceedings of the 164th Meeting of the Acoustical Society of America*, Kansas City, MO, USA, 22–26 October 2012.
- [50] Feurtado, P. A., & Conlon, S. C. (2015). *Experimental analysis of vibration and radiated sound power reduction using an array of Acoustic Black Holes*. In *Proceedings of the Inter-Noise 2015*, San Francisco, CA, USA, 9–12 August 2015.
- [51] Bowyer, E. P., & Krylov, V. V. (2015). *A review of experimental investigations into the Acoustic Black Hole effect and its applications for reduction of flexural vibrations and structure-borne sound*. In *Proceedings of the Inter-Noise 2015, The 44th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, San Francisco, CA, USA, 9–12 August 2015.
- [52] Azbaid, E., Krylov, V. V., & O'Boy, D. J. (2015). *Experimental investigation of the Acoustic Black Hole for sound absorption in air*. In *Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration*, Florence, Italy, 12–16 July 2015.
- [53] Azbaid, E., Krylov, V., & O'Boy, D. J. (2015). *Investigation of the Acoustic Black Hole termination for sound waves propagating in cylindrical waveguides*. In *Proceedings of the Inter-Noise 2015*, San Francisco, CA, USA, 9–12 August 2015.
- [54] Zhao, C., & Prasad, M. G. (2017). *Studies on influence of geometrical parameters of an Acoustic Black Hole*. In *Proceedings of the Noise-Con 2017*, Grand Rapids, MI, USA, 12–14 June 2017.
- [55] Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2015). *Mechanics of Materials* (7. baskı). McGraw-Hill Education.
- [56] Hibbeler, R. C. (2017). *Mechanics of Materials* (10. baskı). Pearson Education.
- [57] Feurtado, P. A., Conlon, S. C., & Semperlotti, F. A. (2014). Normalized wave number variation parameter for Acoustic Black Hole design. *J. Acoust. Soc. Am.*, 136(1), 148–152.
- [58] Krylov, V. V. (2012). *Acoustic Black Holes and their applications for vibration damping and sound absorption*. In *Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA 2012)*, Leuven, Belgium, 17–19 September 2012 (pp. 933–944).
- [59] Krylov, V. V., & Bowyer, E. P. (2003). Acoustic Black Holes: A new approach to vibration damping in light-weight structures. *Proc. Inst. Acoust.*, 25, 184–191.

- [60] Mousavi, A., Berggren, M., & Wadbro, E. (2022, Haziran). How the waveguide acoustic black hole works: A study of possible damping mechanisms. *J. Acoust. Soc. Am.*, 151(6), 4281-4282.
- [61] Berggren, M., Bernland, A., & Noreland, D. (2018). Acoustic boundary layers as boundary conditions. *J. Comput. Phys.*, 371, 633–650.
- [62] Hinton, E., & Owen, D. R. J. (1979). *An introduction to finite element computations*. Pineridge Press Limited.
- [63] Fagan, M. J. (1992). *Finite Element Analysis Theory & Practice*. Longman.
- [64] Abdalla, O. A. S. (1996). *Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak taşıt yapı analizi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [65] Lafarge, D., Lemarinier, P., Allard, J.-F., & Tarnow, V. (1997). Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies. *J. Acoust. Soc. Am.*, 102(4), 1994–2006.
- [66] International Organization for Standardization. (1996). *ISO 10534-1: Acoustics—Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 1: Method using standing wave ratio*.
- [67] International Organization for Standardization. (1998). *ISO 10534-2: Acoustics—Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. <sup>1</sup> Part 2: Transfer-function method*.
- [68] Graf, T. (2019). *Acoustic Pitfalls of Impedance Tube Measurements*. Excerpt from the Proceedings of the 2019 COMSOL Conference in Cambridge.
- [69] REW - Room EQ Wizard. (n.d.). *REW - Room EQ Wizard*. Retrieved from <https://www.roomeqwizard.com/>
- [70] Mulcahy, J. (2011). *REW V5 Help*. Retrieved from [[http://www.roomeqwizard.com/rewv5\\_help.pdf](http://www.roomeqwizard.com/rewv5_help.pdf)]

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Mehmet İZCİ

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lise** :
- **Lisans** : 2009, İnönü Üniversitesi, Fen ve Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü
- **Yüksek Lisans** :

### YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

(Makaleler, Bildiriler, Patentler v.b.)