

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

**FAZ EĞİMİ OLUŞTURAN HELMHOLTZ REZONATÖR DİZİLERİ İLE
ANORMAL YANSIMA ÖZELLİĞİNE SAHİP AKUSTİK YAPAY YÜZEY
TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serpil KOÇ

Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Olgun Adem KAYA

EYLÜL 2022

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

**FAZ EĞİMİ OLUŞTURAN HELMHOLTZ REZONATÖR DİZİLERİ İLE
ANORMAL YANSIMA ÖZELLİĞİNE SAHİP AKUSTİK YAPAY YÜZEY
TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Serpil KOÇ
(36183612040)**

Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Olgun Adem KAYA

EYLÜL 2022

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgmeden beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Olgun Adem KAYA'ya,

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince de beni her türlü destekleyen aileme,

Teşekkür ederim.



ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Faz Eğimi Oluşturan Helmholtz Rezonatör Dizileri ile Anormal Yansıma Özelliğine Sahip Akustik Yapay Yüzey Tasarımı” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Serpil KOÇ



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Akustik Dalga Denklemleri.....	2
1.2 Yapay Malzemeler	3
1.3 Akustik Yapay Malzemeler.....	4
1.4 Helmholtz Rezonatörü.....	5
1.5 Helmholtz Rezonatörünün Rezonans Frekansının Hesaplanması	7
1.6 Genelleştirilmiş Snell Yasası	8
2. MATERYAL VE YÖNTEM	10
2.1 Sonlu Elemanlar Metodu (SEM)	10
2.2 COMSOL Multiphysics Yazılım Paketi	11
2.3 Akustik modülü.....	12
2.4 Rezonatör Geometrilere ve Comsol Modelleri.....	12
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	16
3.1 Rezonans Frekansı Sonuçları.....	16
3.2 Faz Taraması Sonuçları.....	21
3.3 Faz Değişimine Göre Boyun Parametrelerinin Belirlenmesi.....	30
3.4 Akustik Yapay Yüzeyi Oluşturan Rezonatör Dizisi Tasarımları.....	35
3.4.1 $\pi/4$ Faz aşamasıyla oluşturulan rezonatör dizisi	35
3.4.2 $\pi/3$ Faz aşamasıyla oluşturulan rezonatör dizisi tasarımı	36
3.5 Akustik Yapay Yüzey Tasarımı.....	37
3.5.1 $\pi/4$ Faz aşamasıyla tasarlanan yapay yüzeyin basınç grafiklerinin incelenmesi	37
3.5.2 $\pi/3$ faz aşamasıyla tasarlanan yapay yüzeyin basınç grafiklerinin incelenmesi	39
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	41
5. KAYNAKLAR.....	43
ÖZGEÇMİŞ	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 : Tek satırlı ve kolonlar ortalanmış çizelge.	32
Çizelge 3.2 : Çizelge ismi nokta ile bitirilmelidir.	35



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Ses dalgasının zamana bağlı yayılımı.	1
Şekil 1.2. Ses dalgasının konuma bağlı yayılımı.	2
Şekil 1.3. Görünmezlik pelerinin genişletilmiş görünümü.	4
Şekil 1.4. (a) Çelik hibrit labirent birimlerden oluşan üç boyutlu akustik lensin şematik diyagramı, (b) Lensin bir biriminin kesiti, (c) Tasarlanan lensin görünümü.	5
Şekil 1.5. Helmholtz rezonatör.	7
Şekil 1.6. Dalgalarda (a) Kırılma durumu, (b) Anormal yansıma durumu.	9
Şekil 2.1. SEM ile çözümlenen (a) Problem alanı (b) Izgara ve düğüm noktalarının gösterimi.	10
Şekil 2.2. (a) bir boyutta, (b) iki boyutta dörtgensel, (c) iki boyutta üçgensel (d) üç boyutta altı yüzlü ızgara biçimi.	11
Şekil 2.3. İkili Helmholtz rezonatör geometrisi. (a) parametreler, (b) örnek ızgaralama.	13
Şekil 2.4. Faz hesaplamalarında kullanılan rezonatör ve hava bölgesi geometrisi.	14
Şekil 2.5. Yansıma açısı hesaplamalarında kullanılan geometri ve arka plan basınç alanı.	15
Şekil 3.1. Boyun parametrelerine bağlı (d_2 ve l_2) birinci rezonans frekansı değişimi.	17
Şekil 3.2. Boyun parametrelerine bağlı (d_2 ve l_2) ikinci rezonans frekansı değişimi.	18
Şekil 3.3. Rezonatör yüksekliği ve genişliğine bağlı birinci rezonans frekansı değişimi. Boyun parametreleri (a) $d_2 = l_2 = 0,3$ cm, (b) $d_2 = l_2 = 0,9$ cm ve (c) $d_2 = l_2 = 1,7$ cm.	19
Şekil 3.4. Rezonatör yüksekliği ve genişliğine bağlı ikinci rezonans frekansı değişimi. Boyun parametreleri (a) $d_2 = l_2 = 0,3$ cm, (b) $d_2 = l_2 = 0,9$ cm ve (c) $d_2 = l_2 = 1,7$ cm.	20
Şekil 3.5. $f=1063$ Hz için (a) boğaz parametrelerine bağlı faz değişimi, (b) $l_2=2,3$ cm için d_2 'ye bağlı faz değişimi.	22
Şekil 3.6. $f=1109$ Hz için faz (a) boğaz parametrelerine bağlı faz değişimi, (b) $l_2=2,3$ cm için d_2 'ye bağlı faz değişimi.	23
Şekil 3.7. $f=1071$ Hz için faz (a) boğaz parametrelerine bağlı faz değişimi, (b) $l_2=2,3$ cm için d_2 'ye bağlı faz değişimi.	24
Şekil 3.8. $f=1960$ Hz için faz (a) boğaz parametrelerine bağlı faz değişimi, (b) $l_2=0,5$ cm için d_2 'ye bağlı faz değişimi.	25
Şekil 3.9. $f=1978$ Hz için faz (a) boğaz parametrelerine bağlı faz değişimi, (b) $l_2=0,5$ cm için d_2 'ye bağlı faz değişimi.	26
Şekil 3.10. $f=2190$ Hz için faz (a) boğaz parametrelerine bağlı faz değişimi, (b) $l_2=0,5$ cm için d_2 'ye bağlı faz değişimi.	27
Şekil 3.11. Sabit boyun parametreleri için birinci ve ikinci rezonans frekanslarındaki faz değişimleri. $d_2 = l_2 = 0,3$ cm için (a) $f=1340$ Hz, (b) $f=3105$ Hz, $d_2 = l_2 = 0,9$ cm için (c) $f=1320$ Hz, (d) $f=3270$ Hz, $d_2 = l_2 = 1,7$ için (e) $f=1202$ Hz ve (f) $f=3185$ Hz.	29
Şekil 3.12. $f=2190$ Hz ve $l_2=0,5$ cm için d_2 'ye bağlı basınç değişimi. Boyun genişliği parametreleri (a) $d_2=0,5$ cm, (b) $d_2=1,0$ cm, (c) $d_2=1,5$ cm ve (d) $d_2=2,0$ cm.	30
Şekil 3.13. $f=2190$ Hz için $\pi/4$ faz değişimine karşılık gelen d_2 değerleri grafiği.	31
Şekil 3.14. $f=1978$ Hz için $\pi/4$ faz değişimine karşılık gelen d_2 değerleri grafiği.	31
Şekil 3.15. $f=1960$ Hz için $\pi/4$ faz değişimine karşılık gelen d_2 değerleri grafiği.	32
Şekil 3.16. $f=2363$ Hz için $\pi/3$ faz değişimine karşılık gelen d_2 değerleri grafiği.	33
Şekil 3.17. $f=2192$ Hz için $\pi/3$ faz değişimine karşılık gelen d_2 değerleri grafiği.	34
Şekil 3.18. $f=2393$ Hz için $\pi/3$ faz değişimine karşılık gelen d_2 değerleri grafiği.	34
Şekil 3.19. $\pi/4$ aşamayla faz değişimi gösteren rezonans frekansları için tasarlanan rezonatör dizisi gösterimi.	35
Şekil 3.20. $\pi/3$ aşamayla faz değişimi gösteren rezonans frekansları için tasarlanan rezonatör dizisi gösterimi.	36

Şekil 3.21. $f=1960$ Hz için d_2 'ye bağlı saçılan dalga basınç değişim grafiği. Hesaplanan yansıma açısı= 45.005 derece.....	37
Şekil 3.22. $f=1978$ Hz için d_2 'ye bağlı saçılan dalga basınç değişim grafiği. Hesaplanan yansıma açısı= 44.997 derece.....	38
Şekil 3.23. $f=2190$ Hz için d_2 'ye bağlı saçılan dalga basınç değişim grafiği. Hesaplanan yansıma açısı= 44.944 derece.....	38
Şekil 3.24. $f=2192$ Hz için d_2 'ye bağlı saçılan dalga basınç değişim grafiği. Hesaplanan yansıma açısı= 60.001 derece.....	39
Şekil 3.25. $f=2363$ Hz için d_2 'ye bağlı saçılan dalga basınç değişim grafiği. Hesaplanan yansıma açısı= 60.004 derece.....	40
Şekil 3.26. $f=2393$ Hz için d_2 'ye bağlı saçılan dalga basınç değişim grafiği. Hesaplanan yansıma açısı= 59.955 derece.....	40
Şekil 4.1. $f=2190$ Hz için yansıma açısının sıcaklığa bağlı değişimi.	42



SEMBOLLER VE KISALTMALAR

λ	: Dalga boyu
π	: Pi sayısı
V	: Dalga hızı
f	: Frekans
p	: Basınç
ρ	: Yoğunluk
c	: Ses hızı
ω	: Açısal frekans
t	: Zaman
V	: Rezonatör boşluğunun hacmi
h	: Rezonatör yüksekliği
r	: Rezonatör genişliği
l	: Rezonatör boyun yüksekliği
d	: Rezonatör boyun genişliği
n	: Kırılma indisi
θ	: Teta
X, Y, Z	: Düzlem
p_s	: Saçılan dalga basıncı
k	: Dalga vektörü
v_{sx}	: Saçılan dalganın x yönündeki parçacık hızı
v_{sy}	: Saçılan dalganın y yönündeki parçacık hızı
$\partial\phi/\partial x$	: Faz gradyanı
X, Y, Z	: Koordinat
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
CM	: COMSOL Multiphysics
PML	: Mükemmel Soğurucu Katman
vb	: Ve benzeri

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Faz Eğimi Oluşturan Helmholtz Rezonatör Dizileri ile Anormal Yansıma Özelliğine Sahip
Akustik Yapay Yüzey Tasarımı

SERPİL KOÇ

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

48+IX sayfa

2022

Danışman: Prof. Dr. Olgun Adem Kaya

Bu çalışmada seri bağlı Helmholtz rezonatör dizileri ile 0 ile 2π arasında değişen bir faz gradyenti oluşturarak anormal yansıma yapan bir yapay yüzey tasarımı yapılmıştır. Faz gradyentindeki değişimin sadece ikinci rezonatörün boyun genişliğine bağlı olarak ayarlanabileceği gösterilmiştir. Rezonatörlerin geometrik parametrelerine bağlı olarak hesaplanan faz gradyentleri COMSOL Multiphysics yazılım paketiyle Sonlu Elemanlar Metodu kullanılarak iki boyutlu modeller ile incelenmiştir. Dik gelen dalgaya 45 ve 60 derecelik açılarla anormal yansıma yaptıran yapay yüzeyi oluşturmak için periyodik rezonatör dizileri kullanılmıştır. Önerilen yapay yüzey kalınlığının, kullanılan dalga boyundan (yaklaşık $1/3$ 'ü kadar) daha ince yapıya sahip olması akustik cihazların boyutunun küçültülmesi açısından önemlidir. Ayrıca örnek bir sensör uygulaması ile anormal yansıma açısının sıcaklığa bağlı bir şekilde değiştiği ($\cong 0,056$ deg/K) gösterilmiştir. Ortam parametrelerine bağlı olarak yansıma açısının değişim göstermesi yüksek frekanslarda tasarlanacak çeşitli sensör tasarımlarına da ışık tutacak niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Akustik Yapay Yüzeyler, Helmholtz Rezonatörleri, Faz Gradyenti, Anormal Yansıma

ABSTRACT

Master Thesis

Design of Acoustic Artificial Surfaces with Abnormal Reflection with Helmholtz Resonator Arrays Forming Phase Slope

SERPİL KOÇ

Inonu University
Institute Of Sciences
Department of Physics

48+IX pages

2022

Supervisor: Prof. Dr. Olgun Adem Kaya

In this study, an artificial surface design with abnormal reflection was made by creating a phase gradient ranging from 0 to 2π with series decoupled Helmholtz resonator arrays. It has been shown that the change in the phase gradient can be adjusted only depending on the neck width of the second resonator. The phase gradients calculated depending on the geometric parameters of the resonators were studied with two-dimensional models using the Finite Element Method with the COMSOL Multiphysics software package. Periodic resonator arrays were used to create an artificial surface that reflects abnormally at angles of 45 and 60 degrees perpendicular to the incoming wave. The fact that the proposed artificial surface thickness has a thinner structure than the wavelength used (about 1/3 of the wavelength) is important in terms of reducing the size of acoustic devices. In addition, with an example sensor application, it was shown that the abnormal reflection angle varies depending on the temperature ($\cong 0.056$ deg/K). The fact that the reflection angle changes depending on the ambient parameters will shed light on various sensor designs to be designed at high frequencies.

Keywords: Acoustic Metasurfaces, Helmholtz Resonators, Phase Gradient, Generalized Snell's Law

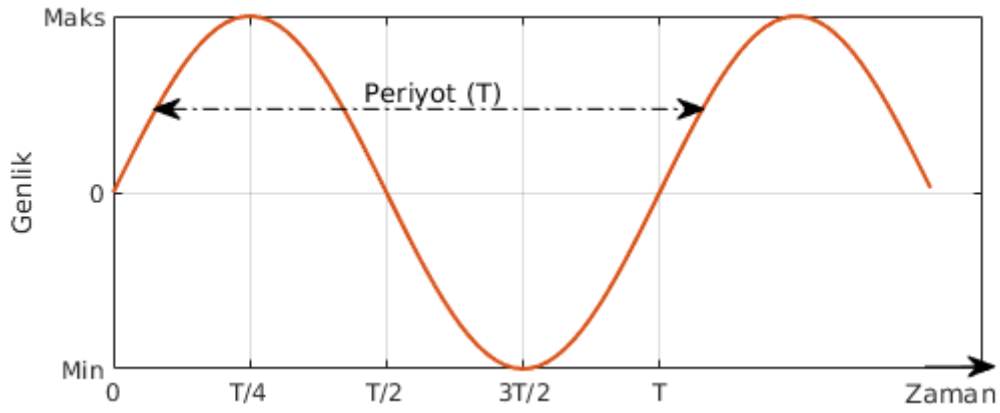
1. GİRİŞ

Akustik, titreşim ve dalgaların oluşması, yayılması ve yönlendirilmesi gibi konuları inceleyen bilim dalıdır. Bir cismin dışardan herhangi bir etkiyle ileri geri veya dönme hareketi yapması titreşim hareketidir. Bu titreşimlerin ortamda yayılmasına ise dalga denir.

Dalganın yayılma yönü ile titreşim doğrultusu aynı yönde ise boyuna dalga, yayılma yönü ve titreşim doğrultusu birbirine dik ise enine dalga olarak adlandırılır. Ses, herhangi bir dış etken ile bir maddede oluşturulan titreşimlerin yaydığı enerjidir. Oluşan titreşimler havadaki moleküller tarafından dalgalar halinde taşındığından dolayı ses dalgası olarak adlandırılır. Ses dalgası mekanik ve boyuna dalga türüdür. Ses dalgası boşlukta yayılamaz.

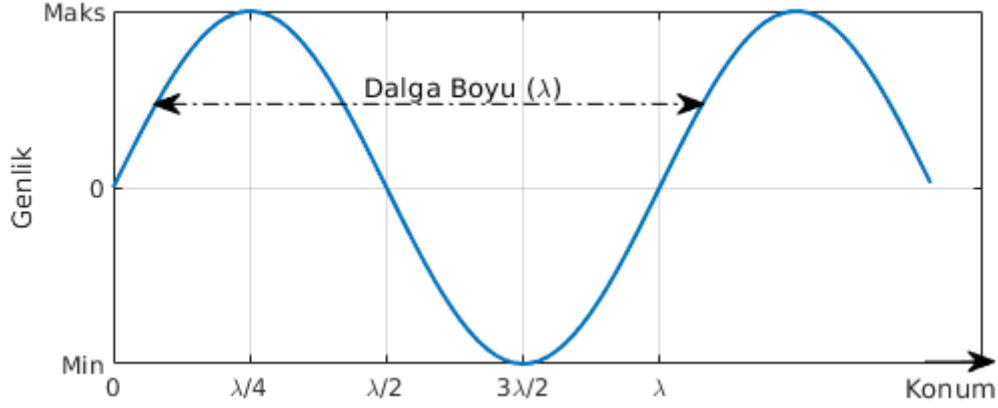
Ses dalgalarının yayılma hızı sıcaklığa, kaynağa olan uzaklığa ve ortamın yoğunluğuna (en yavaş yayılma hızı gazlarda iken en hızlı yayılma hızı katı ortamda gerçekleşir) bağlıdır.

Ses dalgası sinüsel dalga ile temsil edilmektedir. Dalgaların yayılması hem zamana hem de konuma periyodik olarak bağlıdır. Birim zamanda bir tam dalganın oluşması için gereken süreye periyot (Şekil 1.1) denir. T ile gösterilir. Birimi saniyedir.



Şekil 1.1: Ses dalgasının zamana bağlı yayılımı.

Bir tam dalganın oluşması için gereken mesafeye ise dalga boyu (Şekil 1.2) adı verilir. λ ile gösterilir. Birimi metredir.



Şekil 1.2: Ses dalgasının konuma bağlı yayılımı.

Bu durumda bir tam dalganın oluşması için gereken yol dalga boyu λ , geçen sürenin bir periyot olduğu düşünülürse dalganın ilerleme hızı olan V ;

$$V = \lambda \frac{1}{T} = \lambda f \quad (1.1)$$

Eşitlik (1.1) şeklinde verilir. Burada f frekansı temsil etmektedir. Birim zamanda oluşan dalga sayısıdır. Birimi Hertz (Hz) veya $1/s$ 'dir.

Ses dalgaları frekanslarının büyüklüklerine göre üç farklı grupta incelenebilir [1].

- **Duyulabilir ses dalgaları**

İnsan kulağının duyduğu 20 Hz ile 20 kHz frekansları arasındaki titreşimlerden oluşan ses dalgalarıdır. İşitme sesi olarak adlandırılmaktadır.

- **Ses altı dalgalar**

Frekans değerleri 0.001 Hz ile 20 Hz aralığında olan insan kulağının işitmediği, duyulabilir ses frekansı aralığının daha altında olan ses dalgalarıdır.

- **Ses üstü dalgalar**

İnsan kulağının duyabileceği üst sınır olan 20 kHz'den daha yüksek frekansa sahip ses dalgalarıdır.

1.1 Akustik Dalga Denklemi

Ses dalgalarının sıvı ve gaz ortamlardaki hızı için basınç alanının zamana ve konuma göre değişimini ifade eden genel akustik dalga denklemi,

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho(\mathbf{r})} \nabla p(\mathbf{r}) \right) + \frac{\omega^2}{\rho(\mathbf{r})c^2(\mathbf{r})} p(\mathbf{r}) = 0; \quad p(\mathbf{r}, t) = p(\mathbf{r}) e^{i\omega t} \quad (1.2)$$

Eşitlik 1.2 şeklindedir [2]. Burada $\mathbf{r}$ üç boyutlu uzaydaki konumu, $p(\mathbf{r})$ akustik basıncı, $\rho(\mathbf{r})$ yoğunluğu, $c(\mathbf{r})$ ortamda ki ses hızını ω açısal frekans öz değerini ve t de zamanı ifade etmektedir. Ortam parametreleri konuma bağlı ifade edilebildiğinde akustik dalganın ilerleyişi bu denklemin nümerik çözümleri ile tasvir edilebilmektedir. Ayrıca uzaysal ve zamansal kısımlarına ayrılıp sınır koşullarına bağlı olarak ortamda yayılan dalganın titreşim şekillenimlerini ve frekanslarını belirlemek mümkün olabilmektedir.

1.2 Yapay Malzemeler

Yapay malzemeler [3] metal ve plastik gibi doğada bulunan malzemelerin periyodik bir yapı içinde düzenli aralıklarla dizilmesiyle oluşan kompozit malzemelerdir. Farklı ya da aynı tür malzemeden oluşabilirler. Bu tür yapılar kendisini oluşturan malzemelerin özelliklerini değil, homojen bir malzeme gibi davranarak yeni tasarlanmış yapının özelliklerini taşır. Yapay malzemenin en küçük parçası birim hücre olarak adlandırılmaktadır. Birim hücrelerin yan yana getirilmesiyle oluşan yapı süper hücredir [4]. Süper hücrelerin belli aralıklarla dizilmesiyle de yapay yüzey oluşmaktadır.

Uygun şekilde tasarlanmış yapay malzemeler belirli dalga boylarında anormal yansıma özelliği gösterirler. Etkiledikleri olayların dalga boyundan daha küçük ölçeklerde, düz yüzeyli, ultra ince yapılar olarak üretilebilirler [5].

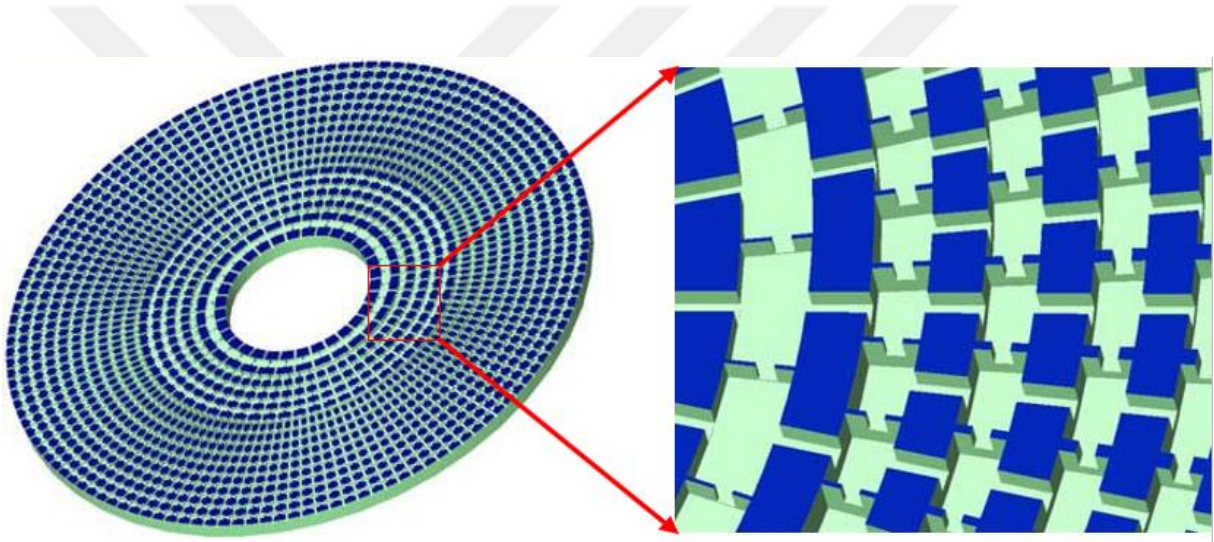
Yapay malzemeler ilk olarak 1968 yılında Victor Veselago tarafından tanımlanmıştır [6]. Faz hızının, Poynting vektörünün yönüne zıt yönde yapılabileceğini (enerjinin ters yönde akabileceğini) teorik olarak ispatlamış ve bunun doğada bulunan malzemelerin dalga yayılımına (Snell yasasına) aykırı olduğunu göstermiştir [7]. Bu yaklaşıma göre, çalışma dalga boyundan çok daha küçük boyutta tasarlanan bir yapay yüzey ile faz süreksizliği oluşturularak akustik dalga bükülebilir, odaklanabilir ve ortam boyunca belirli bir noktada yavaşlatılabilir, hatta durdurulabilir [8].

Yapay malzemeler optik filtreler, medikal cihazlar, uzak havacılık uygulamaları, akıllı güneş enerjisi yönetimi, yüksek frekanslı savaş alanı iletişimi, ultrasonik sensörler ve süper lens tasarımı gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

1.3 Akustik Yapay Malzemeler

2000 yılında silikon kauçuklarla kaplanmış ayırık halka rezonatörlerinden oluşan ve 400 Hz gibi çok düşük bir frekansta yüksek iletim kaybı sağlayan yapay malzeme, akustik alanında literatüre kazandırılan ilk örnek olma özelliğini taşımaktadır [9]. Daha sonra ise 100-1000 Hz aralığında sesi zayıflatan membran tipi bir akustik yapay malzeme de geliştirilmiştir [10].

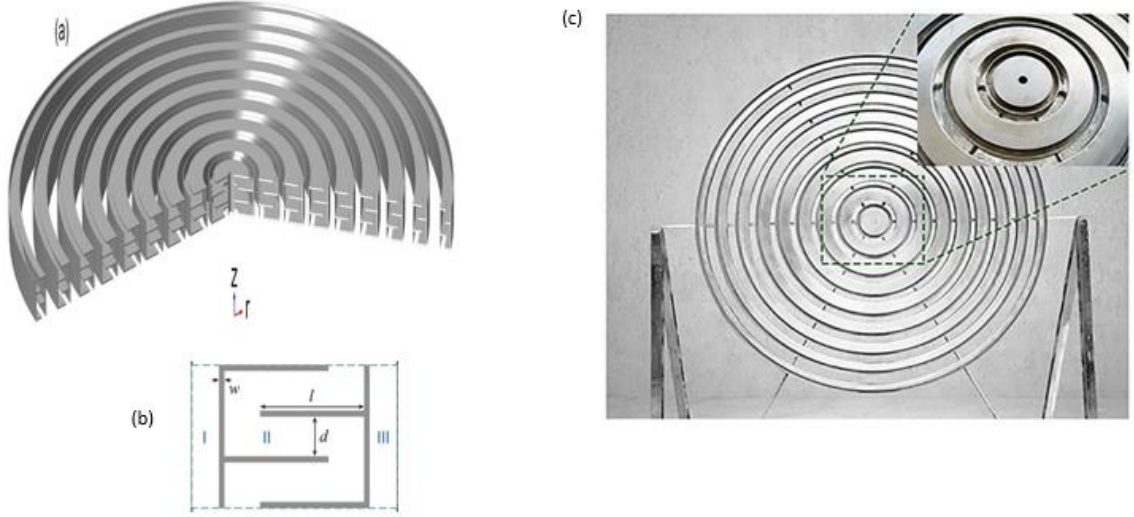
Su altında ses üstü dalgalar için tasarlanan daire halinde periyodik bir şekilde dizilmiş seri bağlı kapasitör ve paralel bağlı indüktörlerin akustik yapay yüzey karşılıklarından oluşan ve gizlenmek istenen nesnenin etrafını tamamen saran görünmezlik pelerini çalışmaları oldukça ilgi görmüştür [11,12].



Şekil 1.3: Görünmezlik pelerininin genişletilmiş görünümü [11].

Başka bir çalışmada ise tek boyutta, yan deliklere sahip bir tüp tasarlanarak elde edilen akustik yapay malzemede 450 Hz altındaki seslerin geçmediği deneysel ve teorik olarak gösterilmiştir [13]. 400 Hz’lik bant genişliğine sahip bir frekans alanında, bölünmüş içi boş küre ile oluşturulan düzlemsel yapay yüzeyde anormal yansımanın rapor edildiği önemli bir çalışma da mevcuttur [14].

Ultra ince akustik soğurucular [15] ve akustik diyot [16] vb. birçok farklı tasarım yapılmıştır. Çelik labirentler kullanılarak üç boyutta tasarlanan akustik lens ile 815 Hz gibi düşük bir frekansta sesin odaklanması sağlanmıştır. Tasarlanan lens, çalışma dalga boyunun yaklaşık 1/6’sı kadardır ve ultra ince düzlemsel yapısıyla alanında dikkat çeken önemli bir çalışmadır [17].



Şekil 1.4: (a) Çelik hibrit labirent birimlerden oluşan üç boyutlu akustik lensin şematik diyagramı, (b) Lensin bir biriminin kesiti, (c) Tasarlanan lensin görünümü [17].

Yine, elektromanyetik dalgalarda ultra ses bölgesinde 0.43 THz ile 1.0 THz geniş bant aralığında 60.5 kHz frekansta ses dalgalarının nasıl odaklanabileceğini gösteren Helmholtz rezonatörlerinden oluşan düz yüzeyli akustik lens tasarımı da oldukça önemli çalışmalar arasında yer almaktadır [18].

Akustik yapay malzeme tasarımında rezonans frekansında yüksek iletim kaybı sunan akustik rezonatörler [19] de kullanılmaktadır.

1.4 Helmholtz Rezonatörü

Bu çalışmada, akustik yapay malzemelerin birim hücreleri olarak Helmholtz rezonatörleri kullanılmıştır. Tasarımı kolay ve çok farklı akustik özelliklere sahip önemli bir rezonatör türü olan Helmholtz rezonatörleri ile yapay yüzey tasarımı yapılmıştır [20,21].

Alman fizikçi Hermann von Helmholtz'dan adını alan ve çok farklı akustik özelliklere sahip önemli bir rezonatör türü olan Helmholtz rezonatörü (Şekil 1.5) kapalı bir hacim ve bunun dışı açılan boynundan oluşur [22]. Akustik dalga boyun kısmındaki akışkan (hava, su vs.) iterek kapalı hacim içerisindeki akışkanın sıkışmasına neden olur. Sıkışan akışkan daha sonra genişleyerek boyun kısmındaki akışkanın geri hareketine neden olup güçlü bir titreşim hareketi meydana getirir. Sistem keskin bir rezonans frekansına sahip olduğu için daha çok akustik ton filtresi olarak kullanılmıştır. Ancak yapı içindeki akışkanın sıkışma ve gevşemesi

yansıyan dalgada bir faz gecikmesine sebep olmaktadır [23,24]. Bu faz gecikmesi sayesinde yan yana dizilen farklı faz değerlerine sahip rezonatörler kullanılarak akustik dalgaya müdahale edilebilmesi mümkün olmuştur [25]. Bu alanda yapılan ilk çalışmalar daha çok gürültü azaltmaya yönelik yapay yüzey tasarımları iken son zamanlarda Snell yasasına uymayan anormal yansıma özelliklerine sahip ve büyüklükleri etkin oldukları dalga boyuna kıyasla çok küçük olan yapay yüzey tasarımları ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır [26-30].

Helmholtz rezonatör serisinden oluşan ultrasonik yapay malzeme tasarımı yapılarak faz hızı ve grup hızının zıt yönlü olabileceği gösterilmiştir [31]. Bu çalışmanın bulguları akışkan içindeki bir Helmholtz rezonatörün etkili ortam parametreleri analitik olarak elde edilerek desteklenmiştir [32].

Üç farklı uzatılmış boyna sahip Helmholtz rezonatörü tasarlanarak aralarındaki rezonans frekansı değişimi ve iletim kaybı incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, uzatılmış boynun uzunluğunun artmasıyla emilimin arttığı ve rezonans frekansının düştüğü gözlemlenmiştir [33]. Bir başka çalışmada ise bir havalandırma kanalı sisteminde çoklu birleştirilmiş Helmholtz rezonatör dizileri kullanılarak düşük frekansta ve geniş bantta gürültünün azaltılabileceği gösterilmiştir [34]. Yine, farklı boyutlara sahip Helmholtz rezonatörlerinin monte edildiği mikro delikli bir panelde, rezonatör boyutlarının değiştirilerek ses emilimini artırdığını gösteren sonuçlar simülasyonla ve deneysel olarak elde edilmiştir [35].

Farklı boyutlarda sarmal Helmholtz rezonatör dizisinden oluşan, düz yüzeyli ve yansıtıcı özelliğe sahip bir akustik yapay yüzeyin yönlendirici ses hüzmesi olarak kullanılabileceği hem sayısal hem de deneysel olarak gösterilmiştir ve literatüre kazandırılan önemli örneklerdendir [36].

Birim hücresi iki farklı Helmholtz rezonatörden oluşan bir yapı ile 500 ve 1000 Hz frekanslarda 45 dB'in üzerindeki seslerde iletim kaybı sağlandığını gösteren başka bir çalışma yapılmıştır [37]. Çok katmanlı olarak tasarlanan gömülü açıklığa sahip farklı parametrelerden oluşan üç farklı Helmholtz rezonatör tasarımı yapılarak 100 ve 400 Hz'de çok iyi soğurum sağlandığı da rapor edilen çalışmalar içerisinde [38]. Son yıllarda yapılan ve bir dizi Helmholtz rezonatörden oluşan ve 100 ile 1000 Hz geniş bant aralığında %81 emilim sağlayan, 1/18.8 dalga boyuna sahip yapay yüzey hem teorik hem de deneysel olarak sunulduğu makale de dikkat çekicidir. [39].

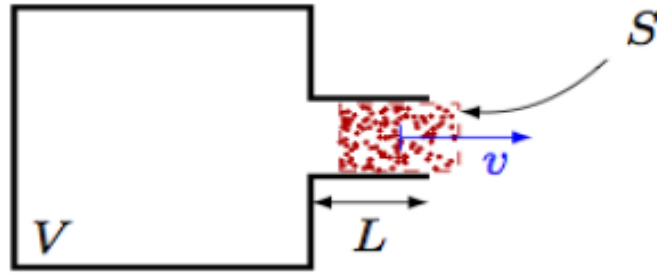
Simetrik çift Helmholtz rezonatör boşluklarından oluşan elastik yapay yüzey ile su altında akustik pelerin olarak tasarlanan çalışma oldukça önemli çalışmalardandır [40].

Farklı değerlerdeki uzatılmış boyna sahip Helmholtz rezonatörlerini belli aralıklarla dizerek, kalınlığı uygulanan dalga boyunun 1/30'u kadar ince yapıya sahip ve 1000 Hz frekansta ses dalgalarını yönlendirebilen bir yapay yüzeyin elde edildiğinin rapor edildiği çalışma öne çıkmaktadır [41].

Daha sonra yapılan bir çalışmada ise bir veya birden fazla küçük açıklıkla delinmiş küre şeklindeki Helmholtz rezonatörlerden oluşan ikiz rezonatörlerin yönünü veya birbirlerine olan uzaklıklarının değiştirerek sesin belli frekanslarda yönlendirilmesi sağlanmıştır [42].

Yukarıda da bahsedildiği üzere Helmholtz rezonatörü akustik yapay malzemeler için önemli bir birim hücre olma özelliği taşımaktadır. Farklı şekillerde tasarlanan Helmholtz rezonatörler ile soğurma, akustik pelerin ve dalga manipölasyonu gibi önemli özellikler gösteren birçok yapay yüzey çalışması literatüre yansımıştır.

1.5 Helmholtz Rezonatörünün Rezonans Frekansının Hesaplanması



şekil 1.5: Helmholtz rezonatör.

şekil 1.5 ile verilen Helmholtz rezonatörde v dalganın ilerleme hızını temsil etmektedir. V boşluk hacmi, L boyun uzunluğu, S boyun çapı, r boyun genişliğinin yarıçapı ve c ses hızı olmak üzere rezonans frekansı hesaplaması

$$f = \frac{cr}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi}{(2L+\pi r)V}} \quad (1.3)$$

Eşitlik (1.3) ile verilir [43]. Rezonatörde boyun yoksa

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{2r}{V}} \quad (1.4)$$

Eşitlik (1.4) ile rezonans frekansı hesaplanır.

Eşitlik (1.3 ve 1.4) incelendiğinde Helmholtz rezonatörün rezonans frekansının rezonatörün boyutlarına bağlı olduğu görülmektedir [44,50]. Yani rezonatör parametreleri olan boşluk hacmi, boyun uzunluğu ve boyun genişliğinde meydana gelen bir değişim rezonans frekansının da değişmesine neden olmaktadır.

Bu çalışmada yapılan rezonans frekansı hesaplamalarının tamamı nümerik olarak yapılmıştır. Oluşturulan modeller iki boyutlu oldukları için yukarıda bahsedilen üç boyutlu rezonans frekansı hesapları ile analitik olarak hesaplanamamışlardır. Ancak kullanılan nümerik yöntem ve yazılımın üç boyutlu yapılarda çok doğru sonuç verdiği bilinmektedir [21]. Yöntemin detayları ikinci bölümde verilmiştir.

1.6 Genelleştirilmiş Snell Yasası

Snell Yasasına [51] göre bir yüzeye çarpan dalga, ortam değiştirirken geçtiği ortamın yoğunluğuna bağlı olarak belli bir açıyla kırılarak geçer. Yansıyan dalga ise geliş açısı ile geriye doğru ilk ortama yansır. Doğadaki bütün malzemeler bu yasaya uygun şekilde davranırlar.

Oluşturulan yapay yüzeyler ile dalganın geliş açısından farklı bir açı ile aynı ortama yansıtılması sağlanmaktadır. Böylece dalga kontrol edilebilir, yönlendirebilir ve bükülebilir. Buna anormal yansıma denilmektedir ve Genelleştirilmiş Snell yasası ile açıklanmaktadır [52]. Genelleştirilmiş Snell yasasına göre geliş açısıyla gelen dalga istenen bir açıyla yansıtılabilir.

$$\sin \theta_t n_t - \sin \theta_i n_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\varphi}{dx} \quad (1.5)$$

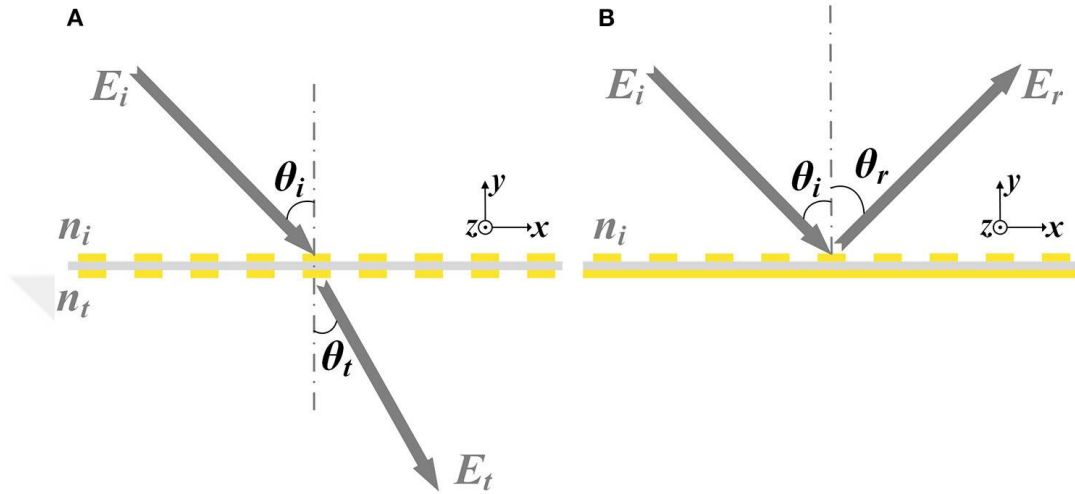
Eşitlik (1.5) ile temsil edilen denklemde, n_t ve n_i (Şekil 1.3.a) sırasıyla yapay yüzeyin üstündeki ve altındaki ortamların kırılma indislerini temsil etmektedir. λ_0 çalışma dalga boyunu ve $\frac{d\varphi}{dx}$ yapay yüzey tarafından sağlanan faz gradyanıdır.

Şekil 1.3(b)'de gösterilen anormal yansıma durumunda ise Eşitlik (1.5),

$$\sin \theta_r - \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi n i} \frac{d\varphi}{dx} \quad (1.6)$$

Eşitlik (1.6) şeklinde değişir. Burada θ_i gelme açısını, θ_r yansıma açısını temsil eder.

θ_t (Şekil 1.3(a)) ise kırılma açısını temsil etmektedir.



Şekil 1.6: Dalgalarda (a) Kırılma durumu, (b) Anormal yansıma durumu [53].

Genelleştirilmiş Snell yasasına dayanarak tasarlanan birçok yapay yüzey [41,42] literatüre kazandırılmıştır.

Bu çalışmada da seri bağlı Helmholtz rezonatörler ile rezonatör parametrelerine bağlı olarak bir faz gradyenti elde etmek için bir dizi benzetim yapılmış ve elde edilen sonuçlara bağlı bir yapay yüzey ile anormal yansıma gerçekleştirilmiştir.

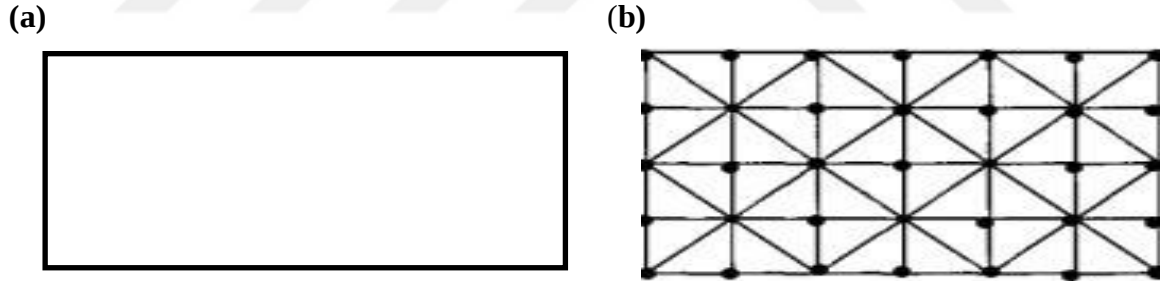
2. MATERYAL VE YÖNTEM

Yapılan benzetim hesaplamalarında Sonlu Elemanlar Metodu ile diferansiyel denklem çözümleri yapabilen COMSOL Multiphysics yazılım paketinin akustik modülü kullanılmıştır.

2.1 Sonlu Elemanlar Metodu (SEM)

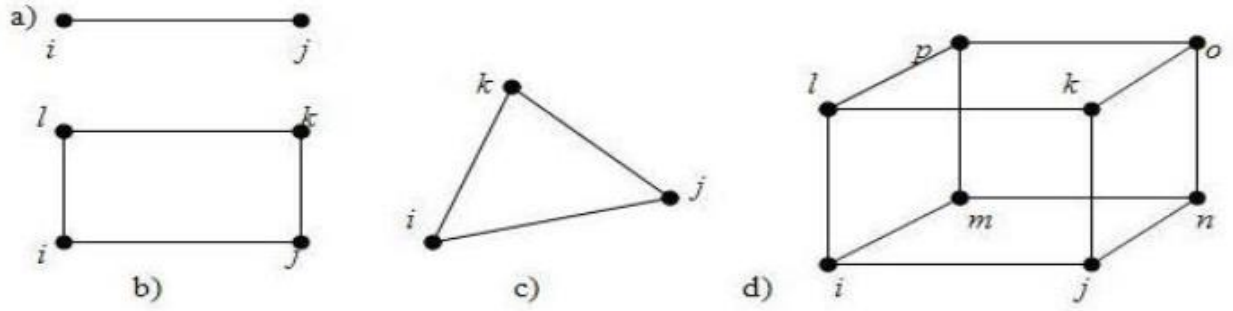
Fizik ve mühendislikteki büyük ve karmaşık problemler zorlu diferansiyel denklemler ile ifade edilirler. Bu denklemler ile tüm alanı analitik olarak çözmek yerine problemleri, elemanlar veya sonlu elemanlar adı verilen küçük parçalara bölerek, çözülmesi daha kolay olan cebirsel denklem sistemlerine dönüştürüp, sayısal analizler yapan yöntemle Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) denir [54].

SEM ile çözümlenen alanda küçük parçalardan oluşan ve birbirlerine düğüm adı verilen noktalarla (Şekil 2.1(b)) bağlı birçok sonlu eleman bulunmaktadır [55]. Oluşturulan yapıya ‘sonlu elemanlar ağı’ veya ‘ızgara’ adı verilmektedir.



Şekil 2.1: SEM ile çözümlenen (a) Problem alanı (b) Izgara ve düğüm noktalarının gösterimi.

Bir, iki ve üç boyuttaki hesaplama alanları için kullanılan ızgara yöntemi Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2: (a) Bir boyutta, (b) İki boyutta dörtgensel, (c) İki boyutta üçgensel (d) Üç boyutta altı yüzlü ızgara biçimi [56].

Sonlu elemanların herbiri bir diferansiyel denklem ile çözülmek üzere bir araya getirilmiştir [57]. Hesaplama yapılan alanda ne kadar çok ızgara ve düğüm varsa doğru sonuca o kadar yaklaşılr. Düğüm sayısı kadar bilinmeyen vardır. Dolayısıyla birçok denklemin aynı anda çözümlenmesi gerekir. SEM bu kısmi diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümlerini sayısal olarak veren bir yöntemdir.

2.2 COMSOL Multiphysics Yazılım Paketi

COMSOL Multiphysics (CM), mühendislik ve temel bilimlerde gerçekte gözlemlenen bir durumun bilgisayar ortamında benzetilerek simülasyonunu hazırlamak için kullanılan bir yazılım paketidir.

CM ile başka bir kod yazmaya, program kullanmaya veya denklem yazmaya gerek kalmadan kısmi diferansiyel denklemlerle tanımlanan birçok problem model olarak tasarlanabilir. Kullanılacak fiziksel veya kimyasal ortamlar belirlenebilir ve çeşitli materyal seçimleri yapılarak hesaplama alanları oluşturulabilir [58]. Hesaplama alanlarında SEM ile ızgaralama yöntemi kullanılarak kısmi diferansiyel denklemlerin sayısal ve görsel olarak yaklaşık çözümleri elde edilir. CM ile tek bir simülasyon hazırlanarak farklı fiziksel problemlerin çözümü aynı anda hesaplanabilir [59].

Mühendislik ve fizikte CM kullanılarak kısmi diferansiyel denklemlerinin çözümü yapılabilen; akustik, optik, ısı transferi, fotonik, kuantum mekaniği, difüzyon, elektrokimya ve jeofizik gibi birçok uygulama alanı vardır.

CM'de matematiksel hesaplamaların yapılabilmesi için gerekli birçok çözüm modülü vardır. Bunlar:

- AC/DC Modülü

- Akustik Modülü
- Optik Modülü
- Korozyon Modülü
- Yapısal Mekanik Modülü
- Isı Transfer Modülü vb.'dir.

Yapılan benzetim hesaplamalarında COMSOL Multiphysics yazılım paketinin akustik modülü kullanılmıştır.

2.3 Akustik modülü

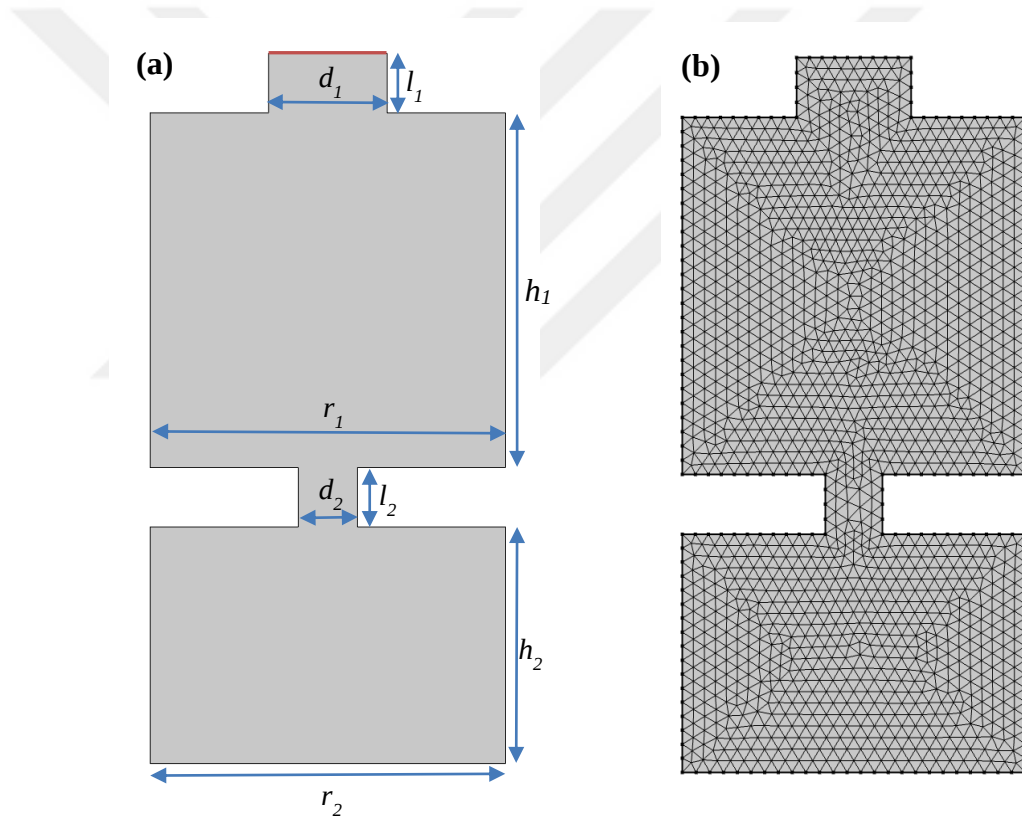
Hava-katı gibi akustik empedansları birbirinden merteye olarak farklı malzemeler içeren problemlerde akustik dalga'nın tüm ortamlarda boyuna dalga olarak ilerlediği varsayımı tercih edilen bir yaklaşımdır. Bu durumda katı malzemeleri akustik dalga için sadece saçıcı olarak değerlendirmek mümkündür. Hatta hava-katı sınırlarının yansıtıcı olarak tanımlanması ve katı alanların hesaplamadan çıkarılması yaklaşımı yapılabilir. COMSOL Multiphysics akustik modülünde sinüzoidal basınç alanı Eşitlik (1.2) ile verilen doğrusal dalga denklemi çözülerek hesaplama alanı içerisindeki düğüm noktalarında basınç alanı belirlenebilir.

2.4 Rezonatör Geometrilere ve Comsol Modelleri

Yapılan tasarımlar ve hesaplamaların tamamı yüksek hafıza ve işlemci hızı gereksiniminden kaçınmak ve hesaplama sürelerini düşük tutabilmek için iki boyutta yapılmıştır. Tasarlanan ikili rezonatörlerin geometrisi Şekil 2.3(a)'da verilmiştir. Burada indisler sırasıyla birinci ve ikinci rezonatörleri temsil etmek üzere, h rezonatör yüksekliğini, r rezonatör genişliğini, l boyun yüksekliğini ve d ise boyun genişliğini temsil etmektedir. Oluşturulan modellerin tamamı COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak, Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) benzetimleri ile sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Geometride üstteki rezonatörün boyun bölgesinde kırmızı ile belirtilen sınır açıklık olarak alınmış olup buradaki basınç değeri 1 paskala eşitlenmiştir. Bunun dışında kalan diğer tüm sınırlar ise yansıtıcı sınır koşulu olarak seçilmiştir. Hesaplama alanı içindeki tüm bölgeler hava olarak belirlenmiş olup gerekli yoğunluk ve ses hızı değerleri sırasıyla $\rho_0 = 1.2 \text{ kg/m}^3$ ve $c_0 = 343 \text{ m/s}$ olarak alınmıştır.

Hesaplamalarda kullanılan ızgaralandırma işleminde seçilen ızgara büyüklükleri geometriye oranla çok küçük seçilerek tüm geometrinin mümkün olduğunca en iyi şekilde modellenmesi sağlanmıştır. Bunlara bir örnek Şekil 2.3(b)'de görülmektedir. Frekans uzayında yapılan hesaplamalarda ise bir dalga boyuna en az 10 düğüm noktası sığacak şekilde ızgaralandırma yapılmıştır.

Yapıların birinci ve ikinci rezonans frekanslarının tespitinde çözücü olarak özfrekans çözücüsü kullanılmış ve bulunan sonuçlar içerisinde gerçek kısmı büyük olan ilk iki öz frekans seçilmiştir.



Şekil 2.3: İkili Helmholtz rezonatör geometrisi. (a) Parametreler, (b) Örnek ızgaralama.

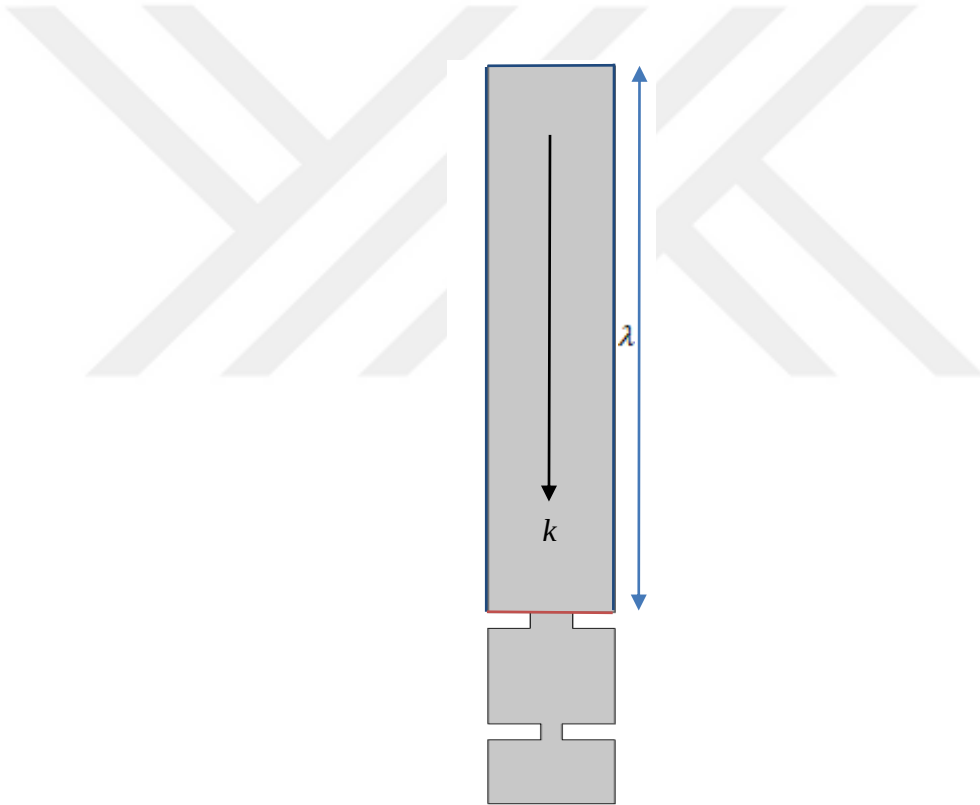
Frekans uzayındaki kararlı hal çözümlerinde, öncelikle faz gecikmesi hesaplamaları yapılmıştır. Kullanılan geometri Şekil 2.4'te verilmektedir. Rezonatöre doğru gelen akustik dalgayı ve geriye saçılan dalgaları belirleyebilmek için rezonatörün üzerinde bir hesaplama alanına daha ihtiyaç vardır. En az bir tam dalganın sığabilmesi için bu bölgenin yüksekliği gelen dalganın dalga boyu kadar alınmıştır. Genişliği ise üstteki rezonatörün genişliğine

eşittir. Gelen dalga vektörü aşağı doğru olacak şekilde sonradan eklenen alan içinde bir arka plan radyasyon alanı tanımlanmıştır. Şekilde koyu mavi ile işaretlenmiş sınırlar soğurgan sınır koşulu olarak seçilmiştir. Rezonatör kısmındaki tüm sınırlar ise yansıtıcı sınır koşuludur. Kırmızı ile işaretlenen çizgi boyunca ise ortalama faz değeri hesaplanmıştır.

Faz değerini hesaplamak için p_s saçılan dalgayı temsil etmek üzere

$$\tan^{-1} \frac{\text{komplex}(p_s)}{\text{gerçek}(p_s)} \quad (2.1)$$

ifadesi π sayısına normalize edilerek kullanılmıştır.

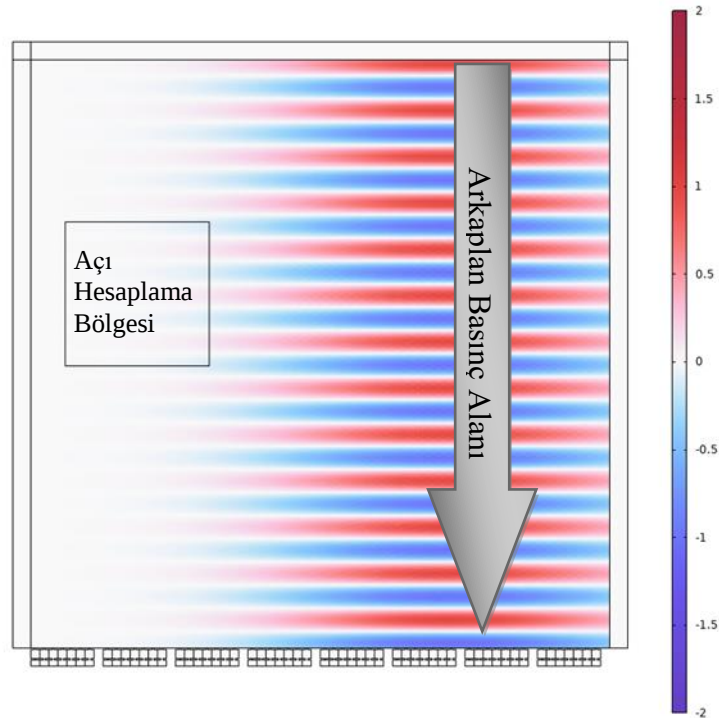


Şekil 2.4: Faz hesaplamalarında kullanılan rezonatör ve hava bölgesi geometrisi.

Oluşturulması planlanan yapay yüzeydeki dizi elemanlarının gelen dalga tarafındaki rezonatör parametreleri hep sabit tutulmuştur. Bunun sebebi gelen dalganın yapay yüzeyin her yerinde benzer bir yüzeyle karşılaşmasını sağlayarak farklı saçılma bileşenlerinin önüne geçmektir. Bu sayede gelen dalga hep aynı periyodikliği görmesine karşın farklı faz değerlerinde saçılmasını sağlamak amaçlanmıştır.

Yapılan son analizler ise yapay yüzeye gelen dalganın saçılma açısını belirlemek için gerçekleştirilen modellerdir. Bu modellerde yine frekans uzayında kararlı hal çözümleri ile simülasyonlar yapılmıştır. Şekil 2.5'te örnek bir hesaplama alanı görülmektedir. Burada en alta faz eğimi oluşturacak olan yapay yüzey görülmektedir. Gelen dalgayı temsil etmek üzere geometrinin sol tarafında x ekseninde Gaussian bir dağılıma sahip arka plan basınç alanı oluşturulmuştur. Dalga vektörünün yönü ise $-y$ 'dir. Gaussian dağılımın yarı genişliği ise üç adet yapay yüzey dizisi kadar seçilmiştir. Yansıyan dalganın görülebilmesi ve yansıma açısının hesaplanabilmesi için hesaplama alanı geniş tutulmuş ve kare şekilli bir bölge üzerinden açı belirlenmiştir. Açığı belirleyebilmek için açı hesaplama bölgesi üzerindeki her düğüm noktasında $\left| \text{atan} \left(\frac{v_{sx}}{v_{sy}} \right) \right|$ değeri hesaplanıp ortalamaları alınmıştır. Burada v_{sx} ve v_{sy} saçılan dalganın x ve y yönlerindeki parçacık hızlarını temsil etmektedir.

Hesaplama alanının sol, sağ ve üst kenarlarındaki dikdörtgen şekilli bölgeler ise ölçme hatasını küçültebilmek için tanımlanan mükemmel soğurucu katmanlardır (Perfectly-matched layers, PML) [60]. Bu katmanlar sayesinde sınırlara ulaşan dalgalar tekrar yansımaya hesaplama alanının sonsuz büyüklükteymiş gibi davranmasını sağlamaktadırlar.



Şekil 2.5: Yansıma açısı hesaplamalarında kullanılan geometri ve arka plan basınç alanı.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Öncelikle yapılan hesaplamalar ikinci rezonatörün geometrik parametrelerine göre rezonans frekansındaki değişimin belirlenmesi şeklindedir. Bu hesaplamalar iki farklı şekilde yapılmıştır. Rezonatör yükseklik ve genişliği sabit tutularak boğaz parametreleri değiştirilmiş, daha sonra ise boğaz parametreleri sabit tutulup rezonatörün yükseklik ve genişliğine bağlı rezonans frekansları elde edilmiştir.

İkinci aşamada ise rezonans frekansı hesaplamaları sonucunda seçilen bir frekans değerindeki geometrinin civarında yine geometrik parametrelere bağlı faz hesaplamaları iki aşamalı olarak yapılmıştır.

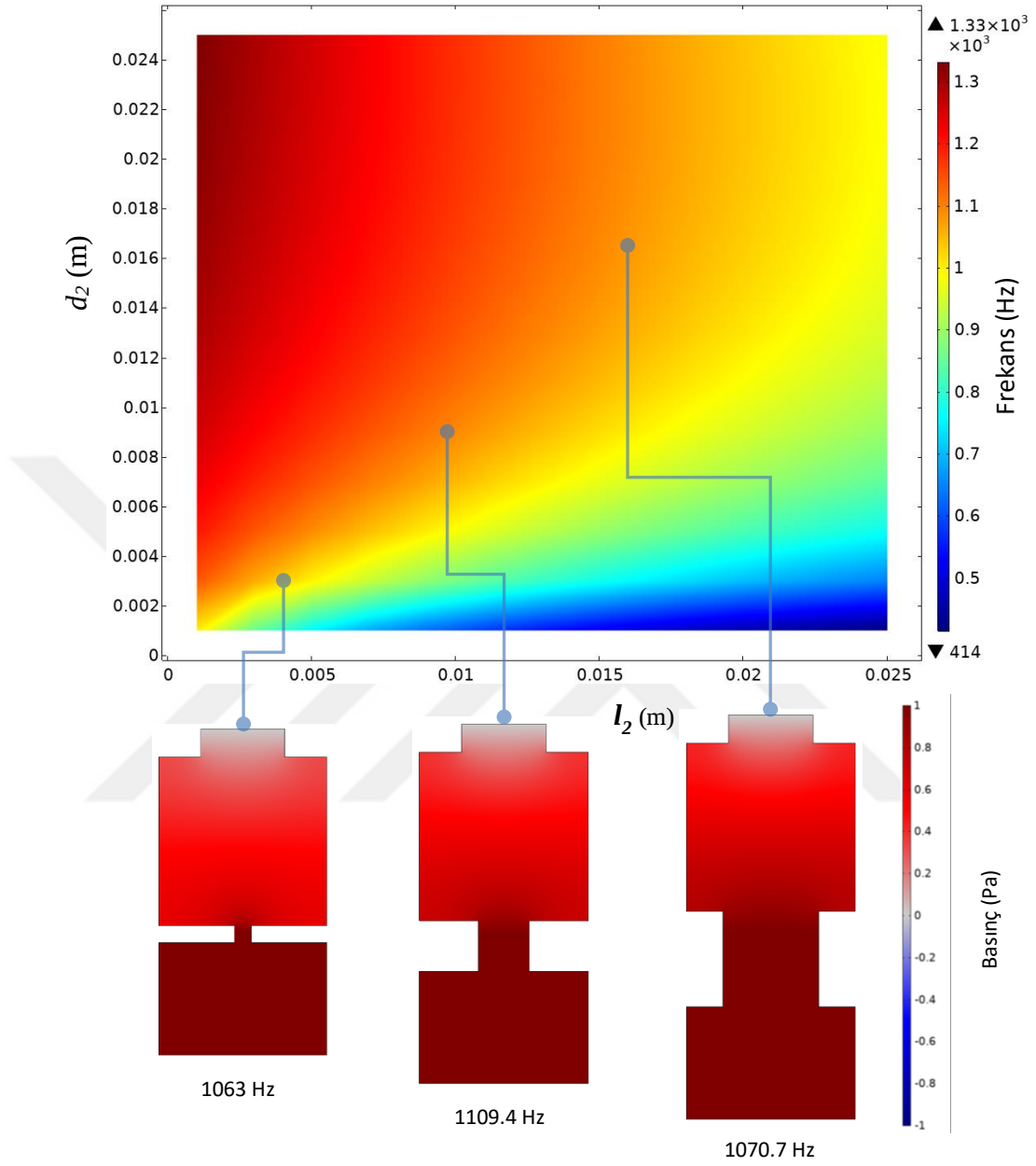
3.1 Rezonans Frekansı Sonuçları

Birinci rezonatör parametreleri tüm hesaplamalar boyunca $h_1=3$ cm, $r_1=3$ cm, $d_1=1.5$ cm ve $l_1=1$ cm olarak sabit seçilmiştir. Burada boyun genişliği toplam rezonatör genişliğinin yarısı kadar seçilerek gelen dalganın gördüğü yüzeyin yarısının yansıtıcı yarısının ise açıklık olması sağlanmıştır.

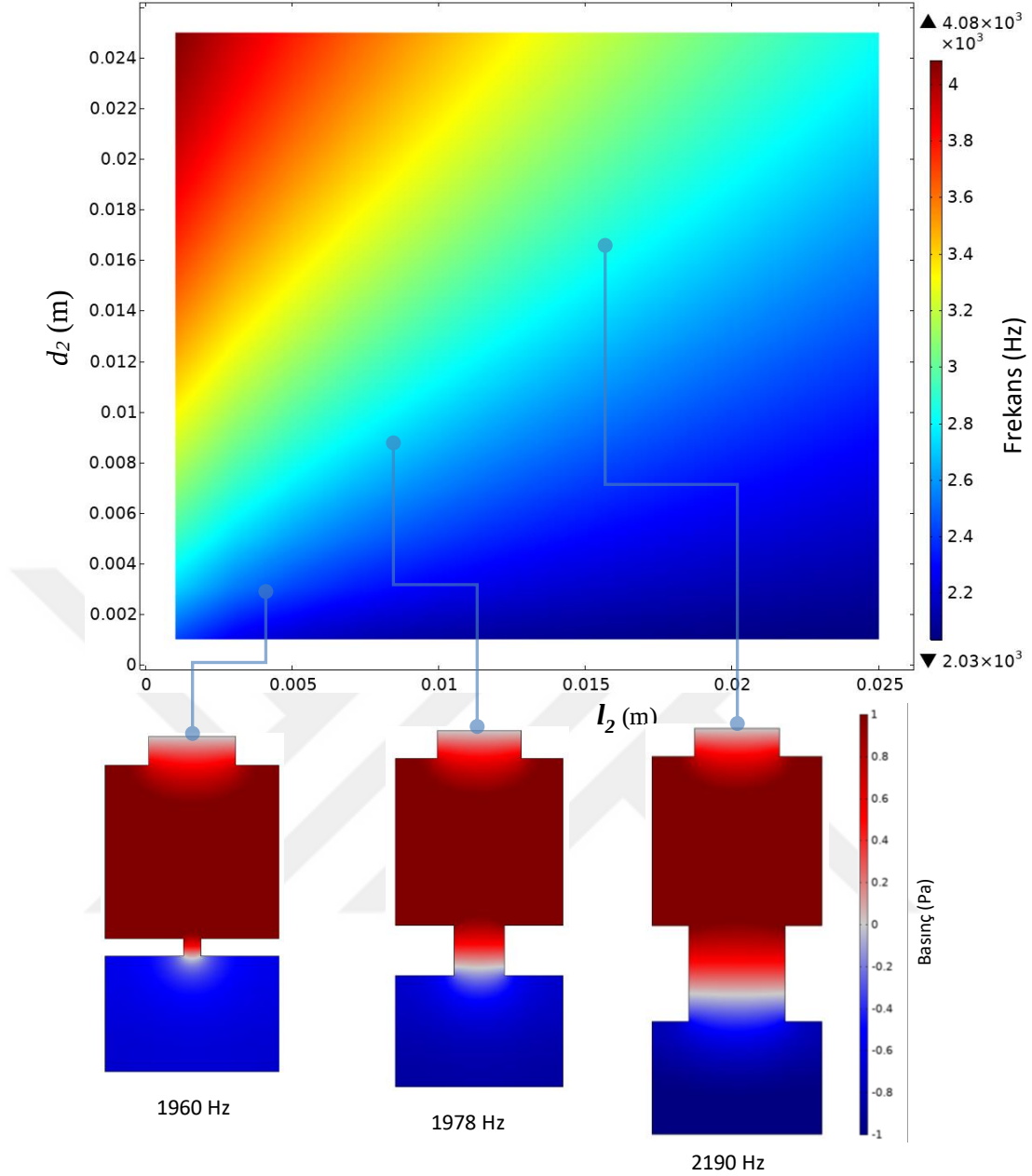
Rezonans frekansı belirleme hesaplamalarında ikinci rezonatörün yükseklik ve genişliği $h_2=2$ cm ve $r_2=3$ cm değerlerinde sabit tutulmuştur. Boyun parametreleri olan d_2 ve l_2 ise 0.1 cm'den başlayarak 0.2 cm adım ile 2.6 cm'ye kadar değiştirilerek ilk iki rezonans frekansı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen birinci rezonans frekansı değişimi Şekil 3.1'de ikinci rezonans frekansı değişimi ise Şekil 3.2'de verilmektedir. Şekil içindeki basınç değerleri ise belirtilen geometrilerdeki mod şekillenimini temsil etmektedir.

Şekil 3.1 incelendiğinde, belirlenen geometrik aralıkta elde edilen birinci rezonans frekansının 414 Hz ile 1330 Hz arasında değiştiği görülmektedir. Boyun yüksekliğindeki (l_2) artışın birinci rezonans frekansında azalmaya sebep olduğu ve boyun genişliğindeki (d_2) artışın ise birinci rezonans frekansında artışa sebep olduğu açıkça görülmektedir. Boyun parametrelerine bağlı bu değişimlerin aynı oranda olmayıp nispeten d_2 parametresine bağlı değişimin daha hızlı olduğu söylenebilir. Köşegen üzerinde seçilmiş noktalarda alınan modların frekanslarındaki değişim bu doğrusal olmayışı açıkça göstermektedir.

Buna rağmen boyun parametrelerine bağlı olarak ikinci rezonans frekansındaki değişimin 2030 Hz ile 4080 Hz arasında olup daha doğrusal ve eşit oranlı olarak bir değişime sahip olduğu söylenebilir (Şekil 3.2).



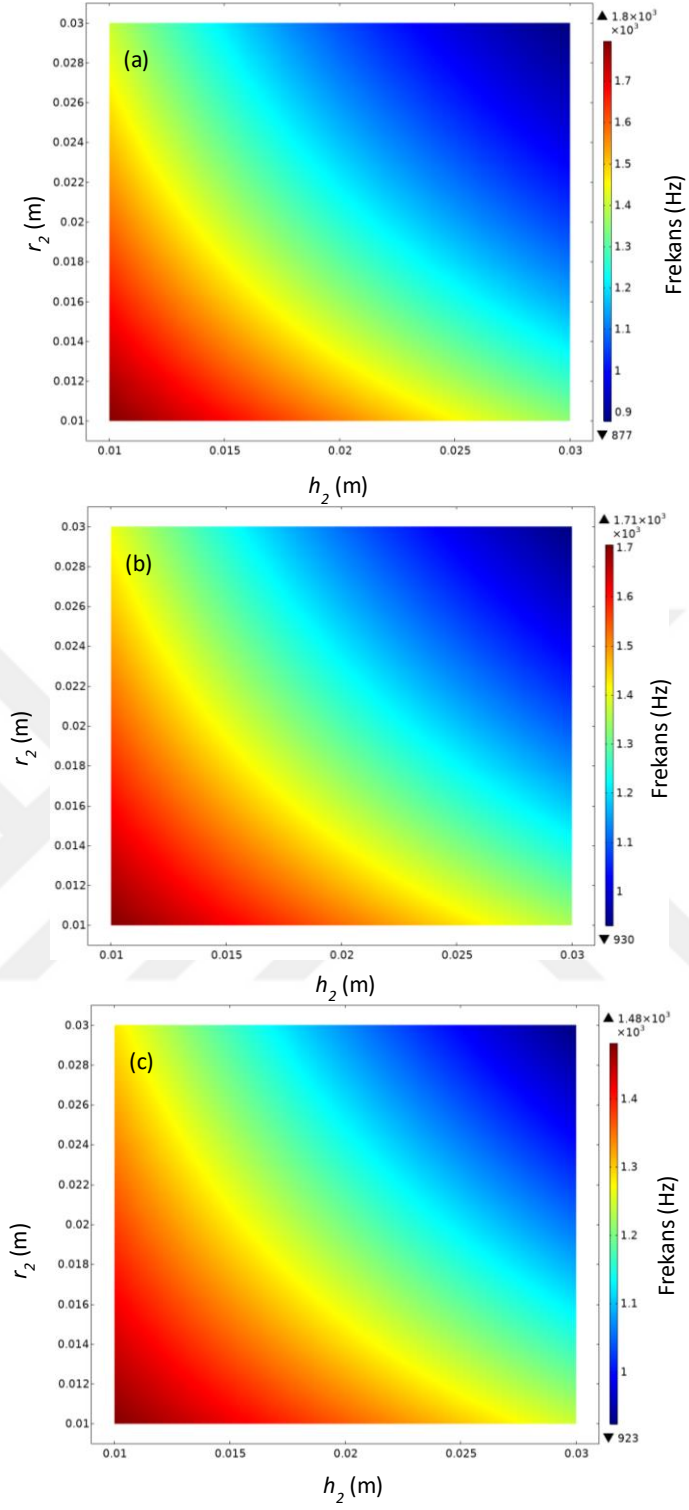
Şekil 3.1: Boyun parametrelerine bağlı (d_2 ve l_2) birinci rezonans frekansı değişimi.



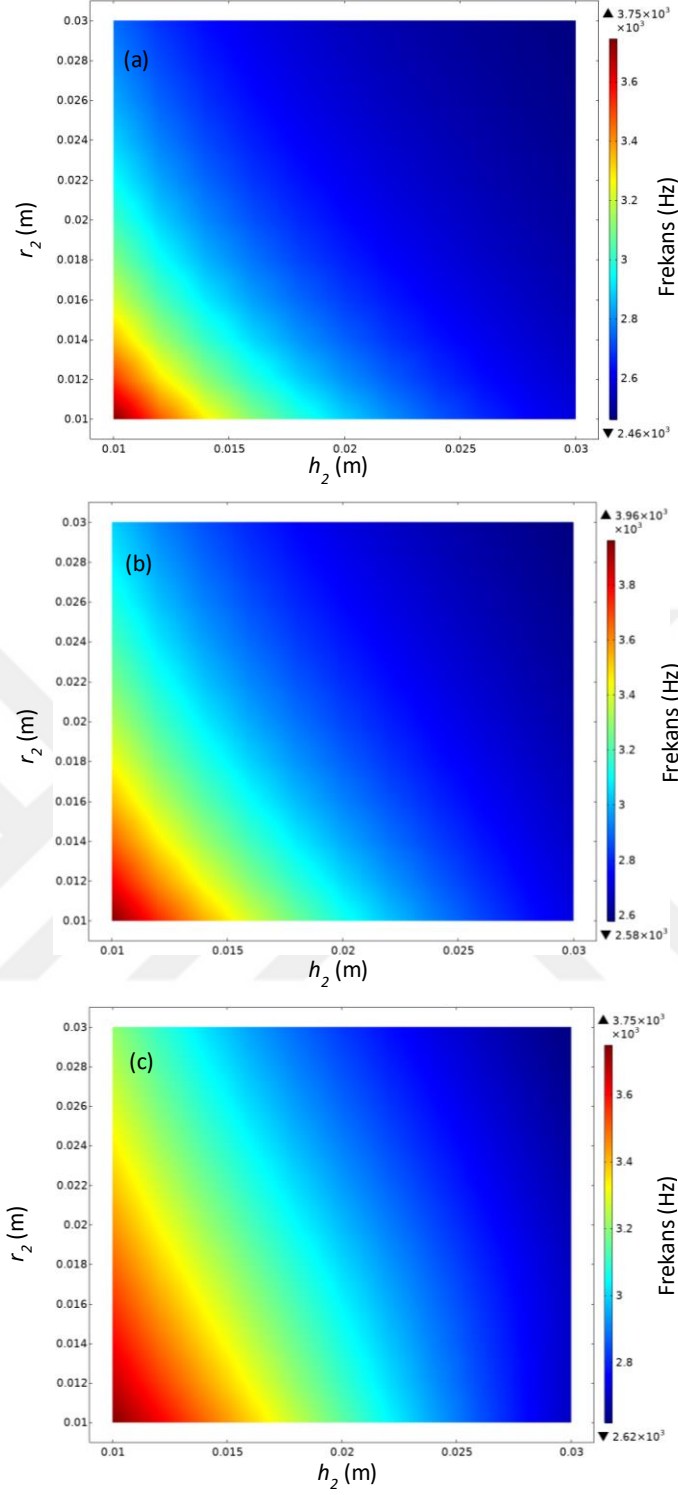
Şekil 3.2: Boyun parametrelerine bağlı (d_2 ve l_2) ikinci rezonans frekansı değişimi.

Boyun parametrelerini sabit tutarak rezonatörün yükseklik ve genişliğine (h_2 ve r_2) bağlı taramalar ise üç aşamada yapılmıştır. Boyun parametreleri sırasıyla $d_2 = l_2 = 0.3$ cm, $d_2 = l_2 = 0.9$ cm ve $d_2 = l_2 = 1.7$ cm değerlerinde sabitlenmiş ve yükseklik ve genişlik değerleri 1 cm ile 3 cm arasında 0.2 cm adımla değiştirilerek birinci ve ikinci rezonans frekansları belirlenmiştir. Şekil 3.3'te birinci rezonans frekansı değişimi görülmektedir.

Yükseklik ve genişlik artışıyla rezonans frekansının düzgün olarak azaldığı gözlenmekle birlikte boyun parametrelerinin artışının ana davranışı çok fazla değiştirmeden frekans aralığında bir daralmaya sebep olduğu söylenebilir.



Şekil 3.3: Rezonatör yüksekliği ve genişliğine bağlı birinci rezonans frekansı değişimi. Boyun parametreleri (a) $d_2 = l_2 = 0.3$ cm, (b) $d_2 = l_2 = 0.9$ cm ve (c) $d_2 = l_2 = 1.7$ cm.



Şekil 3.4: Rezonatör yüksekliği ve genişliğine bağlı ikinci rezonans frekansı değişimi. Boyun parametreleri (a) $d_2 = l_2 = 0.3$ cm, (b) $d_2 = l_2 = 0.9$ cm ve (c) $d_2 = l_2 = 1.7$ cm.

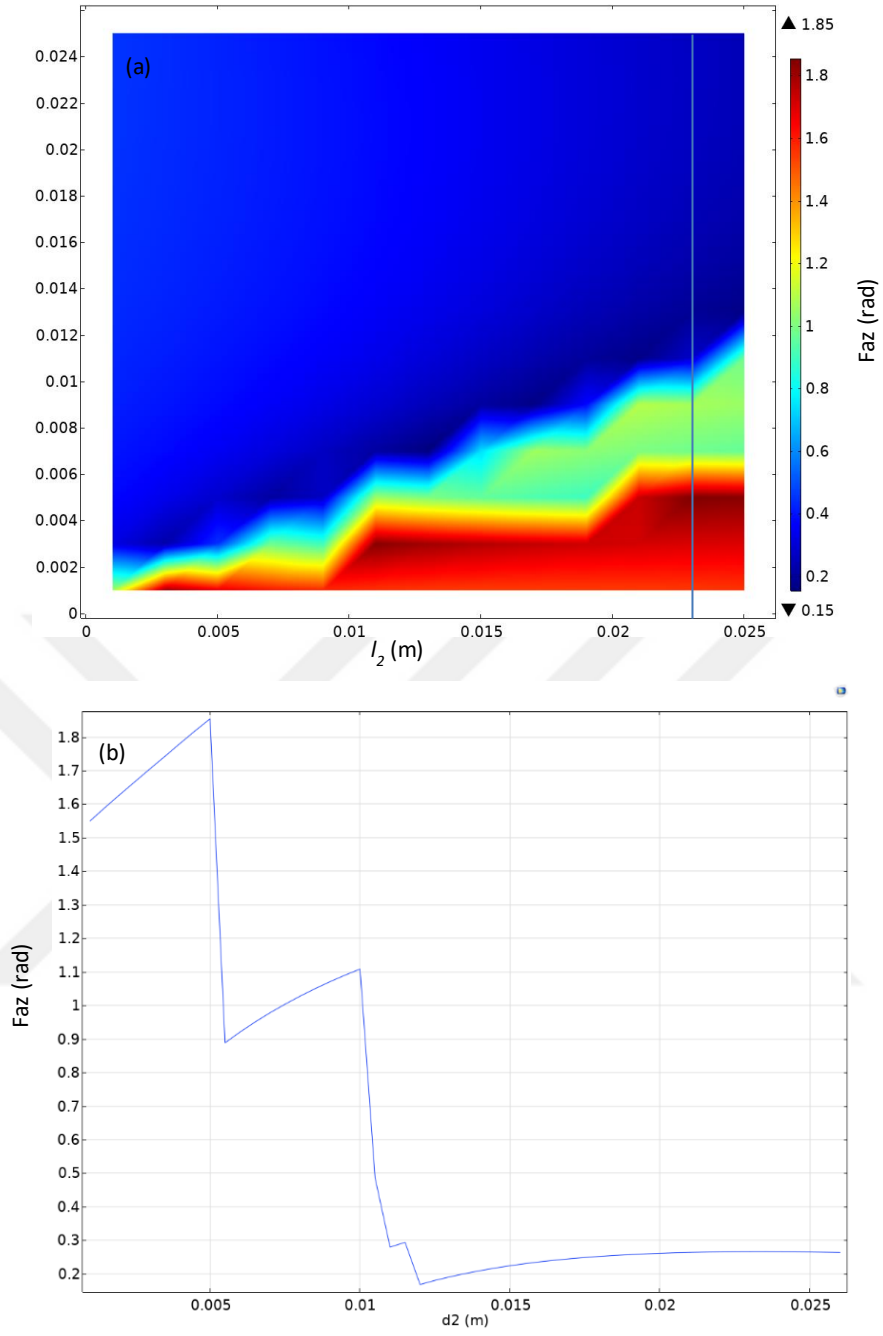
İkinci rezonans frekansı ise yükseklik ve genişlik artışına bağlı olarak çok hızlı ve orantılı bir şekilde düşmektedir. Boyun parametrelerinin artışı ile bu değişim genişliğe bağlı olarak azalmaktadır (Şekil 3.4).

3.2 Faz Taraması Sonuçları

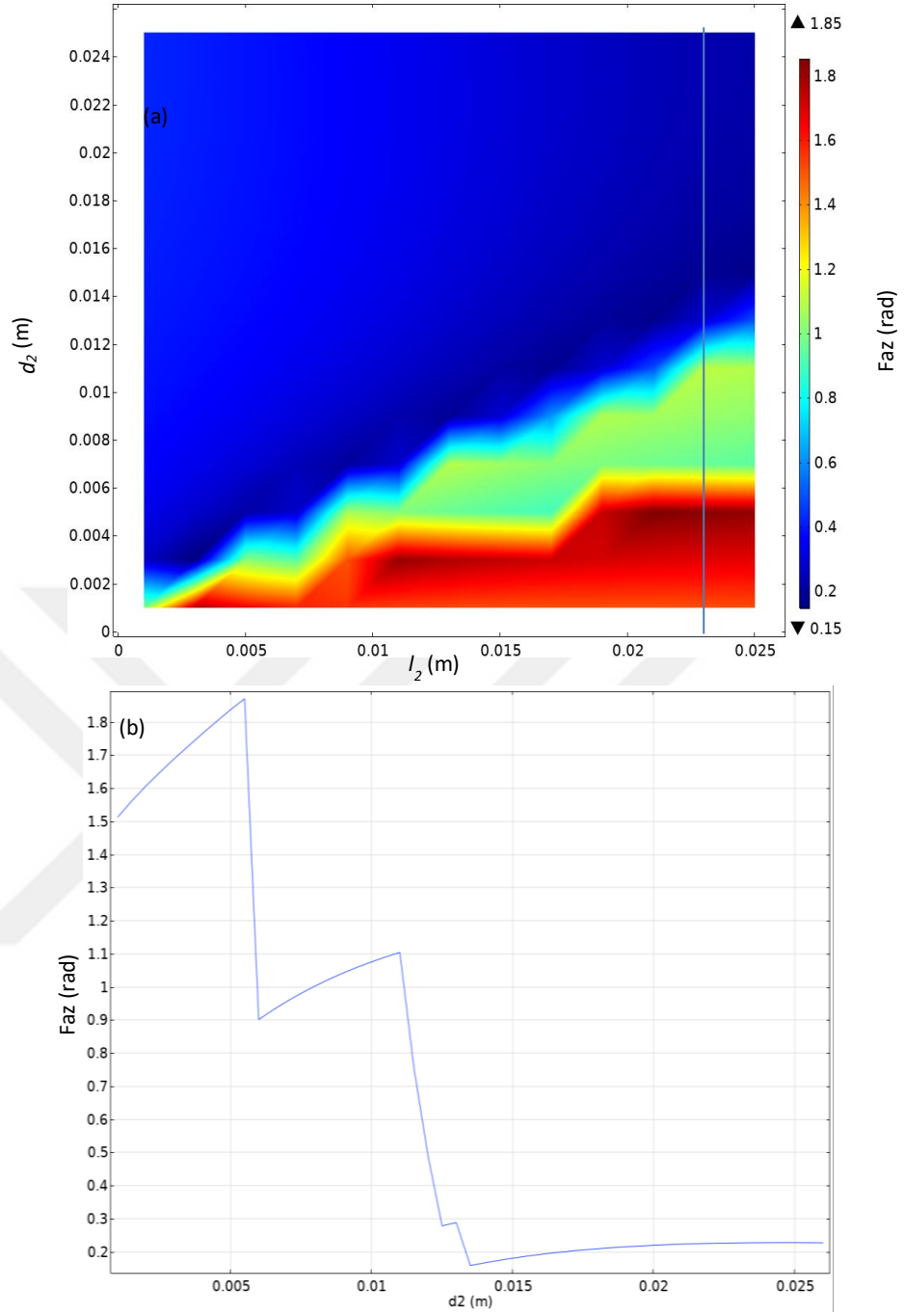
Bir önceki kısımda geometri parametrelerine bağlı rezonans frekansı belirlemekte kullanılan sistematik bu kısımda da kullanılmıştır. Boyun parametrelerine bağlı olarak faz değişimini hesaplamak için yine ikinci rezonatörün yükseklik ve genişlik parametreleri $h_2=2$ cm ve $r_2=3$ cm olarak sabitlenmiştir. Boyun parametreleri d_2 ve l_2 ise 0.1 cm den başlayıp 0.2 cm adım ile 2.6 cm'ye kadar arttırılarak faz taraması yapılmıştır. Bu hesaplamalar altı ayrı frekans için gerçekleştirilmiştir. Frekans seçimleri ise Şekil 3.1 ve 3.2 de şekil içinde mod şekillenimleri verilen frekanslar için yapılmıştır.

Birinci rezonans frekansları için yapılan faz taraması sonuçları incelendiğinde (Şekil 3.5, 3.6 ve 3.7(a)) boğaz parametrelerine bağlı faz değişiminin 0.15 ile 1.85 radyan arasında olduğu görülmektedir. Ancak boyun yüksekliğinin (l_2) arttığı bölgelerde değişimin daha düzgün ve belirgin olduğu görülmektedir. Bu yüzden $l_2=2.3$ cm de alınan kesit üzerindeki fazın d_2 'ye bağlı olarak değişimleri Şekil 3.5, 3.6 ve 3.7(b)'de yer alan grafiklerde ayrı olarak çizdirilmiştir. Bu grafiklerden de anlaşılabileceği üzere her ne kadar basamaklı bir değişim olsa da bu değişimin yaklaşık olarak 0 ile 2π radyan arasında olduğu ve istenilen yansıma açısında bir seri geometri üreteceği ve yapay yüzey tasarımında kullanılabileceği söylenebilir.

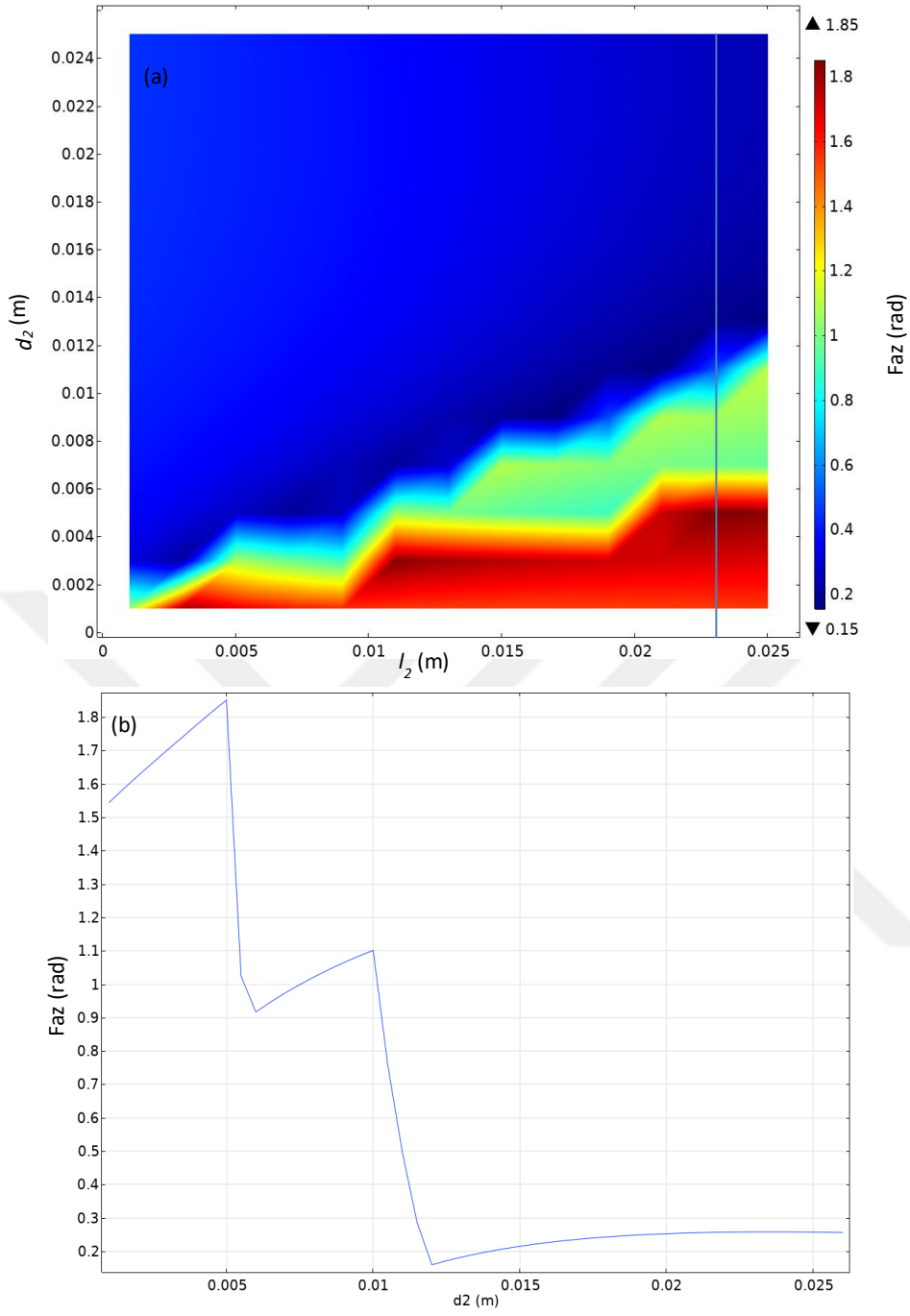
İkinci rezonans frekansları için yapılan faz taraması sonuçları incelendiğinde ise (Şekil 3.8, 3.9 ve 3.10(a)) boğaz parametrelerine bağlı faz değişiminin 0.7 ile 1.97 radyan arasında olduğu görülmektedir. Bu değişim amaçlanan $0-2\pi$ arasındaki değişime çok yakındır. Ayrıca $l_2=0.5$ cm de alınan kesit üzerindeki grafiklerin de (Şekil 3.8, 3.9 ve 3.10(b)) bu faz değişimini oldukça düzgün olarak yansıttığı ve istenilen faz değerine sahip geometriye sadece d_2 'yi değiştirerek ulaşmanın mümkün olduğunu göstermektedir.



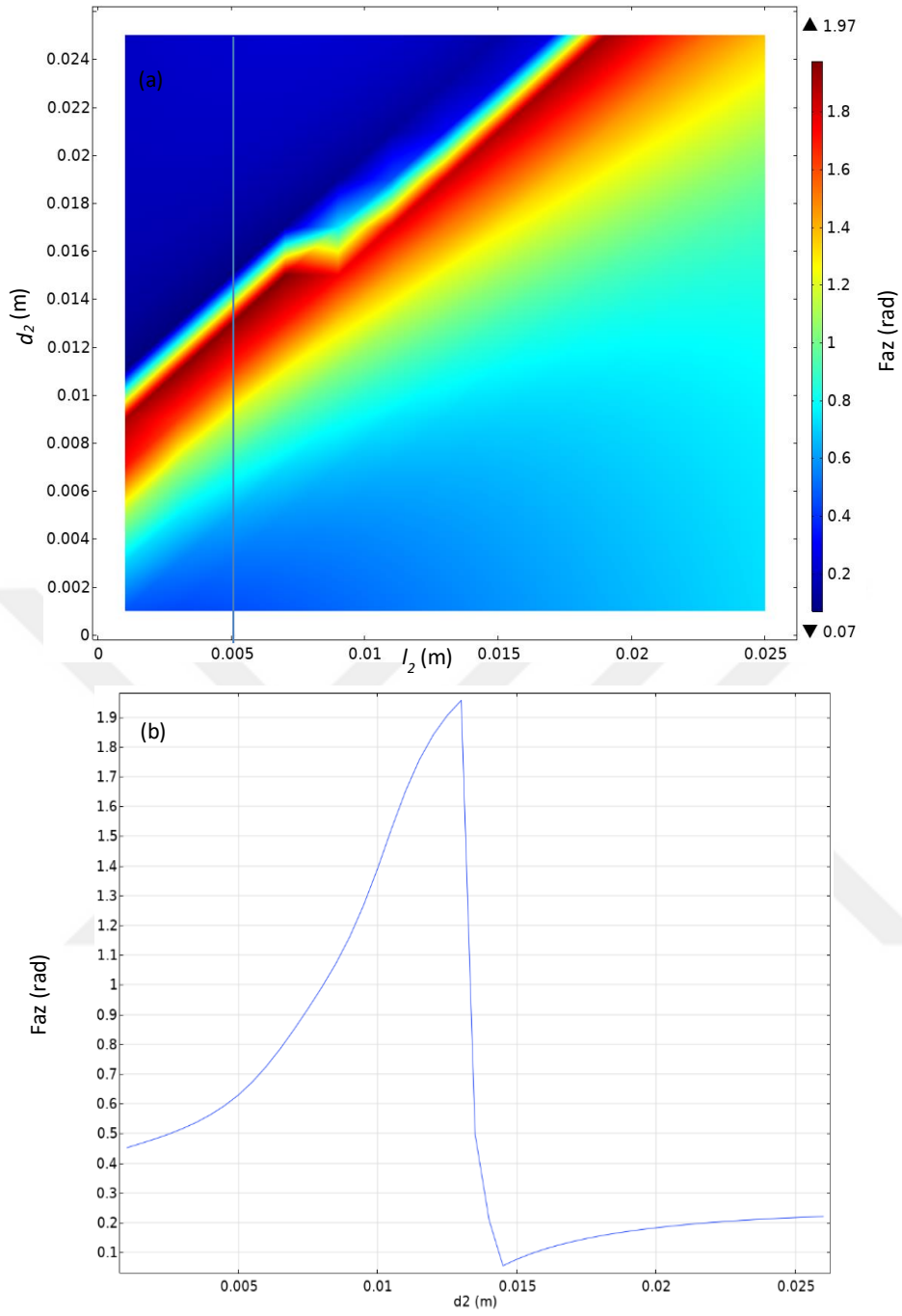
Şekil 3.5: $f=1063$ Hz için (a) Boğaz parametrelerine bağlı faz değişimi, (b) $l_2=2.3$ cm için d_2 'ye bağlı faz değişimi.



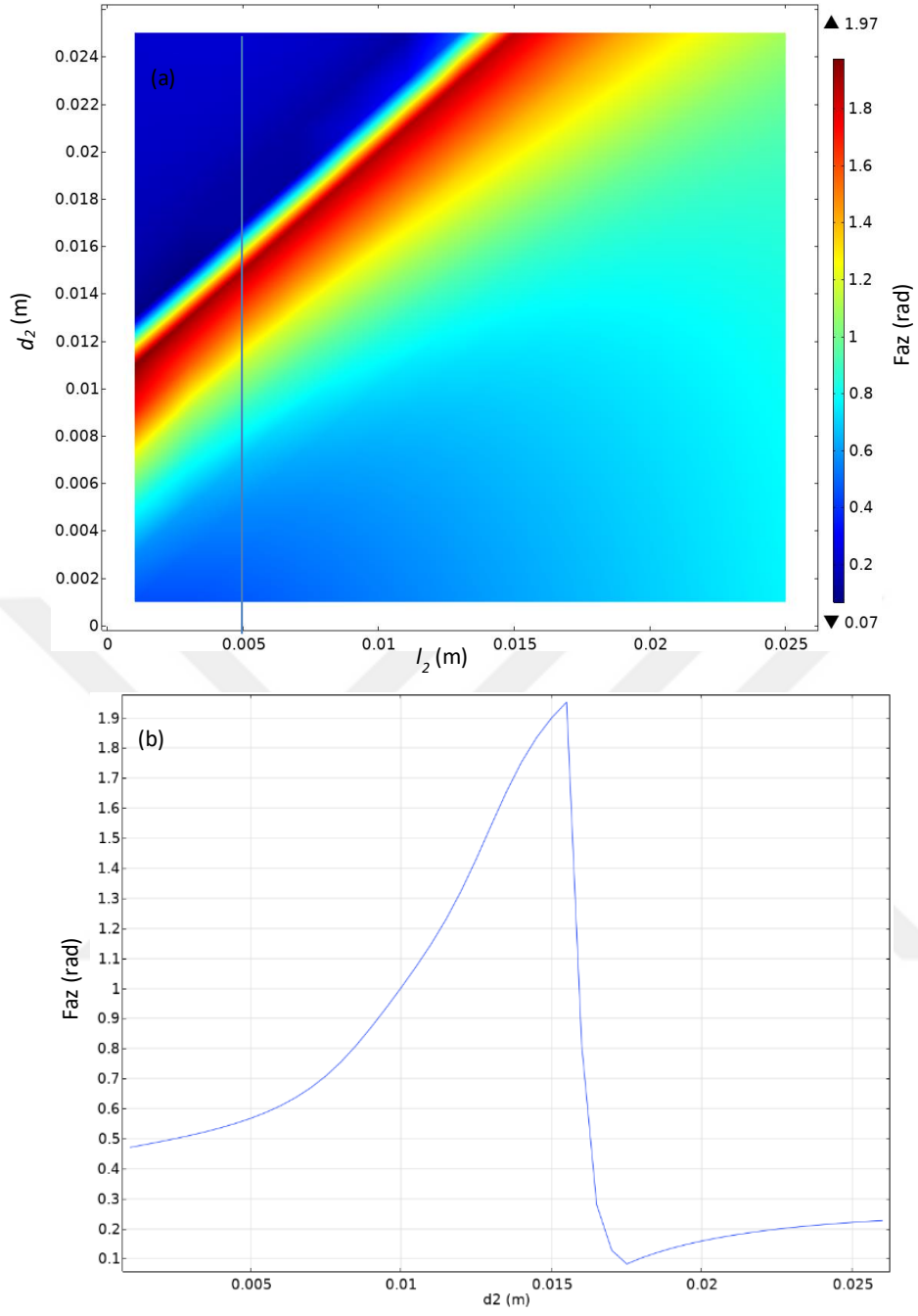
Şekil 3.6: $f=1109$ Hz için faz (a) Boğaz parametrelerine bağlı faz değişimi, (b) $l_2=2.3$ cm için d_2 'ye bağlı faz değişimi.



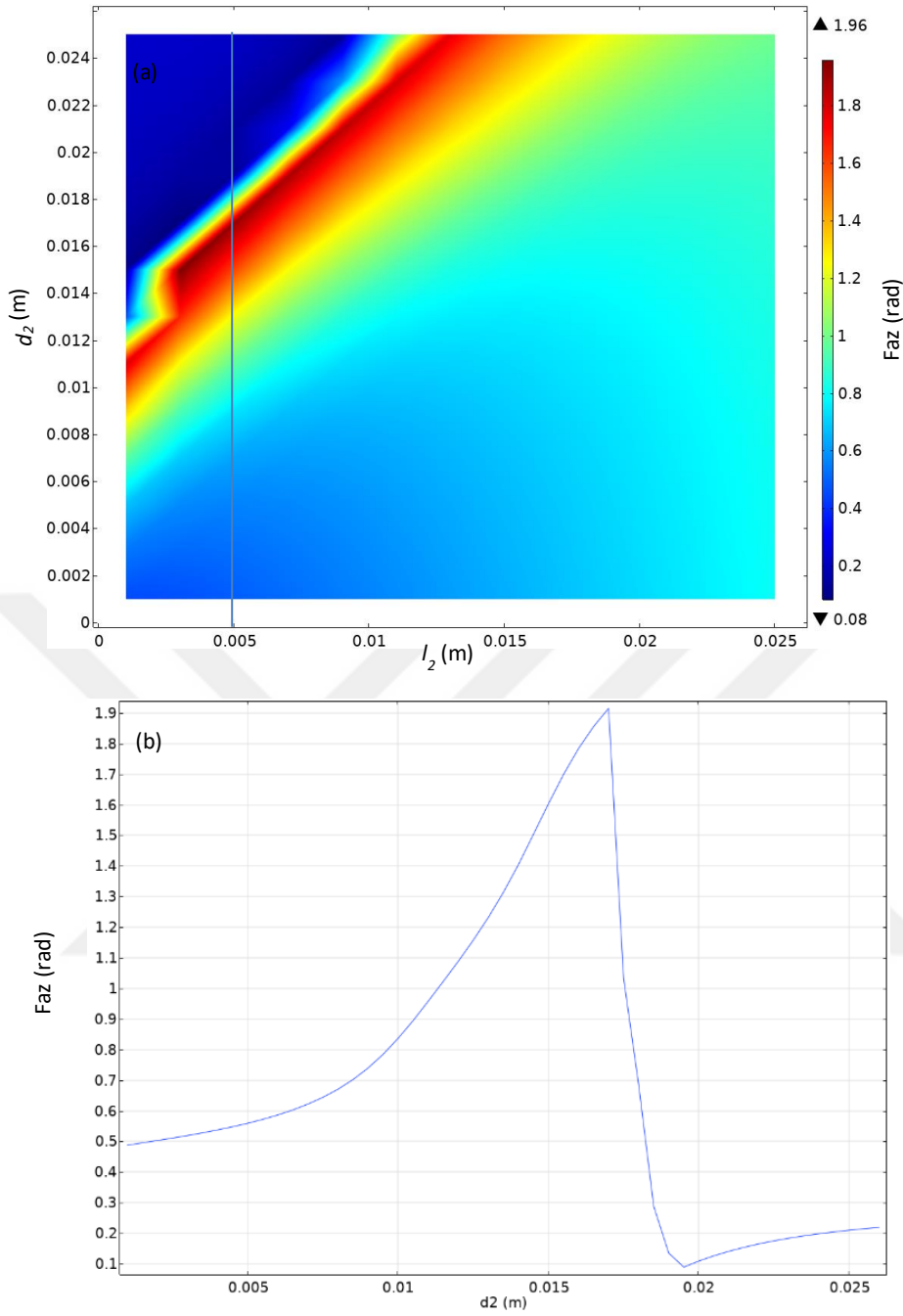
Şekil 3.7: $f=1071$ Hz için faz (a) Boğaz parametrelerine bağlı faz değişimi, (b) $l_2=2.3$ cm için d_2 'ye bağlı faz değişimi.



Şekil 3.8: $f=1960$ Hz için faz (a) Boğaz parametrelerine bağlı faz değişimi, (b) $l_2=0.5$ cm için d_2 'ye bağlı faz değişimi.



Şekil 3.9: $f=1978$ Hz için faz (a) Boğaz parametrelerine bağlı faz değişimi, (b) $l_2=0.5$ cm için d_2 'ye bağlı faz değişimi.



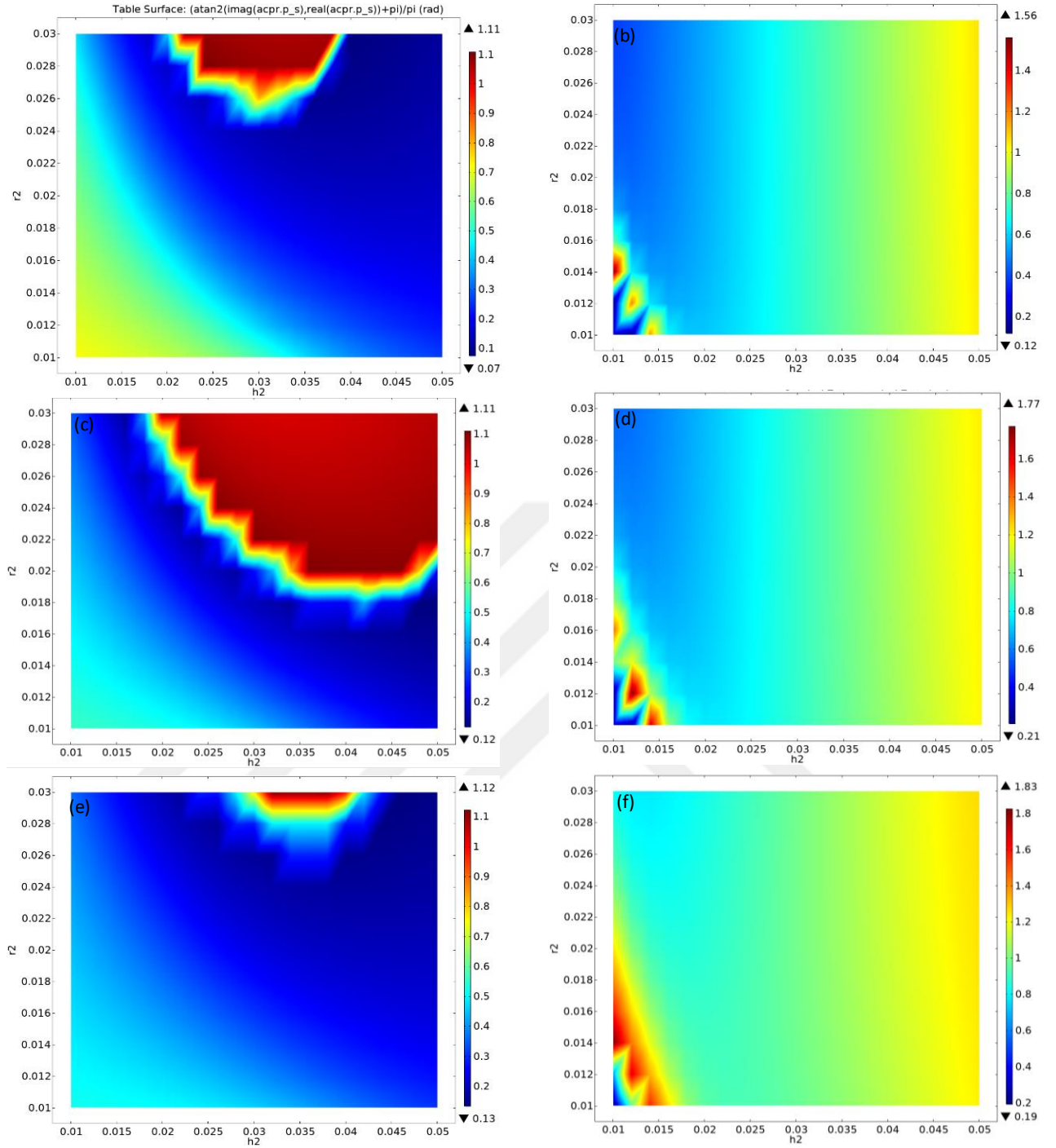
Şekil 3.10: $f=2190$ Hz için faz (a) Boğaz parametrelerine bağlı faz değişimi, (b) $l_2=0.5$ cm için d_2 'ye bağlı faz değişimi.

İkinci rezonatörün yükseklik ve genişliğine (h_2 ve r_2) bağlı faz hesaplamalarında da rezonans frekansı hesaplamaları taramalarında kullanılan yöntem kullanılmıştır. Yani üç farklı sabit boyun parametrelerine ($d_2 = l_2 = 0.3$ cm, $d_2 = l_2 = 0.9$ cm ve $d_2 = l_2 = 1.7$ cm) karşın hacimsel parametrelere bağlı olarak birinci ve ikinci rezonans frekanslarındaki faz değişimleri hesaplanmıştır. Birinci ve ikinci rezonans frekansı hesaplarında elde edilen

frekans aralıklarının orta noktaları kullanılmıştır. Hacimsel parametreler de ise yükseklik 1cm ile 5 cm arasında 0.2 cm adımla, genişlik 1 cm ile 3 cm arasında 0.2 cm adım ile taranmıştır.

Yapılan ön hesaplamalarda yeterli faz aralığı elde edilemediği için yükseklik 5 cm'ye kadar çıkarılmıştır. Ancak genişliğin birinci rezonatörün genişliği ile sınırlı olması sebebiyle 3 cm'nin üzerine çıkılamamıştır. Aksi taktirde yapay yüzey oluşturacak dizi elemanlarının genişliğinde arzu edilmeyen farklılaşmalar oluşacaktır.

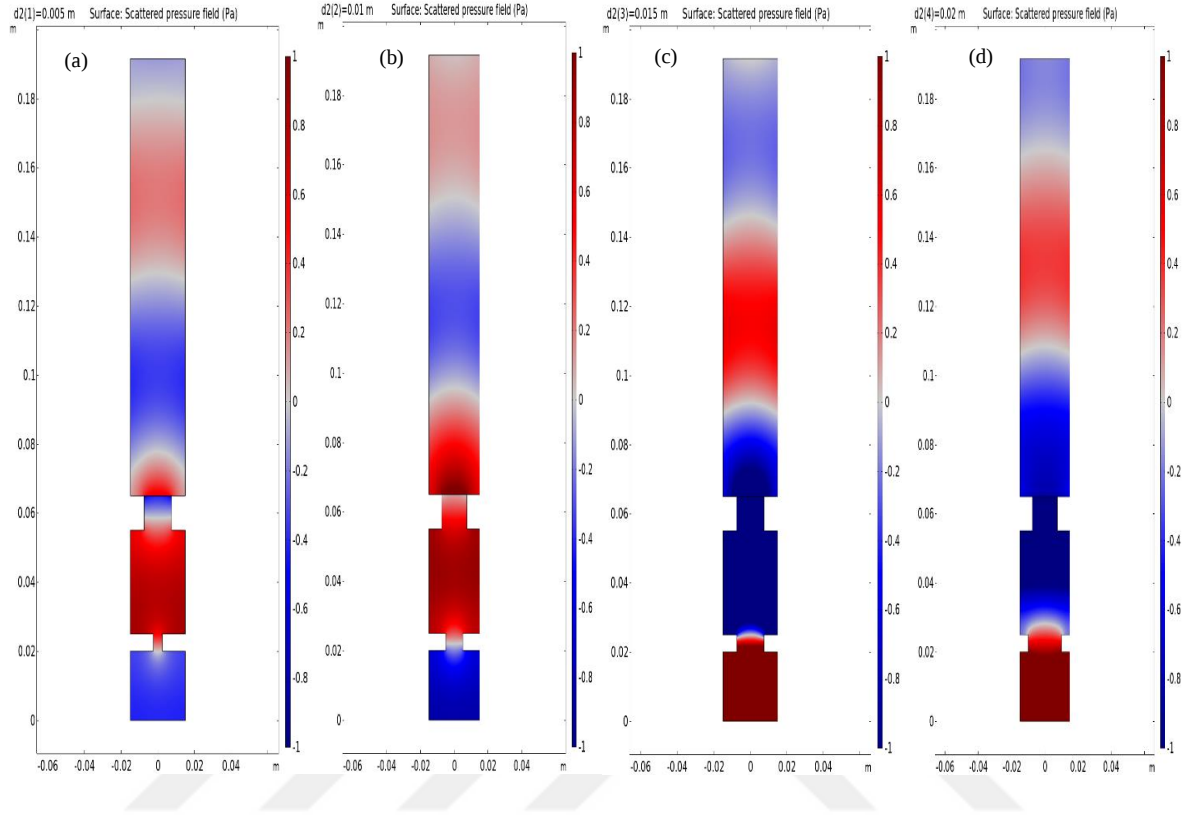
Birinci rezonans frekansındaki faz değişimleri incelendiğinde (Şekil 3.11(a), (b) ve (c)) fazın en yüksek 1.12 rad değerini aldığı görülmektedir. Bu nedenle belirlenen boyun değerlerinin birinci rezonans frekansında hacimsel parametrelere bağlı faz değişiminin yapay yüzey için kullanılabilir sonuçlar vermediği görülmektedir. 2. rezonans frekansındaki taramalarda ise her ne kadar faz aralığı artsa da çok keskin değişimlerin olduğu görülmektedir. Bu yüzden bu geometrilerinde kullanılabilirliği mümkün değildir.



Şekil 3.11: Sabit boyun parametreleri için birinci ve ikinci rezonans frekanslarındaki faz değişimleri. $d_2 = l_2 = 0.3$ cm için (a) $f=1340$ Hz, (b) $f=3105$ Hz, $d_2 = l_2 = 0.9$ cm için (c) $f=1320$ Hz, (d) $f=3270$ Hz, $d_2 = l_2 = 1.7$ için (e) $f=1202$ Hz ve (f) $f=3185$ Hz.

Daha önce de belirtildiği gibi amaç $0-2\pi$ arasında bir faz değişimi elde edebilmektir. Bu değişime en yakın sonuçlar ikinci rezonans frekansında $f=2190$ Hz için rezonatör yükseklik ve genişliğinin (h_2 ve r_2) sabit tutularak boğaz parametrelerinin (l_2 ve d_2) değişimine göre yapılan faz taraması sonuçlarıdır. Şekil 3.9(b) dikkate alınacak olursa, $l_2=0.5$

cm için boyun genişliğine (d_2) bağlı basınç değişimi grafiği Şekil 3.12’de verilmiştir. Sadece d_2 değişimi ile istenilen faz değişiminin elde edileceği açıkça görülmektedir.



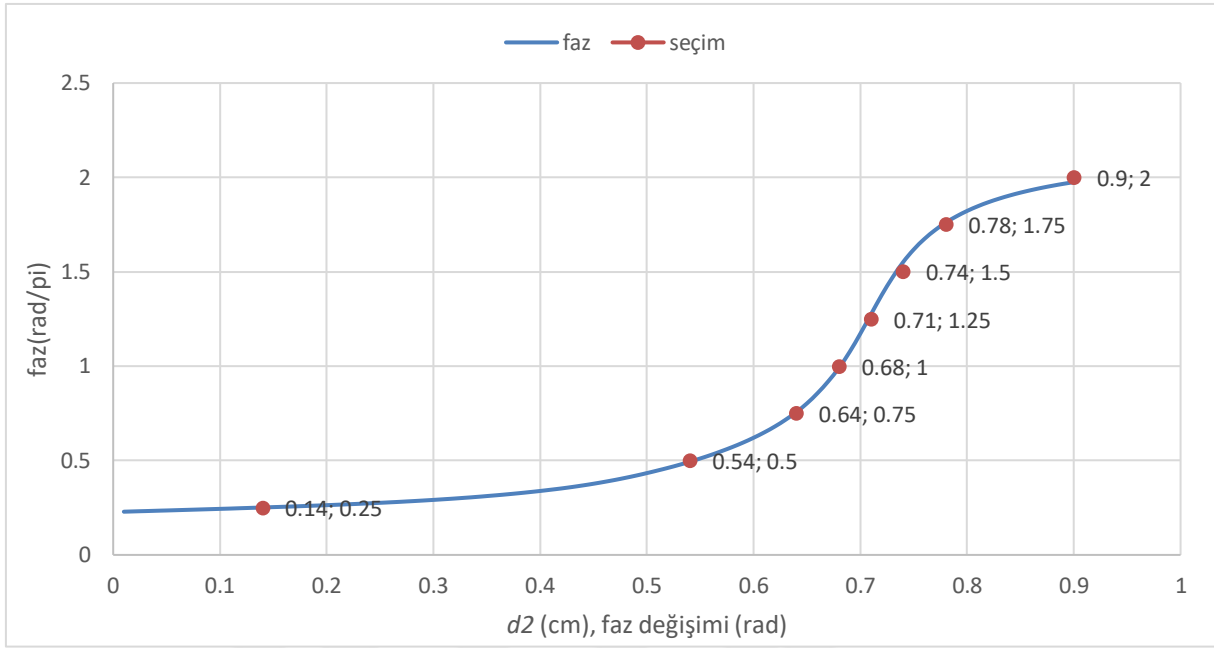
Şekil 3.12: $f=2190$ Hz ve $l_2=0.5$ cm için d_2 ’ye bağlı basınç değişimi. Boyun genişliği parametreleri (a) $d_2=0.5$ cm, (b) $d_2=1.0$ cm, (c) $d_2=1.5$ cm ve (d) $d_2=2.0$ cm.

3.3 Faz Değişimine Göre Boyun Parametrelerinin Belirlenmesi

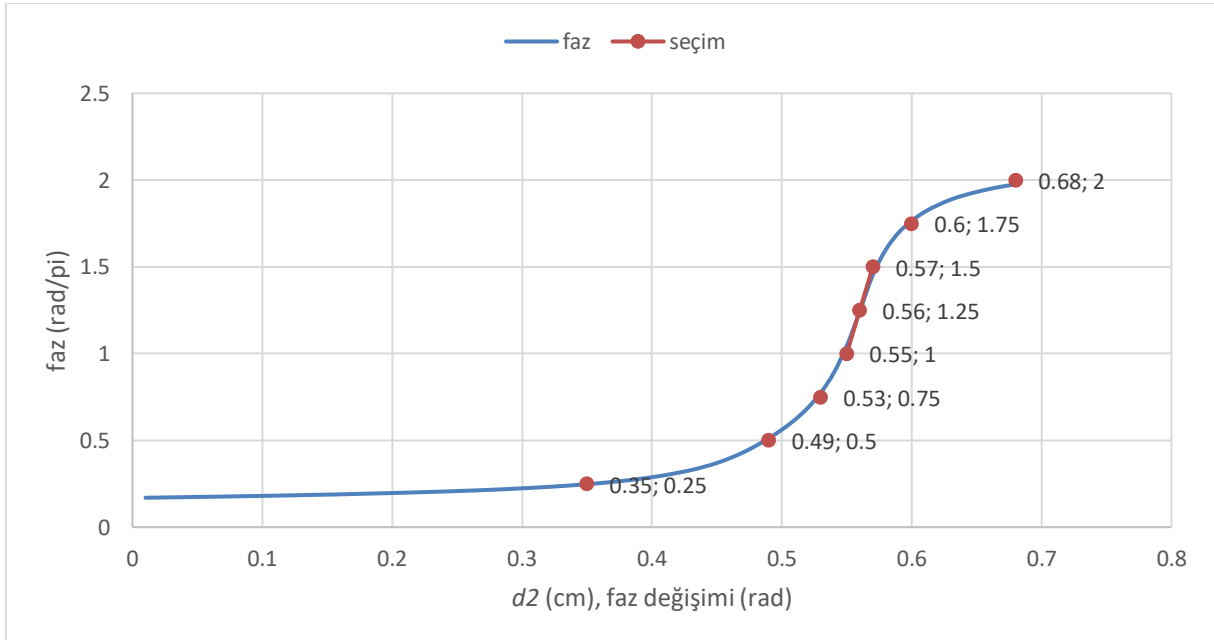
Boyun parametrelerinin belirlenmesi iki aşamalı olarak yapılmıştır. Önce $\pi/4$ daha sonra da $\pi/3$ faz değişimine karşılık gelen d_2 değerleri belirlenerek iki boyutlu faz değişim grafikleri üzerinde işaretlenmiştir.

En yüksek faz değişiminin gerçekleştiği rezonans frekansı olarak belirlenen $f=2190$ Hz için (Şekil 3.13) $l_2=0.5$ cm, $f=1978$ Hz için (Şekil 3.14) $l_2=1$ cm ve $f=1960$ Hz için (Şekil 3.15) $l_2=1$ cm olan yapılarda, d_2 ’ye bağlı iki boyutlu faz grafikleri üzerinde $\pi/4$ ’ün katlarına gelen d_2 değerleri işaretlenmiştir. Hesaplamaların nümerik olması nedeniyle d_2 ’nin değerleri kesikli olarak değişmektedir. Dolayısıyla grafik üzerinde $\pi/4$ ’ün tam katlarına bir d_2 değeri karşılık gelmemektedir. O yüzden en yakın d_2 değerine göre seçilmiştir. Bu durum

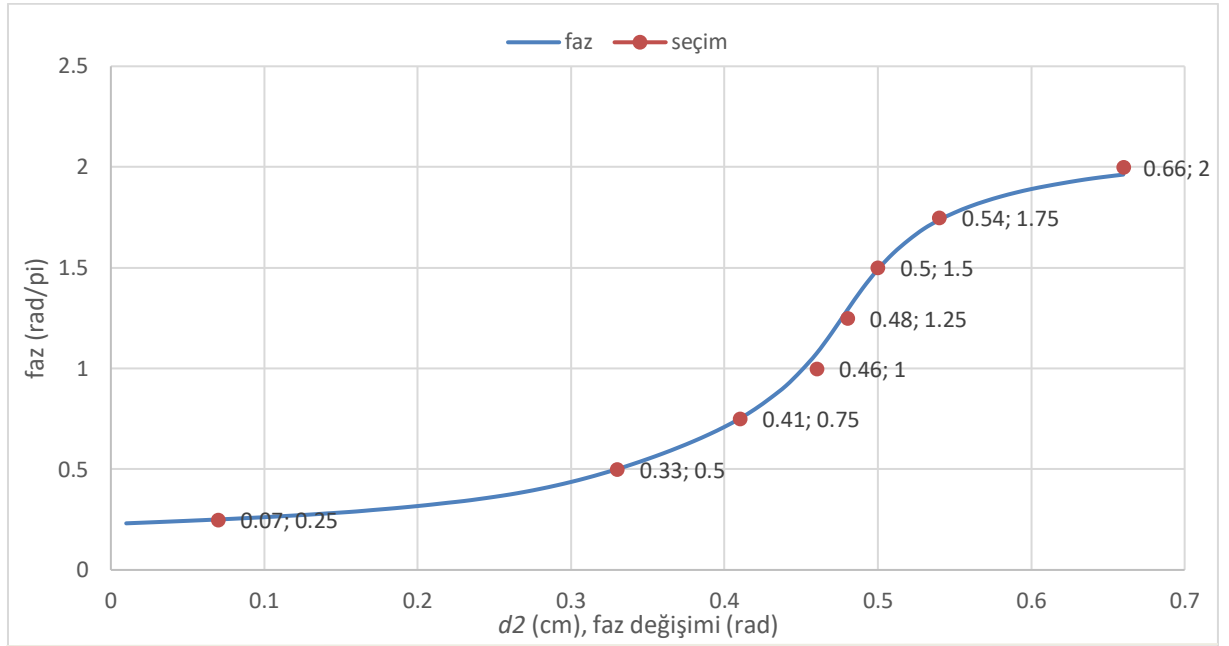
grafiklerden de anlaşılacağı üzere seçilen noktaların eğriden çok az da olsa uzaklaşmasına sebep olmuştur.



Şekil 3.13: $f=2190$ Hz için $\pi/4$ faz değişimine karşılık gelen d_2 değerleri grafiği.



Şekil 3.14: $f=1978$ Hz için $\pi/4$ faz değişimine karşılık gelen d_2 değerleri grafiği.



Şekil 3.15: $f=1960$ Hz için $\pi/4$ faz değişimine karşılık gelen d_2 değerleri grafiği.

Elde edilen grafiklere (Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.15) göre $\pi/4$ faz değişimine karşılık gelen d_2 değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1: $\pi/4$ aşamayla faz değişimi gösteren rezonans frekansları için tasarlanan rezonatör dizisinde kullanılan ikinci rezonatörün boyun genişliği (d_2) değerleri.

d_2 (boyun genişliği)	Faz değişimi (rad)	$f=1960$ Hz	$f=1978$ Hz	$f=2190$ Hz
d_{21}	0.25	0.07 cm	0.35 cm	0.14 cm
d_{22}	0.50	0.33 cm	0.49 cm	0.54 cm
d_{23}	0.75	0.41 cm	0.53 cm	0.64 cm
d_{24}	1.0	0.46 cm	0.55 cm	0.68 cm
d_{25}	1.25	0.48 cm	0.56 cm	0.71 cm
d_{26}	1.50	0.5 cm	0.57 cm	0.74 cm
d_{27}	1.75	0.54 cm	0.6 cm	0.78 cm
d_{28}	2.0	0.66 cm	0.68 cm	0.9 cm

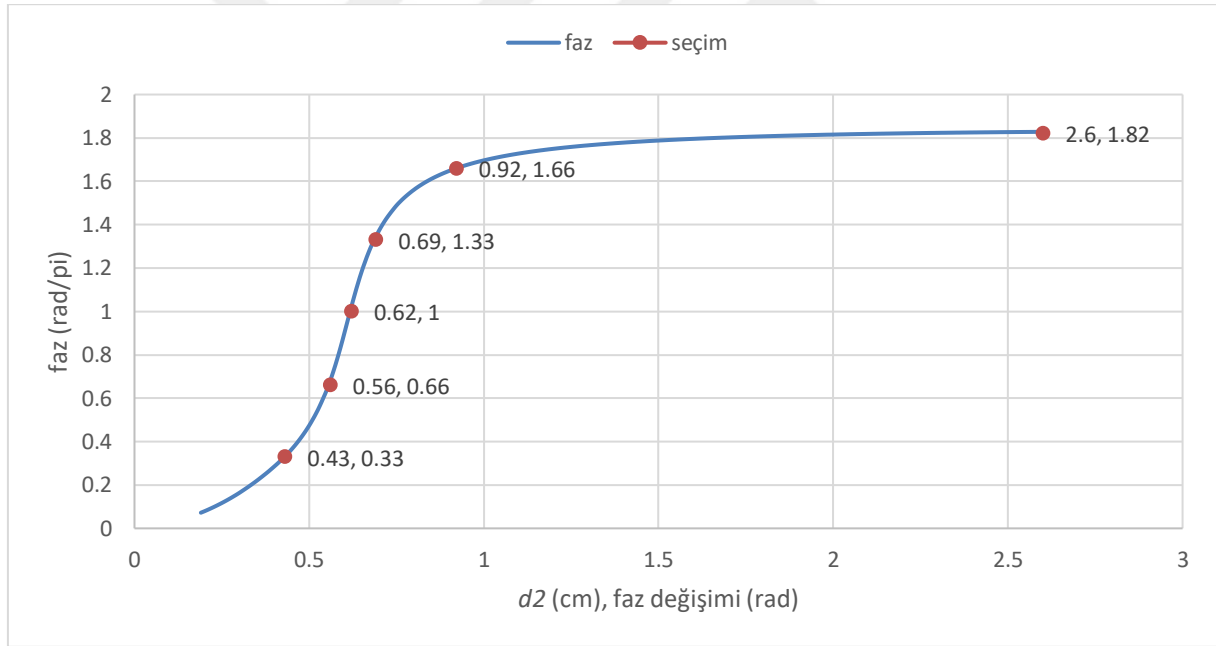
Başlangıçta belirlenen parametreler ile elde edilen verilere göre bu üç rezonans frekansı için $\pi/4$ aşamasıyla 0 ile 2π aralığında faz değişimi elde edilecek bir yapay yüzey tasarımı yapılabilir gözükmektedir.

Aynı geometrik yapı kullanılarak birinci rezonatörün boyun uzunluğu (l_1) ve boyun genişliğine (d_1) farklı değerler verilip, gelen dalga vektörüne $-\pi/3$ faz açısı değeri

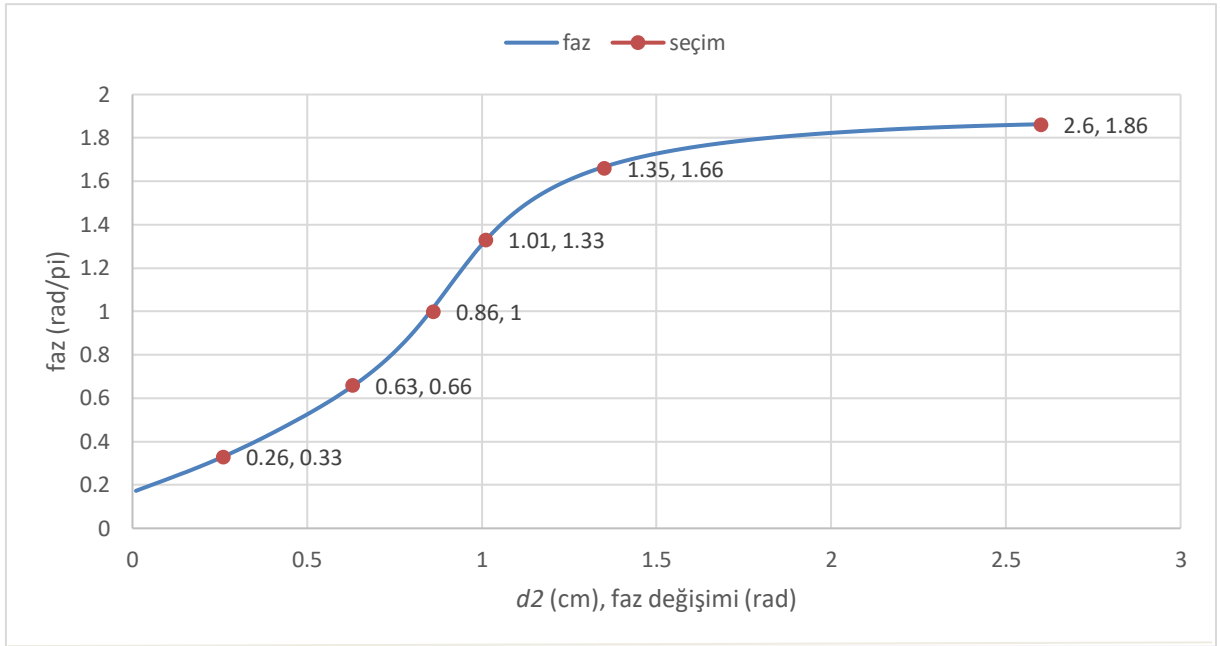
tanımlanarak, yine ikinci rezonatörün boyun genişliğine (d_2 'ye) bağlı faz değişimleri de incelenmiştir.

Elde edilen veriler incelendiğinde, $d_1=0.8$ cm, $l_1=0.5$ cm için rezonans frekansı $f=2363$ Hz olarak belirlenen yapıda faz değişiminin 1.93 rad, $d_1=1.5$ cm, $l_1=0.5$ cm için rezonans frekansı $f=2192$ Hz olarak belirlenen yapıda faz değişiminin 1.91 rad ve son olarak $d_1=1.5$ cm, $l_1=1$ cm için rezonans frekansı $f=2393$ Hz olarak belirlenen yapıda faz değişiminin 1.92 rad olduğu gözlemlenmiştir. Bu değişim yapay yüzey tasarımı için amaçlanan $0-2\pi$ arasındaki değişime çok yakındır.

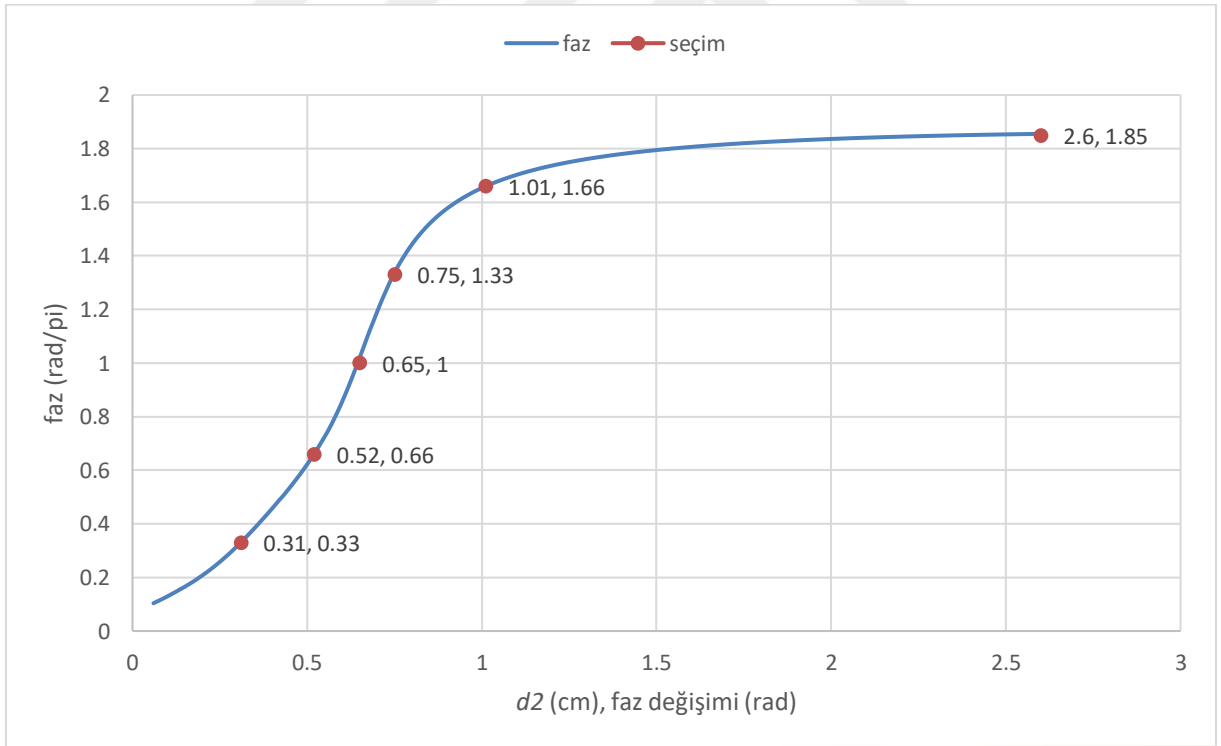
d_2 değeri, 0.01 cm ile 2.6 cm aralığında 0.01 cm adımla değiştirilerek ikinci rezonatörün boyun genişliğine (d_2 'ye) bağlı faz hesaplamaları yapılmıştır. Oluşturulması planlanan yapay yüzeydeki d_2 değerleri belirlenmiş ve d_2 'ye bağlı faz değişim grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 3.16: $f=2363$ Hz için $\pi/3$ faz değişimine karşılık gelen d_2 değerleri grafiği.



Şekil 3.17: $f=2192$ Hz için $\pi/3$ faz değişimine karşılık gelen d_2 değerleri grafiği.



Şekil 3.18: $f=2393$ Hz için $\pi/3$ faz değişimine karşılık gelen d_2 değerleri grafiği.

Elde edilen grafiklere (Şekil 3.16-3.18) göre $\pi/3$ faz değişimine karşılık gelen d_2 değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2: $\pi/3$ aşamayla faz değişimi gösteren rezonans frekansları için tasarlanan süper hücrede kullanılan ikinci rezonatörün boyun genişliği (d_2) değerleri.

d_2 (boyun genişliği)	Faz değişimi (rad)	$f=2192$ Hz	$f=2363$ Hz	$f=2393$ Hz
d_{21}	0.33	0.26 cm	0.43 cm	0.31 cm
d_{22}	0.66	0.63 cm	0.56 cm	0.52 cm
d_{23}	1.0	0.86 cm	0.62 cm	0.65 cm
d_{24}	1.33	1.01 cm	0.69 cm	0.75 cm
d_{25}	1.66	1.35 cm	0.92 cm	1.01 cm
d_{26}	2.0	2.6 cm	2.6 cm	2.6 cm

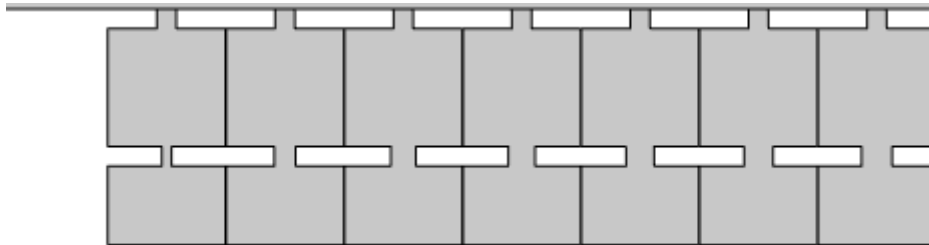
Bu grafiklerden de anlaşılacağı üzere her ne kadar basamaklı bir değişim olsa da bu değişimin yaklaşık olarak 0 ile 2π radyan arasında olduğu ve istenilen yansıma açısında bir seri geometri üreteceği ve yapay yüzey tasarımında kullanılabileceği söylenebilir.

3.4 Akustik Yapay Yüzeyi Oluşturan Rezonatör Dizisi Tasarımları

Oluşturulan iki farklı faz değişimi ile iki farklı yansıma açısı elde edebilmek için iki adet rezonatör dizisi tasarımı yapılmıştır.

3.4.1 $\pi/4$ Faz aşamasıyla oluşturulan rezonatör dizisi

Dizinin her biriminde ikili Helmholtz rezonatör (Şekil 2.1) bulunmaktadır. Birinci rezonatör parametreleri tüm hesaplamalar boyunca $h_1=3$ cm, $r_1=3$ cm, $d_1=0.5$ cm ve $l_1=0.5$ cm olarak sabit seçilmiştir. İkinci rezonatörün yükseklik $h_2=2$ cm, genişliği $r_2=3$ cm ve boyun uzunluğu $l_2=0.5$ cm değerlerinde sabit tutulmuş ve hepsinde de yansıyan dalgada faz farkı oluşturulabilmesi için ikinci rezonatörün boyun genişliği olan d_2 faz eğimi oluşturabilmek için farklı seçilmiştir.



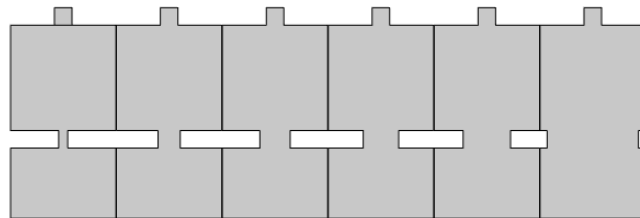
Şekil 3.19: $\pi/4$ aşamayla faz değişimi gösteren rezonans frekansları için tasarlanan rezonatör dizisi gösterimi.

Şekil 3.19’da tasarlanan dizi, aralarında 0.15 mm boşluk olan yedi ayrı ikili Helmholtz rezonatör dizisinden oluşmaktadır. Her ikili Helmholtz rezonatörde, ikinci rezonatörün boyun genişliği Çizelge 3.1’de verildiği gibi farklı d_2 ($d_{21}, d_{22}, d_{23}, d_{24}, d_{25}, d_{26}$ ve d_{27}) değerleri kullanılarak tasarlanmıştır.

Ayrıca faz farkını 2π ’ye tamamlamak için, oluşturulan ikili Helmholtz rezonatör dizisinin sol tarafında faz farkının sıfıra eşit olduğu rezonatör genişliğine eşit büyüklükte ($r_1=r_2=3$ cm) düz bir çizgi eklenerek rezonatör dizisi tamamlanmıştır. Tasarlanan dizinin eni 24.12 cm =0.2412 m, kalınlığı (boyu) ise 6 cm =0.06 m’dir.

3.4.2 $\pi/3$ Faz aşamasıyla oluşturulan rezonatör dizisi tasarımı

Oluşturulan dizi tasarımında, Şekil 3.19’da olduğu gibi dizinin her biriminde aralarında 0.15 mm boşluk bulunan altı farklı ikili Helmholtz rezonatör (Şekil 2.3) kullanılmıştır. Birinci rezonatörün yüksekliği $h_1=3$ cm ve genişliği $r_1=3$ cm olarak, ikinci rezonatörün yüksekliği $h_2=2$ cm, genişliği $r_2=3$ cm ve boyun uzunluğu $l_2= 0.5$ cm değerlerinde tüm hesaplamalar boyunca sabit tutulmuştur. Birinci rezonatörün boyun genişliği d_1 ve boyun uzunluğu l_1 ’e üç farklı değer ($d_1=0.8$ cm $l_1=0.5$ cm, $d_1=1.5$ cm $l_1=0.5$ ve $d_1=1.5$ cm $l_1=1$ cm) verilip, yine yansıyan dalgada faz farkı oluşturulabilmesi için ikinci rezonatörün boyun genişliği Çizelge 3.2’de belirlenen farklı d_2 ($d_{21}, d_{22}, d_{23}, d_{24}, d_{25}$ ve d_{26}) değerleri kullanılarak üç farklı rezonans frekansı için üç farklı dizi tasarımı yapılmıştır (Şekil 3.20). Tasarlanan rezonatör dizisinin eni 18.75 cm = 0.1875 m, kalınlığı (boyu) ise 6.12 cm = 0.0612 m’dir.



Şekil 3.20: $\pi/3$ aşamalı olarak faz değişimi gösteren rezonans frekansları için tasarlanan rezonatör dizisi gösterimi.

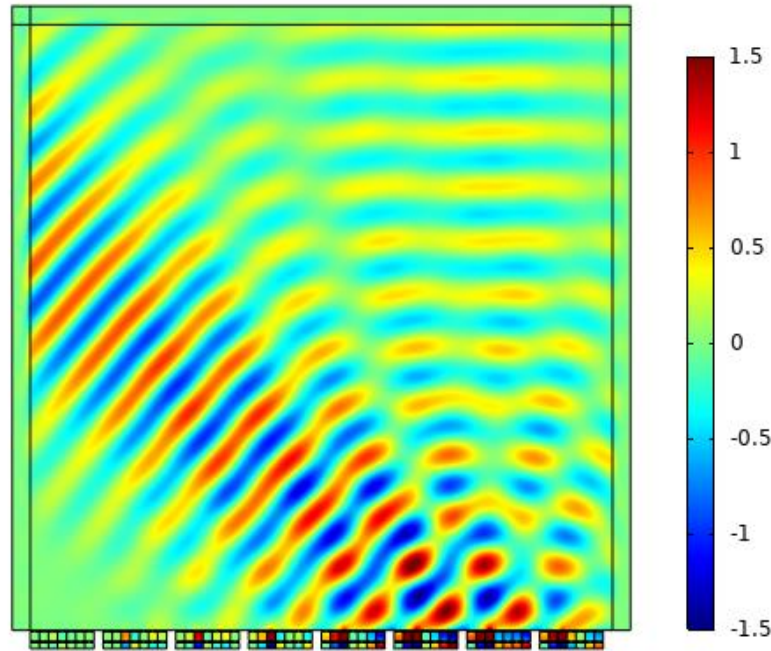
3.5 Akustik Yapay Yüzey Tasarımı

Tasarlanan yapay yüzeyler yukarıda elde edilen rezonatör dizilerinin periyodik olarak yan yana getirilmesi ile oluşmaktadır. Hesaplama sonuçlarında yansıyan dalgaların rahat bir şekilde görülebilmesi ve yansıma açılarının kolayca hesaplanabilmesi için yukarıda tasarlanan rezonatör dizilerinden sekiz adet kullanılarak bir yapay yüzey oluşturulmuştur. Hesaplama alanının eni ve boyu bu kriterler göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Oluşturulan modelin detayları Materyal ve Yöntem bölümünde verilmiştir. Oluşturdukları faz farkına göre iki farklı yapay yüzey tasarımı yapılmıştır.

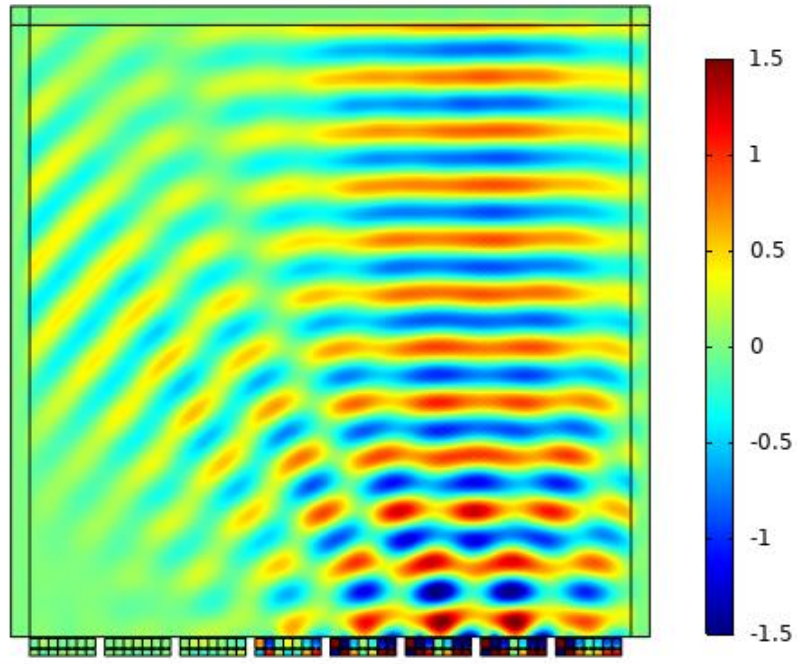
3.5.1 $\pi/4$ Faz aşamasıyla tasarlanan yapay yüzeyin basınç grafiklerinin incelenmesi

45 derecelik bir yansıma açısına sahip olması beklenen yapay yüzeylerin ilgili rezonans frekanslarındaki ($f=1960$ Hz, $f=1978$ Hz ve $f=2190$ Hz) hesaplama sonuçlarından elde edilen saçılan dalga basınç değişim grafikleri Şekil 3.21–3.23'te verilmiştir.

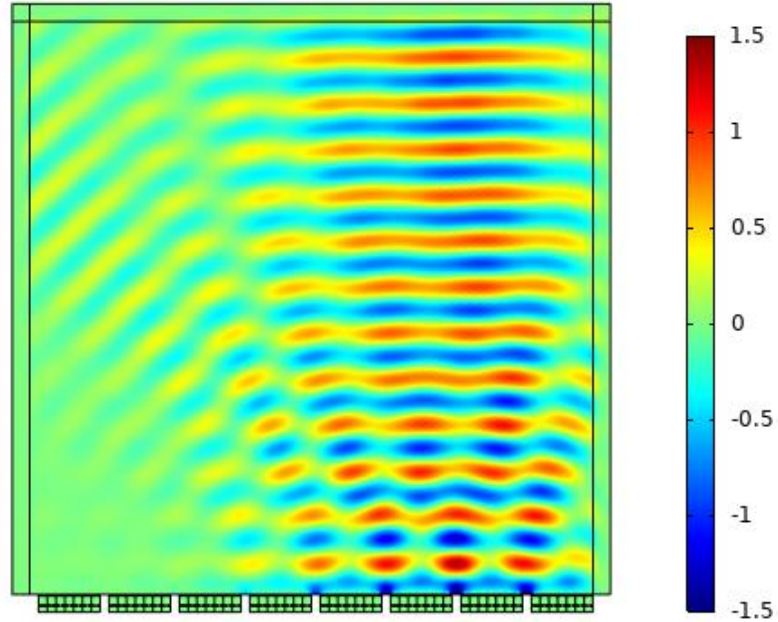
Şekil 3.21-3.23 incelendiğinde yapay yüzeye dik olarak gönderilen dalganın tamamının olmasa da bir kısmının gerçekten 45 derecelik bir açıyla yansıdığı görülmektedir. Özellikle Şekil 3.21'de elde edilen sonuç gelen dalganın çoğunluğunun istenilen açı ile yansıtıldığını göstermektedir.



Şekil 3.21: $f=1960$ Hz için d_2 'ye bağlı saçılan dalga basınç değişim grafiği. Hesaplanan yansıma açısı=45.005 derece (Renk skalası Paskal cinsinden ifade edilmiştir).



Şekil 3.22: $f=1978$ Hz için d_2 'ye bağlı saçılan dalga basınç değişim grafiği. Hesaplanan yansıma açısı=44.997 derece (Renk skalası Paskal cinsinden ifade edilmiştir).



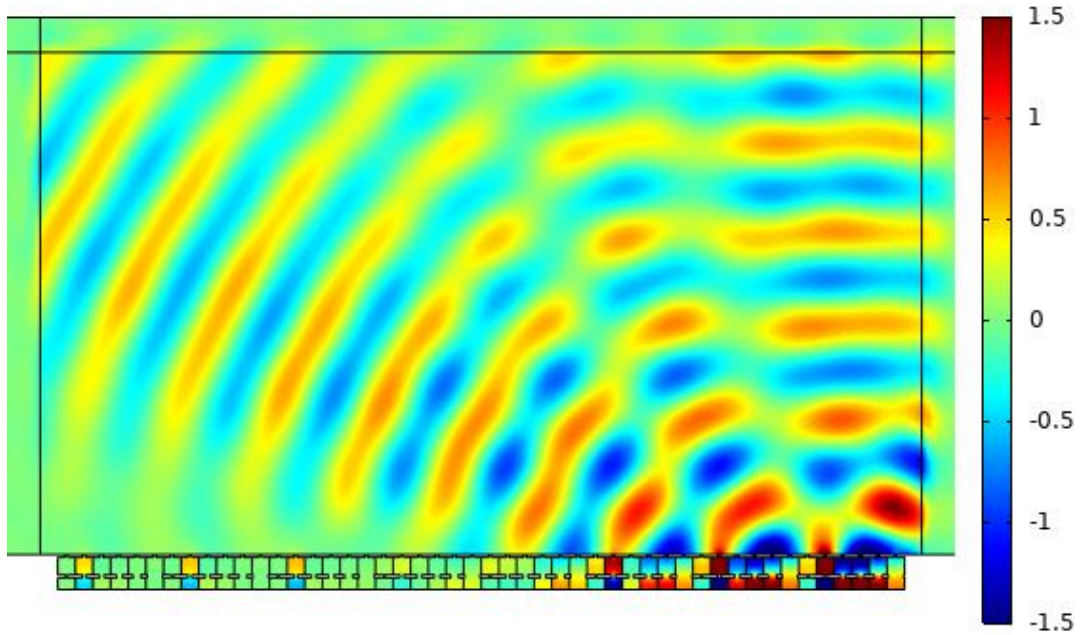
Şekil 3.23: $f=2190$ Hz için d_2 'ye bağlı saçılan dalga basınç değişim grafiği. Hesaplanan yansıma açısı=44.944 derece (Renk skalası Paskal cinsinden ifade edilmiştir).

Yansıyan dalgaların yansıma açıları ölçüldüğünde ise $f=1960$ Hz için yansıma açısı=45.005 derece, $f=1978$ Hz için yansıma açısı=44.997 derece ve $f=2190$ Hz için yansıma açısı=44.944 derece olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar ışığında tasarlanan yapay yüzeyin gelen dalgayı istenilen açıda yönlendirebilme özelliğine sahip olduğu söylenebilir.

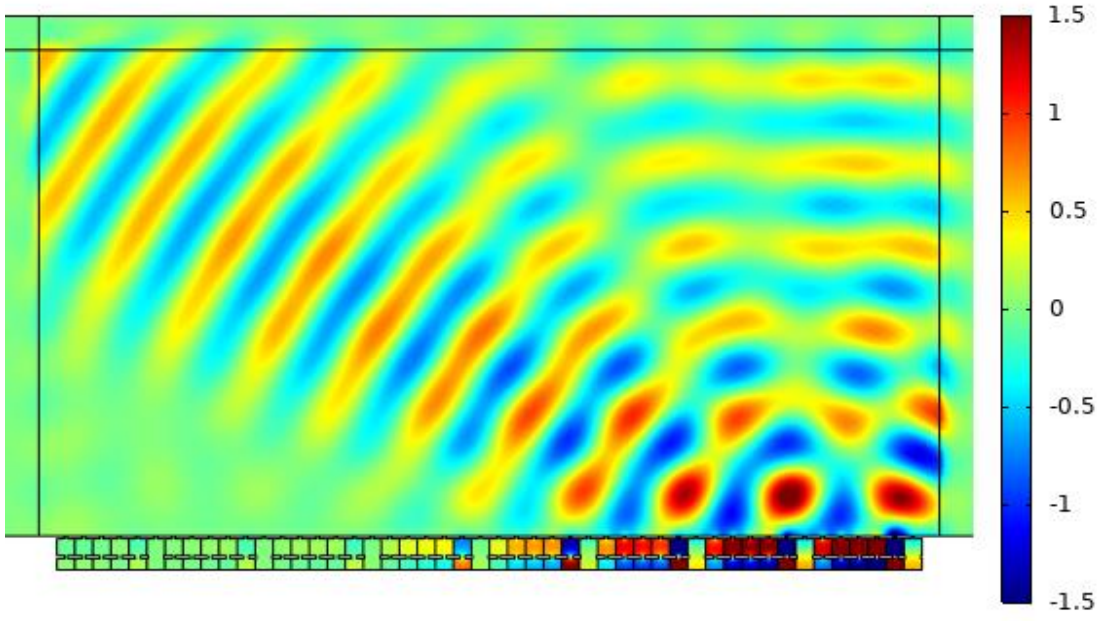
3.5.2 $\pi/3$ faz aşamasıyla tasarlanan yapay yüzeyin basınç grafiklerinin incelenmesi

60 derecelik bir yansıma açısına sahip olması beklenen yapay yüzeylerin ilgili rezonans frekanslarındaki ($f=2192$ Hz, $f=2363$ Hz ve $f=2393$ Hz) hesaplama sonuçlarından elde edilen saçılan dalga basınç değişim grafikleri Şekil 3.24–3.26’da verilmiştir.

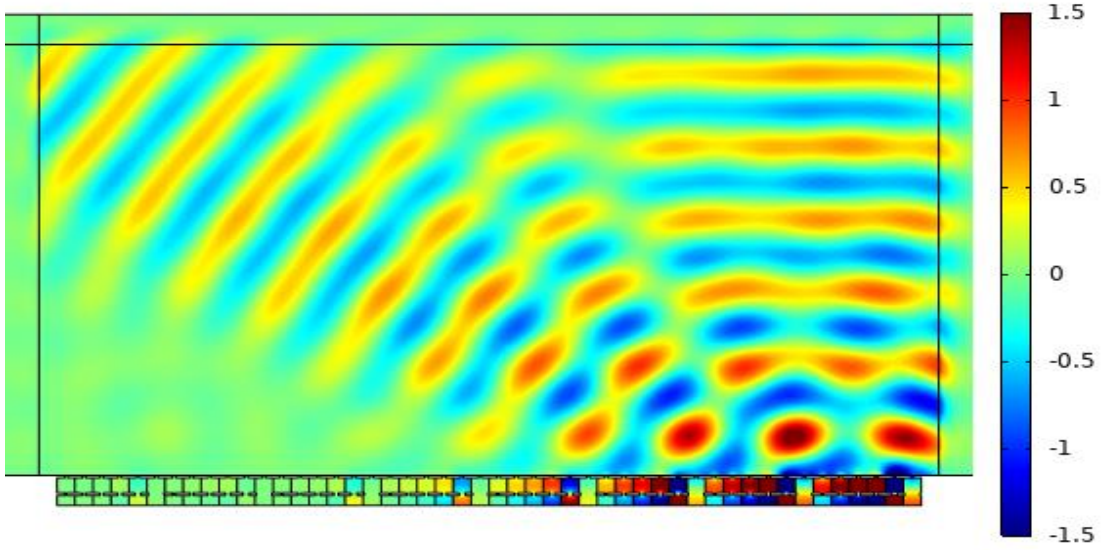
Her üç frekans ve yapıda da istenilen yansıma açısına ulaşıldığı görülmektedir. Üç yapının da benzer performansa sahip olduğu söylenebilse de Şekil 3.25’te verilen yapının geriye yansıyan bileşeninin 60 derece ile yansıyan bileşeninden çok daha küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 3.24: $f=2192$ Hz için d_2 'ye bağlı saçılan dalga basınç değişim grafiği. Hesaplanan yansıma açısı=60.001 derece (Renk skalası Paskal cinsinden ifade edilmiştir).



Şekil 3.25: $f=2363$ Hz için d_2 'ye bağlı saçılan dalga basınç değişim grafiği. Hesaplanan yansıma açısı=60.004 derece (Renk skalası Paskal cinsinden ifade edilmiştir).



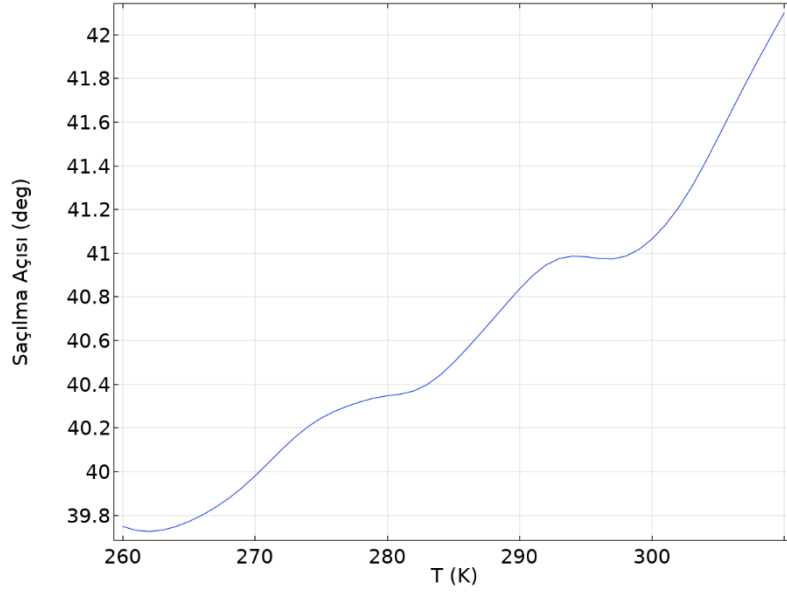
Şekil 3.26: $f=2393$ Hz için d_2 'ye bağlı saçılan dalga basınç değişim grafiği. Hesaplanan yansıma açısı=59.955 derece (Renk skalası Paskal cinsinden ifade edilmiştir).

Yansıyan dalgaların yansıma açıları ölçüldüğünde ise $f=2192$ Hz için yansıma açısı=60.001 derece, $f=2363$ Hz için yansıma açısı=60.004 derece ve $f=2393$ Hz için yansıma açısı=59.955 derece olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar ışığında da tasarlanan yapay yüzeyin gelen dalgayı istenilen açıda yönlendirebilme özelliğine sahip olduğu söylenebilir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ikili Helmholtz rezonatör dizisinden oluşan iki farklı yapay yüzey tasarımı yapılmıştır [21]. Yapay yüzeyi oluşturan herbir birim hücredeki ikinci rezonatörün boyun genişliğine (d_2) bağlı olarak yansıyan dalganın fazında $\pi/3$ ve $\pi/4$ değerlerinde bir eğim oluşturulabileceği ve böylece yansıyan dalganın oluşturulan eğim değerinde anormal olarak yansıtılabileceği gösterilmiştir. Yapılan anormal yansıma [26-30] hesaplarında $\pi/3$ aşamayla tasarlanan herbir dizi altı tane ikili Helmholtz rezonatörden, $\pi/4$ aşamayla tasarlanan her bir dizi ise yedi tane ikili Helmholtz rezonatör dizisinden oluşturulmuştur. Elde edilen yapay yüzeylerin kalınlığı anormal yansıma elde edilen frekanslardaki en küçük dalga boyundan bile daha kısadır. Böylece tasarlanan yapay yüzeylerin dalga boyu altı kalınlıklara haiz olduğu söylenebilir [4-7].

Tasarlanan yapay yüzeyin sensör olarak kullanılabilirliğinin sınanması açısından $f=2190$ Hz'de 45 derecelik yansıma açısındaki yapı kullanılarak bir hesaplama daha yapılmıştır. Bu hesaplamada yansıyan dalganın, 40 derecelik bir sıcaklık değişiminde yansıma açısının sıcaklığa bağlı değişimi incelenmiştir. Ortamın yoğunluk ve ses hızı parametrelerinin sıcaklığa bağlı değişimi Comsol materyal kütüphanesi içindeki değerler kullanılarak belirlenmiştir. Sıcaklığın 260 ile 310 K arasında değiştirilmesi ile elde edilen yansıma açısı değerleri Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu sıcaklık aralığında yansıma açısındaki toplam sapmanın yaklaşık 3 derece civarında olduğu ve değişimin doğrusal olmamakla beraber düzgün olduğu söylenebilir. Yapay yüzey olmadan yansıma açısında bu tür bir farklılaşmanın elde edilmesi mümkün değildir. Çünkü normal bir yüzeyden gerçekleşen yansıma olayında gelen ve yansıyan dalgaların açılarının farklılaşması ortam aynı olduğu için mümkün değildir. Bu yüzden yansıma açısının sıcaklığa yada başka bir ortam parametresine bağlı olarak farklılaşması ancak yapay yüzeyler ile mümkün olabildiği bu çalışmanın önemli sonuçlarından biri olarak sunulmuştur.



Şekil 4.1: $f=2190$ Hz için yansıma açısının sıcaklığa bağlı değişimi.

Elde edilen sonuçlar akustik dalganın Snell yasasına aykırı bir biçimde yansıtılmasına dayalı uygulamaların geliştirilmesi için önemlidir. Bu tür yapılar dalga boyundan daha küçük kalınlıklara haiz oldukları için duyulabilir frekans bölgesinde tasarlandığında inşaat ya da otomotiv gibi endüstrilerde gürültü yönlendirme amaçlı olarak kullanılabileceği gibi konser salonları veya stüdyolarda ses dalgasını istenilen yöne yönlendiren panellerin yapılmasını sağlayabilir.

Bu çalışmada geliştirilen yapay yüzeylerin anormal yansıma performansları sadece gelen dalganın dik olduğu durum için incelenmiştir. Farklı gelme açılarındaki sonuçların incelenmesini ileri ki çalışmalar olarak önermek mümkündür. Ayrıca ortam parametrelerine bağlı bir şekilde yansıma açısının farklılaşması bu yapıların sensör olarak uygulama alanları bulabileceğini göstermiştir. Yüksek frekanslarda çalışabilecek şekillerde tasarlanacak yapay yüzeyler sayesinde küçük boyutlu gaz, nem vb. sensör tasarımları da öneriler içerisinde.

Yapılan çalışma iki boyutlu olduğu için deneyler ile doğrulanması mümkün olamamıştır. Yüksek başarılı bilgisayarlar ile benzer tasarımların üç boyutlu modellerinin gerçekleştirilmesi ve deneyler ile doğrulanması yine ileri çalışmalar olarak önerilebilir.

Bu çalışmada yapay yüzeylerin sadece tasarlandıkları frekans değerinde analizleri yapılmıştır. Ancak anormal yansımanın frekansa bağlı olarak değişken bir şekilde başka frekans değerlerinde de gerçekleşebileceği düşünülmektedir [18,39]. Bu etkin frekans aralıklarının ve yansıma açılarının belirlenmesi de son ileri çalışma önerisi olarak sunulmuştur.

5. KAYNAKLAR

- [1] **S. Alagöz**, *Farklı Kristal Geometrilere Sahip Sonik Kristallerin Odaklama Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi*, (Doktora Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi, Malatya, 2009.
- [2] **Kaya, O. A., Cicek, A., & Ulug, B.** (2011). Wide-band all-angle acoustic self-collimation by rectangular sonic crystals with elliptical bases. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(20), 205104.
- [3] **S. A. Cummer, J. Christensen, and A. Alù**, Controlling sound with acoustic metamaterials, *Nat. Rev. Mater.* 1, 16001, (2016).
- [4] **Zhu, Y., & Assouar, B.** (2019). Multifunctional acoustic metasurface based on an array of Helmholtz resonators. *Physical Review B*, 99(17), 174109.
- [5] **G. C. Ma and P. Sheng**, Acoustic metamaterials: From local resonances to broad horizons, *Sci. Adv.* 2, e1501595, (2016).
- [6] **Veselago, V. G.** (1967). Electrodynamics of substances with simultaneously negative and. *Usp. fiz. nauk*, 92(7), 517.
- [7] **V. G. Veselago**, The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ , *Sov. Phys-Usp*, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, Jan-Feb. 1968.
- [8] **Li, Y., Jiang, X., Li, R. Q., Liang, B., Zou, X. Y., Yin, L. L., & Cheng, J. C.** (2014). Experimental realization of full control of reflected waves with subwavelength acoustic metasurfaces. *Physical Review Applied*, 2(6), 064002.
- [9] **Liu, Z., Zhang, X., Mao, Y., Zhu, Y. Y., Yang, Z., Chan, C. T., & Sheng, P.** (2000). Locally resonant sonic materials. *Science*, 289(5485), 1734-1736
- [10] **Yang, Z., Mei, J., Yang, M., Chan, N. H., & Sheng, P.** (2008). Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass. *Physical Review Letters*, 101(20), 204301.
- [11] **S. Zhang, C. G. Xia, and N. Fang**, Broadband acoustic cloak for ultrasound waves, *Phys. Rev. Lett.* 106, 024301, (2011).
- [12] **C. Faure, O. Richoux, S. Félix, and V. Pagneux**, Experiments on metasurface carpet cloaking for audible acoustics, *Appl. Phys. Lett.* 108, 064103, (2016).
- [13] **Lee, S. H., Park, C. M., Seo, Y. M., Wang, Z. G., & Kim, C. K.** (2009). Acoustic metamaterial with negative modulus. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 21(17), 175704.
- [14] **Ding, C., Chen, H., Zhai, S., Liu, S., & Zhao, X.** (2015). The anomalous manipulation of acoustic waves based on planar metasurface with split hollow sphere. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 48(4), 045303.

- [15] **X. B. Cai, Q. Q. Guo, G. K. Hu, and J. Yang**, Ultrathin low-frequency sound absorbing panels based on coplanar spiral tubes or coplanar Helmholtz resonators, *Appl. Phys. Lett.* 105, 121901, (2014).
- [16] **X. F. Li, X. Ni, L. Feng, M. H. Lu, C. He, and Y. F. Chen**, Tunable unidirectional sound propagation through a sonic-crystal-based acoustic diode, *Phys. Rev. Lett.* 106, 084301, (2011).
- [17] **Y. Li, G. K. Yu, B. Liang, X. Y. Zou, G. Y. Li, S. Cheng, and J. C. Cheng**, Three-dimensional ultrathin planar lenses by acoustic metamaterials, *Sci. Rep.* 4, 6830, (2014).
- [18] **Zhang, S., Yin, L., & Fang, N.** (2009). Focusing ultrasound with an acoustic metamaterial network. *Physical Review Letters*, 102(19), 194301.
- [19] **Ingard, U.** (1953). On the theory and design of acoustic resonators. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 25(6), 1037-1061.
- [20] **Lee, S. H., Park, C. M., Seo, Y. M., Wang, Z. G., & Kim, C. K.** (2009). Acoustic metamaterial with negative density. *Physics Letters A*, 373(48), 4464-4469.
- [21] **Tang, S. K., Ng, C. H., & Lam, E. Y. L.** (2012). Experimental investigation of the sound absorption performance of compartmented Helmholtz resonators. *Applied Acoustics*, 73(9), 969-976.
- [22] **Yamamoto, T.** (2018). Acoustic metamaterial plate embedded with Helmholtz resonators for extraordinary sound transmission loss. *Journal of Applied Physics*, 123(21), 215110.
- [23] **Helmholtz, Hermann von** (1885), *On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music*, Second English Edition, translated by Alexander J. Ellis. London: Longmans, Green, and Co., p. 44. Retrieved 2010-10-12.
- [24] **H. Matsuhisa, B. Ren, and S. Sato**, Semiactive control of duct noise by a volumevariable resonator, *Japan Society of Mechanical Engineers, International Journal*, 35, 223–228 (1992).
- [25] **H. Matsuhisa and S. Sato**, Semi-active noise control by a resonator with variable parameters, *Proceedings of Inter-Noise 90*, pp. 1305–1308 (1990).
- [26] **Kim, Y. H., & Kim, S.** (2005). A Helmholtz Resonator Array Panel for Low Frequency Sound Absorption. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 15(8), 924-930.
- [27] **Changlin Ding, Huaijun Chen, Shilong Zhai, Song Liu and Xiaopeng Zhao**, The anomalous manipulation of acoustic waves based on planar metasurface with split hollow sphere., *J. Phys. D: Appl. Phys.* 48 (2015) 045303 (5pp)
- [28] **Changlin Ding, Yawei Zhou, Xiaopeng Zhao, Huaijun Chen, Shilong Zhai**, The Anomalous Reflection of Acoustic Waves Based on Metasurface, *IMECS 2015*, March 18 - 20, 2015, Hong Kong.

- [29] **Huaijun Chen**, Anomalous Reflection of Acoustic Waves in Air with Metasurfaces at Low Frequency, *Advances in Condensed Matter Physics*, Volume 2018, Article ID 5452071, 7 pages.
- [30] **Mao, Q., Li, S., & Liu, W.** (2018). Development of a sweeping Helmholtz resonator for noise control. *Applied Acoustics*, 141, 348-354.
- [31] **Guo, J., Zhang, X., Fang, Y., & Fattah, R.** (2018). Manipulating reflected acoustic wave via Helmholtz resonators with varying-length extended necks. *Journal of Applied Physics*, 124(10), 104902.
- [32] **Fang, N., Xi, D., Xu, J., Ambati, M., Srituravanich, W., Sun, C., & Zhang, X.** (2006). Ultrasonic metamaterials with negative modulus. *Nature Materials*, 5(6), 452-456.
- [33] **Zhao, H., Lu, Z., Guan, Y., Liu, Z., Li, G., Liu, J., & Ji, C. Z.** (2018). Effect of extended necks on transmission loss performances of Helmholtz resonators in presence of a grazing flow. *Aerospace Science and Technology*, 77, 228-234.
- [34] **Wu, D., Zhang, N., Mak, C. M., & Cai, C.** (2019). Hybrid noise control using multiple Helmholtz resonator arrays. *Applied Acoustics*, 143, 31-37.
- [35] **Gai, X. L., Xing, T., Li, X. H., Zhang, B., & Wang, W. J.** (2016). Sound absorption of microperforated panel mounted with helmholtz resonators. *Applied Acoustics*, 114, 260-265.
- [36] **Song, K., Kim, J., Hur, S., Kwak, J. H., Lee, S. H., & Kim, T.** (2016). Directional reflective surface formed via gradient-impeding acoustic meta-surfaces. *Scientific reports*, 6(1), 1-10.
- [37] **Oh, T. S., & Jeon, W.** (2022). Acoustic metaliners for sound insulation in a duct with little flow resistance. *Applied Physics Letters*, 120(4), 044103.
- [38] **Duan, H., Shen, X., Wang, E., Yang, F., Zhang, X., & Yin, Q.** (2021). Acoustic multi-layer Helmholtz resonance metamaterials with multiple adjustable absorption peaks. *Applied Physics Letters*, 118(24), 241904.
- [39] **Shao, C., Zhu, Y., Long, H., Liu, C., Cheng, Y., & Liu, X.** (2022). Metasurface absorber for ultra-broadband sound via over-damped modes coupling. *Applied Physics Letters*, 120(8), 083504.
- [40] **Ning, L., Wang, Y. Z., & Wang, Y. S.** (2019). Active control of elastic metamaterials consisting of symmetric double Helmholtz resonator cavities. *International Journal of Mechanical Sciences*, 153, 287-298.
- [41] **Guo, J., Zhang, X., Fang, Y., & Fattah, R.** (2018). Manipulating reflected acoustic wave via Helmholtz resonators with varying-length extended necks. *Journal of Applied Physics*, 124(10), 104902.

- [42] **Sabat, R., Pennec, Y., Lévêque, G., Torrent, D., Ding, C., & Djafari-Rouhani, B.** (2022). Single and coupled Helmholtz resonators for low frequency sound manipulation. *Journal of Applied Physics*, 132(6), 064505.
- [43] **Chanaud, R. C.** (1994). Effects of geometry on the resonance frequency of Helmholtz resonators. *Journal of Sound and Vibration*, 178(3), 337-348.
- [44] **Chanaud, R. C.** (1997). Effects of geometry on the resonance frequency of Helmholtz resonators, part II. *Journal of Sound and Vibration*, 204(5), 829-834.
- [45] **Chenchi, C. A. I., & Mak, C. M.** (2018). Noise attenuation capacity of a Helmholtz resonator. *Advances in Engineering Software*, 116, 60-66.
- [46] **Langfeldt, F., Hoppen, H., & Gleine, W.** (2019). Resonance frequencies and sound absorption of Helmholtz resonators with multiple necks. *Applied Acoustics*, 145, 314-319.
- [47] **De Bedout, J. M., Franchek, M. A., Bernhard, R. J., & Mongeau, L.** (1997). Adaptive-passive noise control with self-tuning Helmholtz resonators. *Journal of Sound and Vibration*, 202(1), 109-123.
- [48] **Nagaya, K., Hano, Y., & Suda, A.** (2001). Silencer consisting of two-stage Helmholtz resonator with auto-tuning control. *the Journal of the Acoustical Society of America*, 110(1), 289-295.
- [49] **Yun, Y., & Mak, C. M.** (2013). The theoretical fundamentals of an adaptive active control using periodic Helmholtz resonators for duct-borne transmission noise in ventilation systems. *Building Services Engineering Research and Technology*, 34(2), 195-201.
- [50] **Estève, S. J., & Johnson, M. E.** (2005). Adaptive Helmholtz resonators and passive vibration absorbers for cylinder interior noise control. *Journal of Sound and Vibration*, 288(4-5), 1105-1130.
- [51] **Bryant, F.** (1958). Snell's law of refraction. *Physics Bulletin*, 9(12), 317.
- [52] **Yu, N., Genevet, P., Kats, M. A., Aieta, F., Tetienne, J. P., Capasso, F., & Gaburro, Z.** (2011). Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction. *Science*, 334(6054), 333-337.
- [53] **Tian, H. W., Shen, H. Y., Zhang, X. G., Li, X., Jiang, W. X., & Cui, T. J.** (2020). Terahertz metasurfaces: toward multifunctional and programmable wave manipulation. *Frontiers in Physics*, 8, 584077.
- [54] **Zienkiewicz, Olek C.; Taylor, Robert L.; Zhu, J. Z.** (2013). *The finite element method: Its basis and fundamentals* (İngilizce). Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-08-095135-5.
- [55] **Tankut, N., Tankut, A. N., & Zor, M.** (2014). Finite element analysis of wood materials. *Drvena industrija*, 65(2), 159-171.
- [56] **Bathe, K. J.** (2006). *Finite element procedures*. Klaus-Jurgen Bathe.

- [57] **Logan, D. L.** (2016). A first course in the finite element method. Cengage Learning.
- [58] **Soğukpınar, H.** (2016). *Mühendisler ve Temel Bilimciler için Nümerik Analiz ve Simülasyon COMSOL*. İstanbul:Kodlab
- [59] **Togni, P., Cifra, M., & Dříž'dal, T.** (2008). COMSOL multiphysics in undergraduate education of electromagnetic field biological interactions. In 14th Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering and Medical Physics (pp. 433-436). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [60] **Berenger, J. P.** (1996). Perfectly matched layer for the FDTD solution of wave-structure interaction problems. IEEE Transactions on antennas and propagation, 44(1), 110-117.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Serpil Koç

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, İnönü Üniversitesi, Fen ve Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü.

