



**T.C.
BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**OLAĞANÜSTÜ AKUSTİK GEÇİRGENLİK
SERGİLEYEN SIFIRA YAKIN YOĞUNLUKLU
MERCEK**

Döne ÖZTÜRK

BURDUR, 2019

**T.C.
BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**OLAĞANÜSTÜ AKUSTİK GEÇİRGENLİK
SERGİLEYEN SIFIRA YAKIN YOĞUNLUKLU
MERCEK**

Döne ÖZTÜRK

Danışman: Doç. Dr. Nurettin KÖRÖZLÜ

BURDUR, 2019

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

Döne ÖZTÜRK tarafından **Doç. Dr. Nurettin KÖRÖZLÜ** yönetiminde hazırlanan “**Olağanüstü Akustik Geçirgenlik Sergileyen Sıfıra Yakın Yoğunluklu Mercek**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 12/07/2019

Prof. Dr. Olgun Adem KAYA (Başkan)
İnönü Üniversitesi

(İmza)

Doç. Dr. Ahmet ÇİÇEK (Jüri Üyesi)
Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi

(İmza)

Doç. Dr. Nurettin KÖRÖZLÜ (Jüri Üyesi)
Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi

(İmza)

ONAY

Bu Tez, Enstitü Yönetim Kurulu'nun _____ Tarih ve _____ Sayılı Kararı ile Kabul Edilmiştir.

(İmza)

Prof. Dr. Ayşe Gül MUTLU GÜLMEMİŞ

Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “**Olağanüstü Akustik Geçirgenlik Sergileyen Sıfıra Yakın Yoğunluklu Mercek**” başlıklı bu tezin;

- Kendi çalışmam olduğunu,
- Sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi,
- Bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi,
- Kullandığım verilerde değişiklik yapmadığımı,
- Tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarımı ihlal edici bir davranışımın olmadığını,
- Bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı,
- Bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı,

bildirir, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

12 / 07 / 2019


Döne ÖZTÜRK

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Doç. Dr. Nurettin KÖRÖZLÜ'ye teşekkürlerimi sunarım. Araştırma ve hesaplamalarımnda hiçbir yardımı esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Ahmet ÇİÇEK'e teşekkür ederim.

116F312 No`lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a teşekkür ederim.

Eğitim hayatımın her aşamasında beni her anlamda destekleyen aileme ve eşime sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Temmuz, 2019

Döne ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİL DİZİNİ.....	iii
ÇİZELGE DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ÖZET.....	viii
SUMMARY	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Akustik Odaklama.....	3
2.1.1. Fresnel Merceği	3
2.1.2. Fononik Kristaller ve Akustik Metamalzemeler	5
2.1.3. Negatif Kütle Yoğunluğu	7
2.1.4. Negatif Bulk Modülü.....	9
2.1.5. Negatif Kırılma ve Olağanüstü Akustik Geçirgenlik	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	15
3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)	15
3.2. COMSOL Multiphysics Yazılım Paketi.....	17
3.2.1. Akustik Modül.....	19
3.2.2. Yapısal mekanik modülü	20
3.3. Hesaplama Alanının Belirlenmesi.....	20
3.4. Mercekte Üzerine Yerleştirilecek Dairesel Kavite Yarıçapları ve Membran Kalınlıklarının Belirlenmesi	23
3.5. Dairesel Kavite Sıfıra Yakın Yoğunluk Tayini.....	24
3.6. Faz Farkı Tayini	24
3.7. Kavite Üzerine Yerleştirilmesi ve Optimizasyon	25
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	29
4.1. Mercek Kalınlığının Belirlenmesi	29
4.2. Mercekte Üzerine Yerleştirilen Dairesel Kavite Yarıçapları ve Membran Kalınlıkları.....	29
4.3. Sıfıra Yakın Yoğunluğun Gösterimi	30
4.4. Faz İlişkisi Tayini.....	31
4.5. Dairesel Kavite Üzerine Yerleştirilmesi	34
4.6. Odaklama Sonuçları	35
5. SONUÇ.....	38
KAYNAKLAR.....	40
ÖZGEÇMİŞ.....	44

ŞEKİL DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Fresnel merceği ve geometrik parametreler	4
Şekil 2.2. OAG'den yararlanan düzlemsel Fresnel merceği	5
Şekil 2.3. Bir boyutta, iki boyutta ve üç boyutta fononik kristaller	5
Şekil 2.4. m_1, m_2 kütleli kütle-yay sistemi ve m_1, m_2 kütleli kütle-yay sisteminin etkin kütle davranışı	8
Şekil 3.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin çalışma prensibi	16
Şekil 3.2. (a) bir boyutta, (b)iki boyutta dikdörtgensel, (c) iki boyutta üçgensel ve (d) üç boyutta hexahedral ızgaralama biçimi	17
Şekil 3.3. Empedans tüpünün şematik gösterimi	21
Şekil 3.4. (a) Membran kaplı dairesel kavitelere sıfıra yakın yoğunluğu göstermek için kullanılan hesaplama hacmi, (b) ızgaralanmış hali ve (c) farklı bölgelerde kullanılan farklı ızgaralama biçimi	22
Şekil 3.5. Akustik mercek ve akustik mercekte göz önünde bulundurulmuş geometrik parametreler	26
Şekil 3.6. Akustik merceğin FEM simülasyonlarında kullanılan 3 boyutlu hesaplama hacmi	27
Şekil 3.7. Akustik mercek üzerindeki bir dairesel kavitenin ızgaralama gösterimi	28
Şekil 4.1. 100 μm membran kalınlığı ve 10 mm kavite yarıçapına sahip, sırası ile mercek kalınlığının 2 mm, 5 mm ve 10 mm olduğu rezonans frekans taraması	29
Şekil 4.2. Sırası ile 70 μm , 100 μm , 150 μm ve 200 μm membran kaplı dairesel kavitenin $f_0=2190$ Hz frekansı etrafında iletim ve yansımaya spektrumu	30
Şekil 4.3. Sırası ile 70 μm , 100 μm , 150 μm ve 200 μm membran kaplı dairesel kavitenin $f_0=2190$ Hz frekansı etrafında etkin kırılma indisinin frekansla değişimi	31
Şekil 4.4. (a) Membransız ve membran kalınlığı, (b) 70 μm , (c) 100 μm , (d) 150 μm ve 200 μm olan dairesel kavite için $f_0=2190$ Hz frekansında FEM simülasyon sonuçları	32
Şekil 4.5. Membran kaplı dairesel kavite için $f_0=2190$ Hz frekansında (a) mutlak akustik basıncın ve (b) alan fazının akustik eksen boyunca membran kalınlığına bağlı değişimi	33
Şekil 4.6. Tasarlanan akustik merceğin şematik görüntüsü	34

- Şekil 4.7.** Faz ilişkileri göz önünde bulundurularak optimize edilen gözenekli merceğin sırasıyla (a) $t_m=70 \mu\text{m}$ ve (b) $150 \mu\text{m}$ için $f_L=200 \text{ mm}$ uzakta odaklama özelliklerinin FEM simülasyon sonuçları 35
- Şekil 4.8.** Dairesel kavitelere oluşan ve FP rezonansı içeren mercekte (sol) akustik basıncın mutlak değerinin akustik eksenden geçen kesit düzleminde değişimi, (sağ) basıncın akustik eksen boyunca ve odak düzleminde değişimi 36



ÇİZELGE DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Membran kaplı dairesel kaviteelerin 2190 Hz rezonans frekansı için hesaplanan yarıçap değerlerinin membran kalınlığı ile değişimi.....	30
Tablo 4.2. Dairesel kaviteelerin hesaplanan faz açıları ve membransız dairesel kaviteye göre hesaplanan faz farkları.....	33



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

CM	: COMSOL Multiphysics
FP	: Fabry-Perot
FZP	: Fresnel Zone Plate
FEM	: Finite-Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
HR	: Helmholtz Rezonatörü
OAG	: Olağanüstü Akustik Geçirgenlik
OOG	: Olağanüstü Optik Geçirgenlik
PML	: Perfectly-Matched Layers (Kusursuz Uyuşan Katmanlar)
PSK	: Periyodik Sınır Koşulları
SPL	: Sound Pressure Level
1B	: Bir Boyutlu
2B	: İki Boyutlu
3B	: Üç Boyutlu
t_L	: Mercek kalınlığı
λ	: Dalga boyu
t_m	: Membran kalınlığı
R_i	: Dairesel kavite yarıçapı
f_L	: Odak uzaklığı
r_h	: Yol farkı
φ	: Faz farkı
p	: Akustik basınç alanı
ω	: Açısal frekans
ρ_H	: Havanın yoğunluğu
ρ_K	: Katının yoğunluğu
σ	: Cauchy gerilme tensörü
Ω_H	: Hesaplama alanındaki hava bölgesi
Ω_K	: Hesaplama alanındaki katı bölgesi
\mathbf{f}_k	: Katı sınırındaki normal kuvvet
h_s	: Silindirik hesaplama hacmi
n_{eff}	: Etkin kırılma indisi

ξ_{eff}	: Etkin akustik empedans
T	: Akustik iletim katsayısı
R	: Akustik yansıma katsayısı
f_0	: Rezonans frekansı
V_{pp}	: Tepeden tepeye genlik değeri
d_i	: Dairesel kavite genişliği
R_o	: Dairesel kavitelerin merkezinden hesaplanan yarıçap
E_{Al}	: Alüminyum için Young modülü
ν_{Al}	: Alüminyum için Poisson oranı
μ	: Birim alan başına yoğunluğu
$J_i(Y_j)$: i. Mertebeden birinci (ikinci) tip Bessel Fonksiyonu
$I_i(K_i)$: i. Mertebeden birinci (ikinci) tip modifiye Bessel Fonksiyonu

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Olağanüstü Akustik Geçirgenlik Sergileyen Sıfıra Yakın Yoğunluklu Mercek

Döne ÖZTÜRK

**Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Nurettin KÖRÖZLÜ

Temmuz, 2019

Bu tez çalışmasında membran kaplı akustik metamateryallerde dayalı küçük hacimli ultra ince akustik mercek sayısal hesaplamalarla tasarlanmıştır. Bu mercek, çemberler üzerine dizilmiş farklı kalınlıklarda elastik membran kaplı dairesel kavitelere oluşmaktadır. Duyulabilir bölgede 2190 Hz frekansında odaklama için tasarlanan mercekler 2 mm kalınlığında çelik levhadan üretilmiş ve membran olarak kalınlığı 70 µm ile 200 µm arasında değişen alüminyum folyo kullanılmıştır. Sonlu Elemanlar Yöntemi simülasyonları ile membran kaplı dairesel kaviteler optimize edilmiş ve faz ilişkileri incelenerek mercekler tasarlanmıştır. Tasarımda da komşu dairesel kavitelere terk eden akustik dalgalar arasında küçük faz farkları oluşması sağlanarak klasik Fresnel merceğine göre küçük boyutlarda ve etkin odaklama sağlayan mercekler tasarlanmıştır. Ortaya konulan yaklaşımla akustik merceğin yarıçapı klasik Fresnel merceğine kıyasla teorik olarak %80 oranında küçültülmüştür. Membran kaplı dairesel kavitelere iki boyutta periyodik diziliminin rezonans frekansında sıfıra yakın yoğunluk sergilediği gözlenmiştir. Kırınım limitinin altında ve kırınım limitine yakın odaklama sayısal olarak gösterilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar akustik odaklama gerektiren pek çok uygulamada kullanım olanağı bulabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: akustik metamateryal, akustik odaklama, elastik membran, sıfıra yakın yoğunluk, sonlu elemanlar yöntemi

Hazırlanan bu Yüksek Lisans tezi Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 116F312 proje numarası ile desteklenmiştir.

SUMMARY

M.Sc. Thesis

Near-Zero Density Lens Exhibiting Extraordinary Acoustic Transmission

Döne ÖZTÜRK

**Burdur Mehmet Akif Ersoy University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Nurettin KÖRÖZLÜ

July, 2019

In this Thesis, low-volume ultra-thin acoustic lens based on membrane-covered acoustic metamaterials are designed by numerical calculations. This lens consists of elastic designed to focus at 2190 Hz in the audible frequency range are fabricated from steel plates with a thickness of 2 mm, whereas aluminum foils whose thickness are between 70 μm and 200 μm are employed as membranes. Membrane-covered cavities are optimized through Finite-Element membrane-clad in different thicknesses circular cavities arranged on circles. Lens which are Method simulations and lens are designed by investigating phase relations. By facilitating small phase differences between acoustic waves emanating from neighboring cavities in the designs, lens with considerably smaller sizes with respect to a conventional Fresnel lens which are capable of efficiently focusing sound are designed. With the proposed approach, the radius of the lens has been reduced theoretically by 80% according to Fresnel lens. Membrane-covered circular cavities which periodically aligned in two dimensions are observed to exhibit density-near-zero at the resonance frequency. Sub-wavelength and nearly sub-wavelength focusing are numerically demonstrated. The obtained results of the study can be utilized in a variety applications requiring acoustic focusing.

Keywords: acoustic metamaterials, acoustic focusing, membrane, density near zero, finite-element method

The present M.Sc. Thesis was supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) under the grant number 116F312.

1. GİRİŞ

Soğurma, yönlendirme ve odaklama gibi etkilerle akustik dalgaların manipülasyonu, tıbbi görüntüleme ve terapi, akustik yalıtım, su altı görüntüleme, doğrultusal ses sistemleri ve akustik biyoparçacık manipülasyonu gibi teknolojik uygulamalarda yoğun ilgi çekmektedir (Maldivan, 2013). Bu amaçla, bir malzemenin akustik/elastik özelliklerinin periyodik olarak değiştiği fononik kristaller yaygın olarak kullanılmaktadır. Fononik kristallerde negatif kırılma (Ke vd., 2005; Sukhovich, Jing, ve Page, 2008; S. Yang vd., 2004; Zhang ve Liu, 2004), değişken kırılma indisi (Deng vd., 2009; Huang ve Sun, 2009; Martin vd., 2010; Peng vd., 2010) ve açısız simetrik saçıcılar (Kaya, Cicek, ve Ulug, 2011; Li, Fok, Yin, Bartal, ve Zhang, 2009) gibi mekanizmalarda odaklama ve görüntüleme gösterilmiştir. Fononik kristaller, homojen bir malzeme içerisinde bulunan periyodik dizilmiş yapılardan oluşan bir boyutlu (1B), iki boyutlu (2B) veya üç boyutlu (3B) yapılardır. Fononik kristaller dalga boyu mertebesinde saçıcılar içerdiğinden, pratikte uygulamaları dalga boyuna kıyasla büyük boyutlu yapılar gerektirmektedir.

Akustik metamalzemeler fononik kristallere oranla daha küçük boyutlara sahiptir. Bu nedenle son zamanlarda akustik odaklama için akustik metamalzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Akustik metamalzemeler, dalga boyuna göre çok küçük birimler içeren (Craster ve Guenneau, 2012; Deymier, 2013; Fok, Ambati, ve Zhang, 2008), negatif etkin kütle (Yang vd., 2008) ve bulk modülü (Ding vd., 2007; Li ve Chan 2004; Fang vd., 2006) gibi doğada normal olarak bulunmayan özgün etkiler gösterebilen periyodik yapılardır. Akustik metamalzemelerde gözlenen iki önemli olgu, olağanüstü akustik geçirgenlik ve sıfıra yakın yoğunluktur. Bunlardan ilki üzerinde dalga boyundan küçük boyutlarda açıklıklar bulunan ince levhalardan akustik dalgaların Fabry-Perot rezonanslarına karşılık gelen frekanslarda yüksek geçirgenlikle iletimini sağlamaktadır. Sıfıra yakın yoğunluk ise metamalzemedeki membran kullanılarak açıklıklardaki hava ve su gibi akışkanların topluca yer değiştirmesine dayalı olarak sıfıra yakın etkin kütle sergilemesiyle mümkün olmaktadır. Sıfıra yakın yoğunluklu akustik metamalzemelerde faz hızı ve dalga boyu sonsuza gittiğinden sonlu boyutlardaki metamalzemedeki dalgalar her zaman eş fazlıdır. Sıfıra yakın yoğunluk ayrıca olağanüstü akustik geçirgenlik ile bir arada ele alındığında akustik odaklama gibi uygulamalar için çok ince metamalzemelerin tasarımını mümkün kılar.

Bu tez çalışmasında, doğrusal elastik membran kaplı dairesel kavite­lerin rezonans özellikleri kapsamlı olarak incelenerek literatürdeki örneklere kıyasla daha küçük hacimli ultra ince akustik mercekler sayısal hesaplama yöntemleri ile tasarlanmıştır. Membran kaplı dairesel kavite­lerden çıkan akustik dalga bileşenleri arasındaki faz ilişkilerinden yararlanarak dalga boyu mertebesinde yarıçapa sahip küçük boyutlu bir mercek ortaya konulmuştur. Geliştirilen merceğin boyutlarının küçük olması pratikte uygulanabilirliğini artırmaktadır. Ayrıca membran kaplı dairesel kavite­lerin, yarıçap ve membran kalınlıkları değiştirilerek odak uzaklığı değiştirilebilmektedir.



2. GENEL BİLGİLER

Akustik dalga konusu, madde salınımının hava veya su gibi elastik bir ortamda yayılmasını araştırır ve bu nedenle ortamda enerji aktarımını açıklar. Salınımlı malzemelerin hareketi denge pozisyonuyla sınırlı olsada, titreşim dalgaları uzun mesafelerde yayılabilir ve ortam tarafından yansıtılabilir, kırılabilir, zayıflatılabilir veya daha genel olarak manipüle edilebilir. Salınım frekansına göre, ses dalgaları, ultrasonik ve infrasonik frekans aralığını kapsayan farklı alanlara veya Dünya katmanından geçen enerji dalgaları olan çok daha büyük ölçekte sismik dalgalara sınıflandırılmıştır.

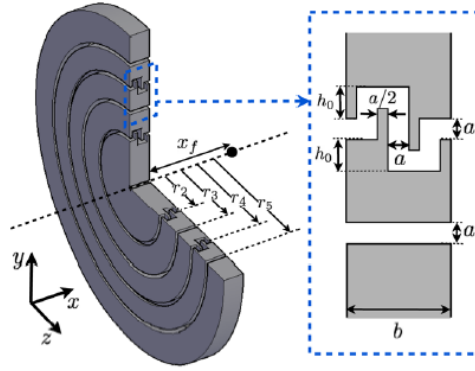
Akustik sinyallerin akustik mercekler ile odaklanması biyomedikal görüntüleme, su altı haritalama ve okyanus jeolojisi gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Ayrıca akustik mercekler, dalgaların yönünü ve yayılmasını kontrol etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sayede akustik mercekler gürültü engellemede, ultrasonik görüntüleme ve diğer birçok uygulamada kullanılmaktadır. Akustik mercek tipik olarak, bir optik lense benzer şekilde birleştirilmiş ortamdan farklı bir ses hızına sahip olan kavisli bir geometriye sahip doğrusal bir malzeme kullanarak çalışır. Son zamanlarda düz akustik mercekler tasarlamak için metamalzemeler ve fononik kristaller kullanılmıştır. Akustik metamalzemeler ve fononik kristaller akustik odaklama için büyük önem taşımaktadır.

2.1. Akustik Odaklama

Akustik odaklama günümüzde denizaltı radarları, tıbbi görüntüleme sistemleri, kanser hücrelerinin yakılması, güzellik merkezlerinde hücre yenileyici olarak ve güvenlik önlem cihazları gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Fononik kristaller, Fresnel Zon Plakası (FZP), düzlemsel mercekler ve akustik metamalzemeler akustik odaklamada tercih edilen mercekler arasındadır. Özellikle düzlemsel mercekler ve FZP mercekler ve kompaktlık açısından daha çok tercih edilir.

2.1.1. Fresnel Merceği

Akustik odaklamanın en güzel örneklerinden birisi de Fresnel merceğidir. Bu mercek dalga boyun mertebesinde boyutlara sahip belirli açıklıklar içeren akustik bir mercektir. Fresnel merceğinin en temel özelliği iki komşu açıklıktan çıkan dalga bileşenleri arasında bir dalga boyu yol farkı olması için,

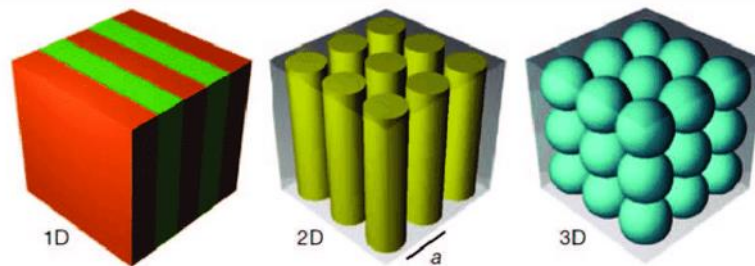


Şekil 2.2. OAG'den yararlanılan düzlemsel Fresnel merceği (Molerón vd., 2014)

FZP merceklerin yarıçaplarını küçültmek için bir yaklaşım Şekil 2.2'deki gibi, merkezdeki dairesel açıklık ve etrafındaki açıklıklardan FP rezonanslarını kullanarak OAG'ye dayanmaktadır (Moleron vd., 2014). Kesit görüntüsü, düz ve kıvrımlı açıklıkları göstermektedir. Düz açıklıkta dalga $\lambda/2$ yol alırken, kıvrımlıda bunun iki katı yol almakta ve π kadar faz farkı oluşmaktadır. Böylece, klasik Fresnel merceğine göre %40 daha küçük yarıçaplı mercek üretilmiştir (Moleron vd., 2014).

2.1.2. Fotonik Kristaller ve Akustik Metamalzemeler

Fotonik kristaller farklı mekanik özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemeden oluşan periyodik yapıda 1B, 2B veya 3B olabilen yapay malzemelerdir (Şekil 2.3). Dalga boyu mertebesinde ölçeklere sahiptirler ve temelde belirli bir frekans aralığındaki mekanik ya da akustik dalgaların geçişine izin vermezler. Bu frekans aralığı fotonik band aralığı olarak adlandırılır (Körözlü, 2017; Xiao-Jian ve You-Hua, 2013). Fotonik band aralığı, kristalde kullanılan malzemenin türüne, kristalin örgüsüne veya kullanılan periyodik yapının şekline bağlıdır. Bu değişkenler değiştirilerek fotonik kristalin fotonik bant aralığı değiştirilebilir (Körözlü, 2017).



Şekil 2.3. Bir boyutta, iki boyutta ve üç boyutta fotonik kristaller

Band aralığı özelliği sayesinde yol kenarına periyodik olarak dizilmiş ağaçlar aracılığı ile duyulabilir ses bölgesindeki araç ses dalgalarını yansıtarak çevresel gürültü kirliliğinin azalması sağlanmaktadır (Martínez-Sala vd., 2006). Son dönemlerde ses dalgalarını klavuzlamak için de fononik kristaller kullanılmıştır (Körözlü, 2017). Periyodik yapılarda bir sıra periyodik yapının kaldırılması oluşan boşlukta akustik dalgalarının klavuzlandığı gösterilmiştir (Körözlü, 2017; Vasseur vd., 2007). Ayrıca fononik kristal dalga kılavuzları fononik kristalin keskin açılı kısımlarında bükme özelliği göstererek akustik dalgaların fononik kristal yüzeyince yön değiştirdiği gösterilmiştir (Khelif, Choujaa, Benchabane, Djafari-Rouhani, ve Laude, 2004).

Fononik kristaller akustik metamalzeme olarak tasarlanabilirler. ‘Meta’ ifadesi Yunancada ‘ötesi’ anlamına gelir ve bu tür malzemeler doğada kendiliğinden bulunmadığı için bu tür malzemelere malzeme ötesi anlamına gelen ‘metamalzemeler’ denilmiştir. Doğal malzemelerden farklı olarak metamalzemelerin özellikleri, tasarlanmış birim hücrelerin rezonansından kaynaklanır. Başlangıçta bu rezonatörlerin, dalga boyu mertebesinde ölçeklere sahip olması gerektiği düşünülmüştür. Bu durumda yüksek frekanslı sinyaller için akustik metamalzeme oluşturmak mümkün olmuştur, fakat düşük frekanslı sinyaller için akustik metamalzeme oluşturmak mümkün olmamıştır. Sonraları düşük frekanslarda akustik metamalzeme oluşturmak için dalga boyundan daha küçük ölçeklerde çalışılabileceği anlaşılmıştır. Konvansiyonel atomdan daha büyük ve yayılan dalga boyundan çok daha küçük boyutlu "meta-atomlar" olarak tanımlanan periyodik veya rastgele yapay yapılardan oluşan metamalzemeler ile düşük frekanslarda da dalgaların kontrolü ve manipülasyonu sağlanmıştır.

Fononik kristaller ve akustik metamalzemeler negatif kırılma (Ke vd., 2005; Sukhovich vd., 2008; S. Yang vd., 2004; Zhang ve Liu, 2004) gibi benzersiz kırılma özelliklerine sahiptir. Akustik dalgaların negatif kırılması, elektromanyetik ve optik metamalzemelerde de görülen elektromanyetik dalgaların negatif kırılmasına benzer. Negatif kırılma, dalga grubu hız vektörü (enerjinin yayılma yönü) ile dalga vektörü antiparalel olduğunda elde edilir. Elektromanyetik metamalzemelerde olağan dışı kırılma, çift negatif malzeme olarak adlandırılan dielektrik geçirgenlik (ϵ) ve manyetik geçirgenliğin (μ) bir arada negatif olması ile sağlanır. Akustik dalgaların negatif kırılması ise hem etkin kütle yoğunluğunun (ρ) (Z. Yang, Mei, Yang, Chan, ve Sheng, 2008) hem de bulk modülün (β) (Y. Ding, Liu, Qiu, ve Shi, 2007; Fang vd., 2006; Li ve Chan, 2004) negatif olduğu çift negatif akustik metamalzemelerle sağlanabilir. Etkin kütle ve bulk modülünün çifte

negatifliği, belirli bir monopolar ve dipolar rezonans frekans aralığında bir arada bulunmasından kaynaklanmaktadır. Bu iki parametreye bağlı kırılma indisi n ve empedans Z (D. Lee, Nguyen, ve Rho, 2017) aşağıdaki ifadedeki gibidir;

$$n = \sqrt{\frac{\rho}{\beta}} \text{ (akustik)} \quad n = \sqrt{\epsilon\mu} \text{ (elektromanyetizma)} \quad (2.2)$$

$$Z = \sqrt{\rho\beta} \text{ (akustik)} \quad Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \text{ (elektromanyeyizma)} \quad (2.3)$$

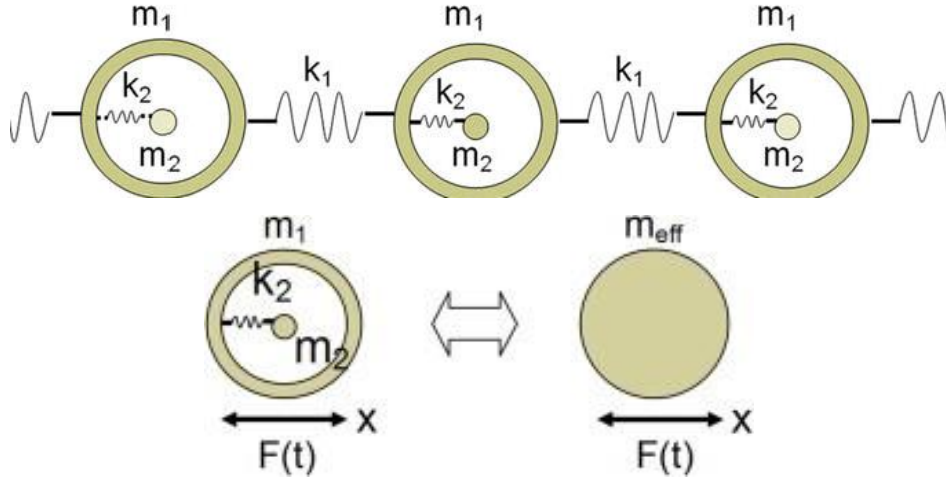
Akustik dalgaların yayılması bir malzemenin kütle yoğunluğu ve bulk modülü ile kontrol edilir (D. Lee vd., 2017). Kütle yoğunluğu ve bulk modülüne bağlı akustik dalga denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\nabla P^2 - \frac{\rho}{\beta} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0 \quad (2.4)$$

Burada P basınç, ρ malzemenin kütle yoğunluğu ve β malzemenin bulk modülüdür. Fiziksel olarak, kütle yoğunluğu, birim hacim başına kütle olarak tanımlanmaktadır ve bulk modülü, ortamın harici bir sıkıştırma kuvvetine karşı direncini yansıtmaktadır.

2.1.3. Negatif Kütle Yoğunluğu

Fiziksel olarak kütle yoğunluğu, birim hacim başına kütle olarak tanımlanır. Normal homojen bir malzemede kütle yoğunluğu her zaman pozitif iken akustik meta malzemelerde negatif olabilmektedir (Z. Yang vd., 2008). Pozitif kütle yoğunluğuna sahip doğal malzemelere aykırı olarak negatif kütle modülü, harici bir itme kuvvetinin etkisi ile kuvvetinin zıttı yönünde hareketlenmesidir (Huang ve Sun, 2009).



Şekil 2.4. m_1, m_2 kütleli kütle-yay sistemi ve m_1, m_2 kütleli kütle-yay sisteminin etkin kütle davranışı (Huang ve Sun, 2009)

Etkin kütle yoğunluğunun fiziksel yapısı Şekil 2.4'te verilen bir kütle-yay sistemi ile açıklanabilir. Şekil 2.4'de m_1 kütlelerinin boşluğuna yerleştirilen m_2 kütlesi k yay sabitli yay ile m_1 kütlelerine birleştirilmiştir. Kütleler ω açısal frekanslı bir dış $F(\omega)$ kuvveti altında sürtünmesiz olarak titreştiğini varsayalım. Newton'un 2. yasası gereği bu sistemin hareket denklemi;

$$m_1 \ddot{x}_1 - k(x_2 - x_1) = F \quad (2.5)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - k(x_2 - x_1) = 0 \quad (2.6)$$

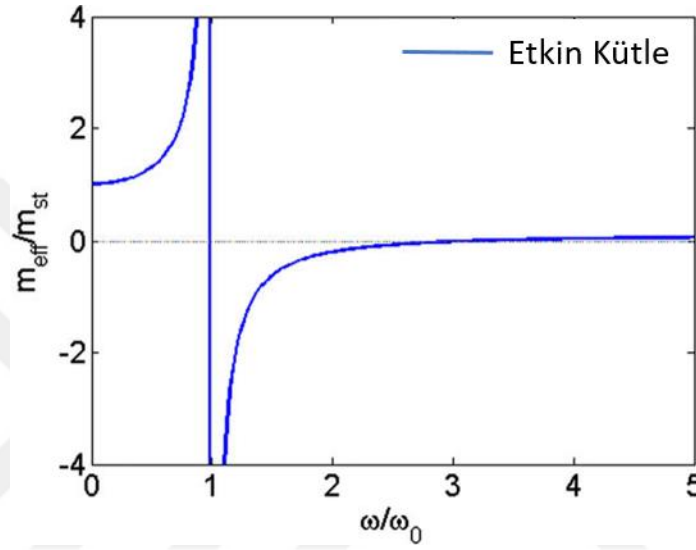
x_1 ve x_2 sırasıyla m_1 ve m_2 kütlelerinin yer değiştirmeleridir ve $\omega_0 = \sqrt{k/m_2}$ yerel rezonans frekansıdır. Bu hareket denkleminin çözümü aşağıdaki gibidir:

$$F = \left(m_1 + \frac{k}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \ddot{x}_1 \quad (2.7)$$

Yukarıdaki bu denklem m_1 ve m_2 kütleli iki nesneye sahip bir sistemde dış kuvvet rezonans frekansı yakınlığında titreştiğinde homojen tek bir nesneli sistem gibi davranacağını ve etkin bir kütle olduğunu gösterir. Etkin kütle;

$$m_{eff} = m_1 + \frac{k}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (2.8)$$

Bu denklemden, dış kuvvet rezonans frekansı yakınlarında titreştiğinde $\left(\omega_0 < \omega < \sqrt{\frac{k}{m_1} + \omega_0^2} \right)$ etkin kütle m_{eff} 'in negatif olabileceği (Şekil 2.5) çıkarılabilir.



Şekil 2.5. Kütle yay sisteminde etkin kütlenin açısal frekansla değişimi

Negatif kütle yoğunluğunun fiziksel yorumu ittiğimiz bir parçacığın bize doğru (ters yönde) ivmelenmesidir. Genellikle akustik metamalzemelerde negatif kütle yoğunluğu, kütle yay sistemini bir kütle ve bir yaya karşılık gelen, katı bir ızgara ve bir membran sistemi ile elde edilebilir. Bu sistemde ızgara, kütle rolünü ve membran, yay rolünü oynar. Şekil 2.9'da verilen yapı membranlı yapıya örnektir. Rezonatörler arasına yerleştirilen membranlar ile negatif kütle yoğunluğu elde edilmiştir.

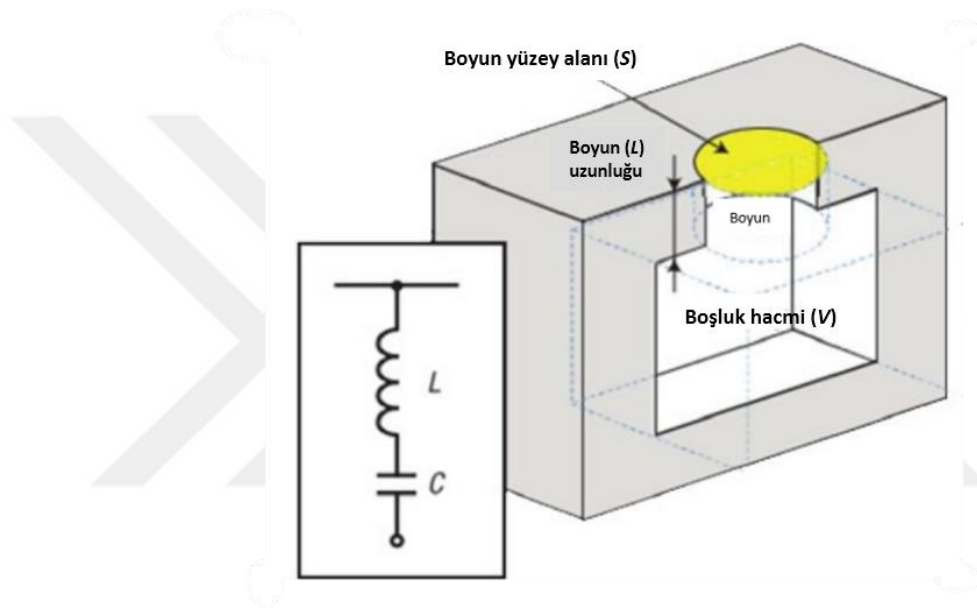
2.1.4. Negatif Bulk Modülü

Bulk modülü malzemenin harici bir eş yönlü basınca karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Basınç değişimi;

$$\Delta P = -B \frac{\Delta V}{V} \quad (2.9)$$

olarak verilir ve burada $\Delta P, \Delta V/V, B$ sırası ile basınç değişimi, hacim gerilimi, bulk modülüdür (Fok vd., 2008).

Normal homojen malzemelerde bulk modülü pozitif iken akustik metamalzemelerde negatif olabilmektedir (Fang vd., 2006; Li ve Chan, 2004; Vasseur vd., 2007). Bulk modülü de kütle yoğunluğu gibi akustik metamalzemelerde etkin bulk modülü olarak tanımlanabilir (C. Ding, Hao, ve Zhao, 2010; Fang vd., 2006; S. H. Lee, Park, Seo, Wang, ve Kim, 2009). Etkin bulk modülünün fiziksel yapısı Şekil 2.6'da gösterilen Helmholtz Rezonatörüdür (HR). HR, büyük bir boşluk ve dar bir boyundan oluşur.



Şekil 2.6. Helmholtz rezonatörü ve eşdeğer LC devresi (S. H. Lee vd., 2009)

Etkin bulk modülü (Fang vd., 2006) aşağıdaki denklem ile tanımlanmıştır:

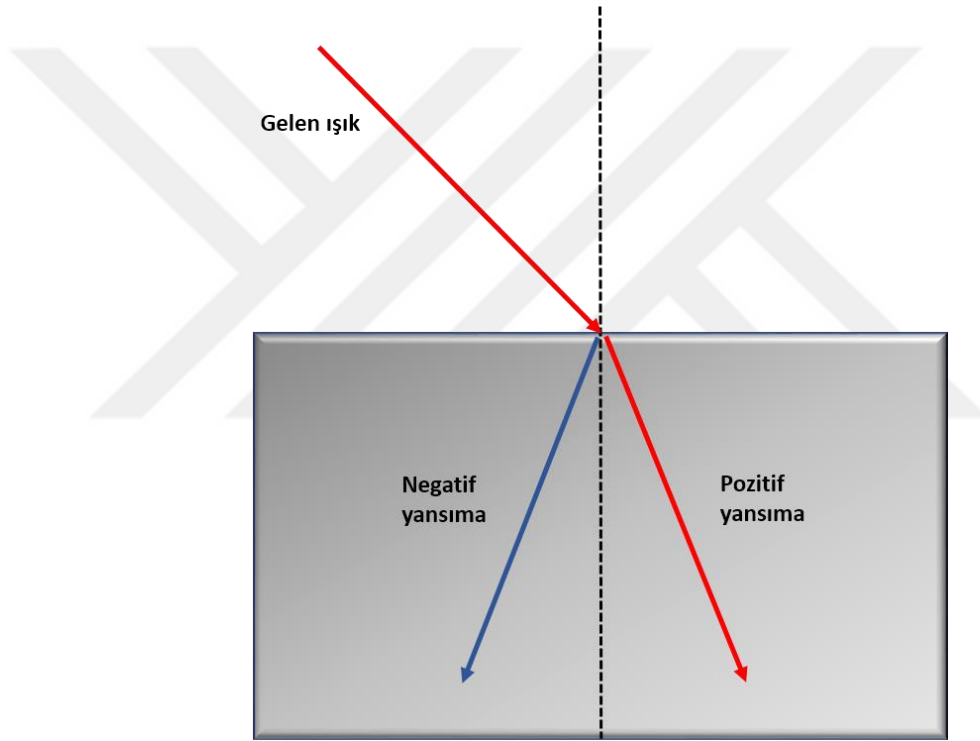
$$B_{et}^{-1} = B_0^{-1} \left[1 - \frac{F \omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\Gamma \omega} \right] \quad (2.10)$$

Burada F geometrik faktör, ω_0 rezonans açısal frekansı ve Γ (dissipation loss) HR'nin yayma kaybıdır. Denklemden de anlaşılacağı gibi dış kuvvet rezonans frekansı yakınında titreştiğinde etkin bulk modülü negatif bir değere ulaşabiliyor. Negatif bulk modülünün fiziksel anlamı dış kuvvet ile sıkıştırılan boşluğun genişlemesidir. Doğada bulunan homojen bir malzemede dış sıkıştırma kuvvetine karşı boşluğun daralması ve bulk modülünün pozitif

olması gerekir. Fakat, akustik metamalzemelerde bir dış kuvvet ile sıkıştırılan boşluk genişler ve negatif bulk modülü elde edilebilir.

2.1.5. Negatif Kırılma ve Olağanüstü Akustik Geçirgenlik

Negatif kırılma ilk olarak elektromanyetik malzemelerde gösterilmiştir. Bu sayede görünmezlik pelerini çalışmaları ortaya atılmıştır. Bir ortamın elektromanyetik özelliklerini belirleyen ϵ ve μ parametrelerinin bir arada negatif olması ile elektromanyetik meta malzemelerde negatif kırılma gözlenir. Elektromanyetik dalgalarda kırılma indisinin ϵ ve μ 'ye bağlılığı $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ denklemindeki gibidir.



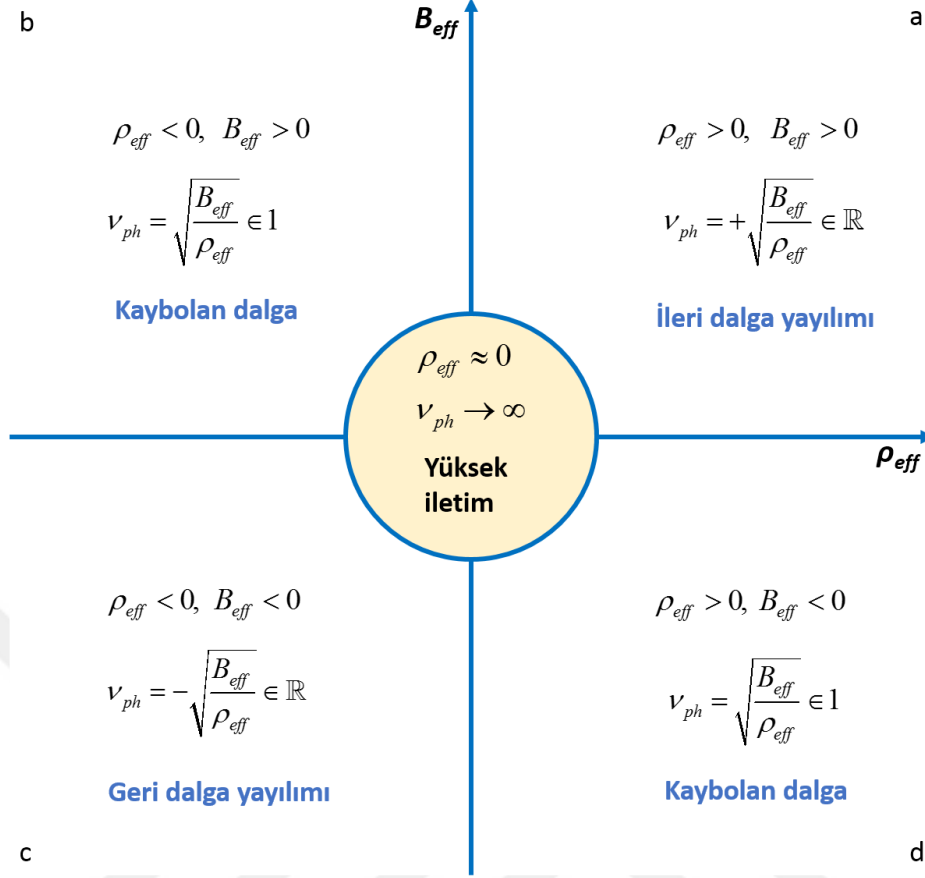
Şekil 2.7. Ortam değiştiren ışık ışınının pozitif ve negatif kırılmasının şematik gösterimi

Normal bir malzeme üzerine gelen bir dalga, malzemeyi normale yaklaşarak terk etmesi gerekirken bu tür metamalzemelerde aksi yönde ilerleyerek malzemeyi terk eder (Şekil 2.7). Bu olaya negatif kırılma denir.

Akustik dalgalar için ise malzemenin kütle yoğunluğu ve bulk modülü akustik dalganın yayılımını belirler. Akustik meta malzemelerde kütle yoğunluğu ve bulk modülünün bir arada negatif olması halinde grup hızı $v_{ph} = \sqrt{B/\rho}$ negatif olur ve malzeme

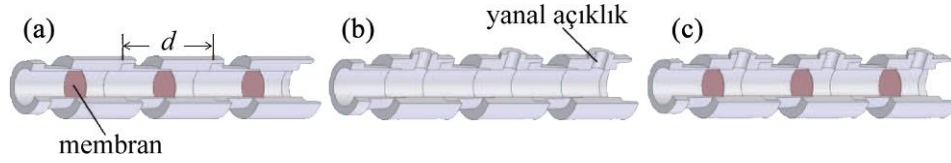
içerisinden geçen dalga negatif yönde kırılır. Kırılma indisinin bulk modülü ve kütle yoğunluğuna bağlılığı $n = \sqrt{\rho/\beta}$ denklemi ile verilir. Metamalzemeler negatif kırılma indisine sahip malzemelerdir.

Akustik metamalzemeler için etkin kütle yoğunluğu ve bulk modülüne bağlı dalga yayılım davranışları Şekil 2.8’de (D. Lee vd., 2017) gösterildiği gibi özetlenmiştir. Kütle yoğunluğu ve bulk modülünün işaretine bağlı olarak akustik dalganın yayılımı değişmekte ve çeşitli davranışlar sergilemektedir. Malzemenin kütle yoğunluğu ve bulk modülünün bir arada pozitif olması ile sağ el yayılımı dediğimiz ileri dalga yayılımı görülür. Malzemenin kütle yoğunluğunun negatif ve bulk modülünün pozitif veya kütle yoğunluğunun pozitif ve bulk modülünün negatif olması ile sönümlü dalga yayılımı gözlenir. Kütle yoğunluğunun ve bulk modülünün bir arada negatif olması ile ise sol el kuralı dediğimiz geri dalga yayılımı görülür. Yani akustik dalgalar negatif yönde kırılarak yayılır ve negatif kırılma görülür. Malzemenin kütle yoğunluğu sıfıra yaklaştığında dalga grup hızı sonsuza gider ve malzeme yüksek geçirgenlik gösterirken OAG gözlenir. OAG bu çalışmada olmasını istediğimiz temel özelliklerden birisidir. Çünkü, olağanüstü akustik geçirgenlik sayesinde metamalzemenin diğer tarafında daha şiddetli bir odaklanma elde edilebilir.



Şekil 2.8. Akustik dalganın metamalzeme etkin kütle yoğunluğu ve bulk modülünün işaretine göre davranış biçimi (D. Lee vd., 2017)

Bu tarz malzemeler sıfır kırılma indisi ve sonsuz grup hızı sergileyerek herhangi bir yansıma ve faz değişikliği olmadan dalga yayılımını sağlarlar. Sıfıra yakın etkin kütle yoğunluğu sergileyen çalışmalar mevcuttur (Jing, Xu, ve Fang, 2012) ve genelde bu yapılar membran içeren yapılardır (Xiao, Ma, Li, Yang, ve Sheng, 2015). Sıfıra yakın yoğunluk gösteren ince delikli dairesel bir membran kullanan metamalzeme yapı önerilmiştir (Park, Lee, Wright, Jung, ve Lee, 2013). Şekil 2.9'daki gösterildiği gibi, periyodik membranlar ekleyerek negatif yoğunluk ve HR ile negatif bulk modülü bileşenlerini bir arada kullanarak iki etkinin de aynı anda elde edildiği çalışmalar mevcuttur (S. H. Lee, Park, Seo, Wang, ve Kim, 2010).



Şekil 2.9. Bir boyutlu akustik metamalzemedede (a) Periyodik membranlar ekleyerek negatif yoğunluk, (b) Helmholtz rezonatörleri ile negatif bulk modülü ve (c) bu bileşenleri bir arada kullanarak iki etkinin aynı anda eldesi. (S. H. Lee, Park, Seo, Wang, ve Kim, 2010)

Şekil 2.9’da görülen membran ve yanıl açıklıkların gerginlik ve yarıçapları değiştirilerek etkin yoğunluk ve bulk modülü ayarlanabilir. Bu sayede sıfıra yakın yoğunluk sergileyen metamalzemeler elde edilebilir.

Bu çalışmada da benzer hedefler gözetilerek; sıfıra yakın yoğunluklu ve OAG sergileyen, düşük frekanslarda, odak uzaklığı belirli parametrelerle değiştirilebilen, membranlı kompakt bir mercek tasarlanmıştır.

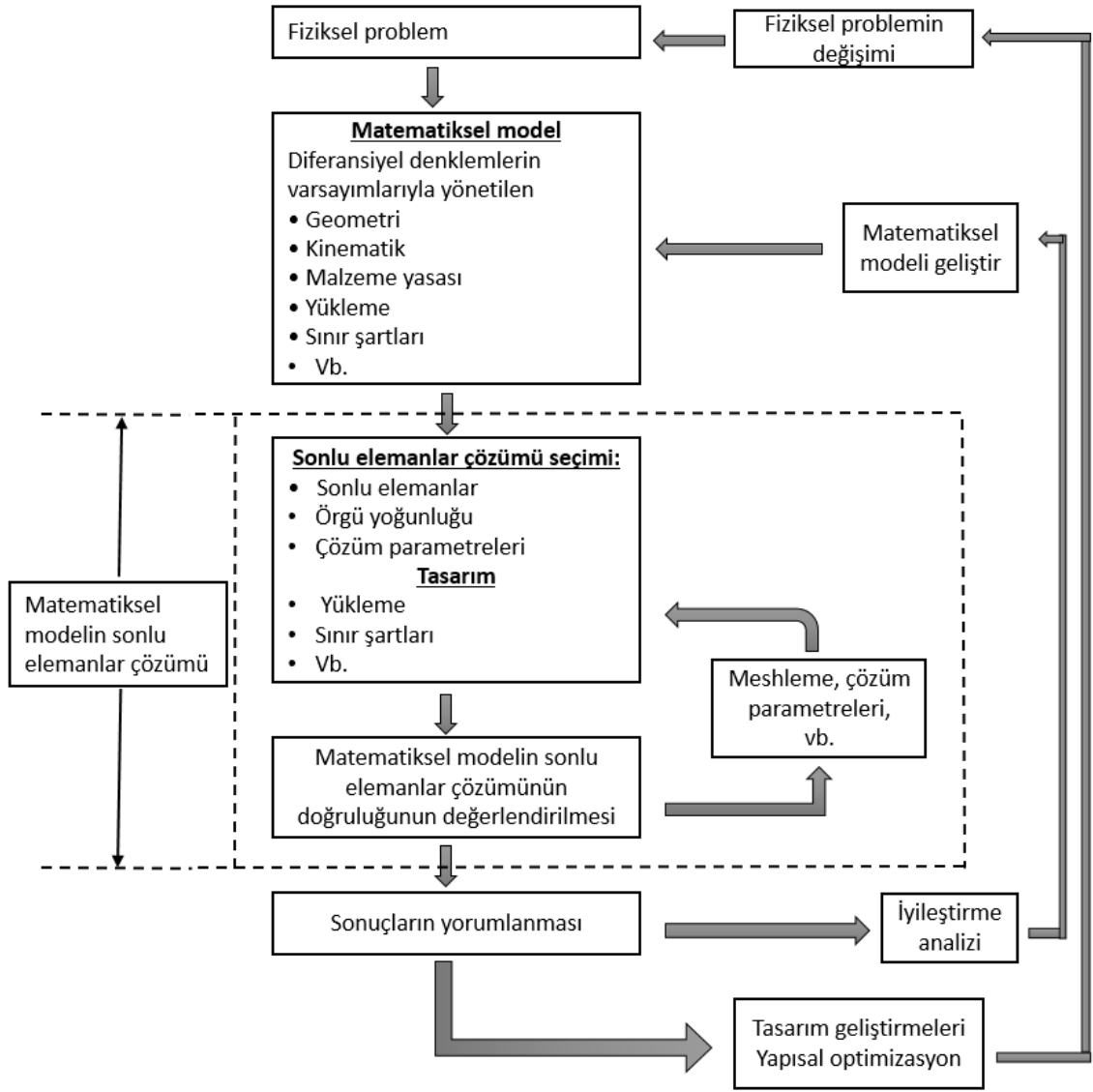
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Akustik metamateryale merceğin tasarımı ve akustik analizi, COMSOL Multiphysics (CM) yazılımı kullanılarak, Sonlu Elemanlar Yöntemi (Yoon, Jensen, ve Sigmund, 2007) (FEM) simülasyonları ile sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım farklı türlerdeki fiziksel problemleri bir arada çözmek için oldukça kullanışlıdır. CM yazılımının en önemli özelliğinden bir tanesi birden çok fizik problemini bir arada çözerek bir sonuca ulaşmasıdır.

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)

Sonlu elemanlar yöntemi değişik disiplinlerdeki, genellikle analitik yöntemlerle çözülemeyen, karmaşık birçok fizik ve mühendislik probleminin çözümü için geliştirilmiş sayısal bir yöntemdir. Problemleri tanımlayan diferansiyel denklemleri birçok cebirsel denklem sistemine dönüştürerek çözüme gider. Sonlu elemanlar yönteminin başlangıcı 1940'lı yıllara uzanmaktadır. Başlangıçta katı cisimler mekaniğinde gerilme ve deformasyon analizi için kullanılmıştır. Günümüzde sonlu elemanlar yönteminin kullanımı ısı transferi, akışkanlar mekaniği, elektrik iletimi ve manyetizma gibi birçok değişik disiplinler arası problemlerin çözümüne kadar uzanmaktadır.

FEM'in kökleri uygulamalı matematik, fizik ve mühendislik olmak üzere üç ayrı araştırma grubuna ayrılabilir. Mühendislik ve bilimdeki fiziksel olguların çoğu, kısmi diferansiyel denklemler dahilinde açıklanabilir. FEM, bu kısmi diferansiyel denklemlerin yaklaşık olarak çözülebilmesini sağlayan sayısal bir yaklaşımdır. Şekil 3.1'de FEM analiz süreci özetlenmiştir.

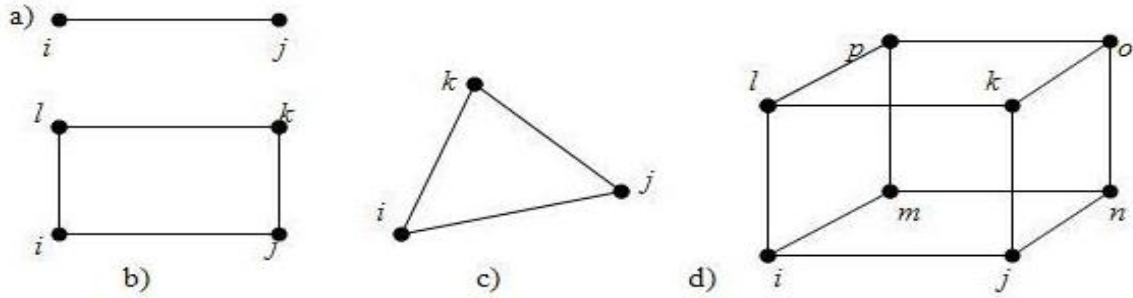


Şekil 3.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin çalışma prensibi (Bathe, 2006)

Fiziksel problem, tipik olarak belli yüklere maruz kalan gerçek bir yapı ya da yapısal bileşen içerir. Fiziksel problem, diferansiyel denklemlerle yönetilen bir matematiksel modele dönüştürülür. Sonlu elemanlar analizi de bu matematiksel modeli çözer. Sonlu elemanlar çözüm tekniği sayısal bir yöntem olduğundan, çözümün doğruluğunu değerlendirmek gerekir. Doğruluk kriterleri karşılamıyorsa yeterli bir doğruluk elde edilene kadar daha ince örgü (ızgaralama) düğüm nodeparametreleriyle tekrarlanmalıdır.

FEM'in temeli ızgaralama yöntemine dayanır. Genellikle elemanlar olarak adlandırılan ve düğümler ile birbirlerine bağlanan cismi sonlu elemanlara bölerek yaklaşık çözümler elde eder. Bu yapı 'sonlu elemanlar ağı' ya da 'ızgaralama' olarak adlandırılır. Ağ yapısını oluşturan işleme de ağ oluşturma ya da ızgaralama denir. Bu ızgaralama birbirlerine

düğüm noktaları dediğimiz noktalar ile bağlanır. Şekilde 3.2’de bir, iki ve üç boyutta problemler için kullanılan ızgaralama örnekleri verilmiştir.



Şekil 3.2. (a) bir boyutta, (b)iki boyutta dikdörtgensel, (c) iki boyutta üçgensel ve (d) üç boyutta hexahedral ızgaralama biçimi (Bathe, 2006)

Linear problemler için çözüm, bir lineer denklemler sistemi ile belirlenir; bilinmeyen sayısı düğümlerin sayısına eşittir. Makul oranda doğruluğa sahip bir çözüm elde etmek için genellikle binlerce düğüme ihtiyaç duyulur, bu nedenle bu denklemlerin çözümünde bilgisayar kullanımı şarttır. FEM her bir düğüm için problemi çözer. Genelde çözümün doğruluğu, elemanların (ve düğümlerin) sayısı arttıkça artar, fakat hesaplama süreci uzar ve böylelikle maliyette artar. Bu yüzden farklı geometriler için ideal düğüm noktası istatistiği geliştirilmiştir ve bu değer 0-1 arasındadır. Bir problem için ideal düğüm noktası 1’e yaklaşmalıdır.

3.2. COMSOL Multiphysics Yazılım Paketi

COMSOL Multiphysics çok sayıda farklı türde bilimsel ve mühendislik problemini modellemek ve çözmek için güçlü bir interaktif ortamdır. Bu yazılım, modelleme için tüm işlemlere erişim sağlayan bir model kurucu ile güçlü bir entegre masaüstü çözüm ortamı sağlar. CM alt modülleri sayesinde birçok fizik problemleri aynı anda çözen çoklu çözen kalıp modellerine genişletilebilir.

Paket programın fizik ara yüzlerini ve malzeme özellikleri için geliştirilmiş desteğini kullanarak, temel denklemleri tanımlamak yerine, ilgili fiziksel nicelikleri (malzeme özellikleri, yükler, sınırlar, kaynaklar ve akışlar gibi) tanımlayarak modeller oluşturmak mümkündür. Bu değişkenleri, ifadeleri veya sayıları her zaman hesaplamalı ağıdan bağımsız olarak katı ve sıvı etki alanlarına, sınırlara, kenarlara ve noktalara doğrudan uygulanabilir. Daha sonra CM tüm modeli temsil eden bir dizi denklemi derler ve çözer.

CM esnek bir grafik kullanıcı arabirimi (GUI) ve Java veya MATLAB dilinde komut dosyası arabirimleri içerir. Bu fizik ara yüzlerini kullanarak aşağıdaki çalışmalar yapılabilir;

- Durağan ve zamana bağlı çalışmalar
- Doğrusal ve doğrusal olmayan çalışmalar
- Öz frekans, kip ve frekans tepkisi çalışmaları

CM modelleri çözerken Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanır. Program sonlu elemanlar analizini ızgaralama ve çeşitli sayısal çözümler kullanarak hata kontrolü ile birlikte çalıştırır.

Çoğu fizik ve mühendislik problemlerini çözmek için kısmi diferansiyel denklemler kullanılır. Kısmi diferansiyel denklemlerin kullanıldığı ve CM ile çözülebilen birçok uygulama alanları şunlardır; akustik, biyobilim, kimyasal reaksiyonlar, korozyon ve korozyon koruması, difüzyon, elektrokimya, elektromanyetik, akışkan dinamiği, yakıt hücreleri ve lektrokimya, jeofizik, ısı transferi, mikroeletromekanik sistemler, mikroakışkanlar, mikrodalga mühendisliği, optik, parçacık izleme, fotonik, plazma fiziği, kaviteli medya akışı, kuantum mekaniği, radyo frekansı bileşenleri, yarı iletken cihazlar, yapı mekaniği, taşıma olayı, dalga yayılımı.

Dünyadaki birçok uygulama, kısmi diferansiyel denklemlerin bir sistemdeki eş zamanlı eşleşmeleri içerir (çoklu iletişim). Örneğin, bir iletkenin elektrik direnci genellikle sıcaklıkla değişir ve akım taşıyan bir iletken modelin dirençli ısıtma etkilerini içermesi gerekir. Birçok önceden tanımlanmış çoklu iletişim arabirimi, ortak çoklu iletişim uygulamaları için kullanımı kolay giriş noktaları sağlar.

CM birçok alt modül içerir. İsteğe bağlı modüller, belirli uygulama alanları için optimize edilmiştir ve disiplin standardı terminoloji ve fizik ara yüzleri sunar. Bazı modüller için ek materyal kütüphaneleri, uzman çözümler, eleman türleri ve görselleştirme araçları da mevcuttur. Bu alt modüller aşağıda sıralanmıştır.

- AC/DC Modülü
- Akustik Modülü
- Aküler ve Yakıt Pilleri Modülü
- CFD Modülü (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
- Kimyasal Reaksiyon Mühendisliği Modülü,
- Korozyon Modülü
- Jeomekanik Modülü
- Isı Transfer Modülü
- MEMS Modülü

- Mikroakışkan Modülü
- Doğrusal Olmayan Yapısal Malzemeler Modülü
- Optimizasyon Modülü
- Parçacık Takip Modülü
- Boru Akış Modülü
- Plazma Modülü
- RF Modülü
- Yapı Mekaniği Modülü
- Yeraltı Akış Modülü

Bu çalışmada probleme uygun olarak CM akustik modülü ve yapısal mekanik modülü kullanılmıştır.

3.2.1. Akustik Modül

Akustik Modülü, akışkanlar ve katı maddelerdeki geniş bir akustik simülasyon kategorisine uyarlanmış CM için bir ara yüz topluluğudur. Akustik modülü şu problemlerin çözümünde kullanılabilir; Frekans alanı ve süreksiz basınç akustiği, akustik yapı etkileşimleri, aeroakustik, sınır modu akustiği, termoakustik, akışlı aeroakustik, sıkıştırılabilir potansiyel akustik, katı mekaniği, piezoelektrik.

Basınç akustiği, Frekans Alanı Arabirimi, bir akışkandaki basınç dalgaları ile ilgili olarak frekans alanındaki çeşitli tipte akustik problemlerinin analizi için tasarlanmıştır.

Frekans alanı problemleri için aşağıdaki homojen olmayan Helmholtz denklemini kullanır.

$$\nabla \left(-\frac{1}{\rho_c} (\Delta p - q) \right) - \frac{\omega^2 p}{\rho_c c_c^2} = Q \quad (3.1)$$

Bu denklemde basınç $p = p(x, \omega)$ 'e bağlıdır ve ρ yoğunluk, c_c ses hızı, ω açısal frekanstır. Sönümlenme olduğu zaman ρ_c ve c_c karmaşık değerler alırlar. Farklı malzemelerde yoğunlukların değiştiği durumlarda, yoğunluğun denkleme dahil edilmesi gerekir.

Basınç akustiği uygulamaları için, toplam dalgaya ek olarak dağılık dalga analizi eklenebilir. Kusursuz Uyuşan Katmanlar (PML), açık boruların ve sınırsız alanlara sahip diğer modellerin doğru simülasyonlarını sağlar. Yani PML bu tür sınırlarda kullanılarak

mükemmel bir dalga emici görevini üstlenerek geometrinin devamlılığını sağlar. PML'nin empedansı arka plan ortamı ile uyumlu olduğu için dalgaların yansımalarını önler ve kompleks denklem yapısındaki sanal kısımdan dolayı dalgaların sönümlenmesini sağlar.

3.2.2. Yapısal mekanik modülü

Yapısal mekanik modülü, yapı ve katı mekaniği alanındaki soruları ara yüzler ekleyerek çözer. Örneğin ışık ve hücre (Shell) ara yüzleri gibi. Bu modülün fizik arabirimleri çoklu fiziksel özelliklere sahiptir. Fizik ara yüzleri:

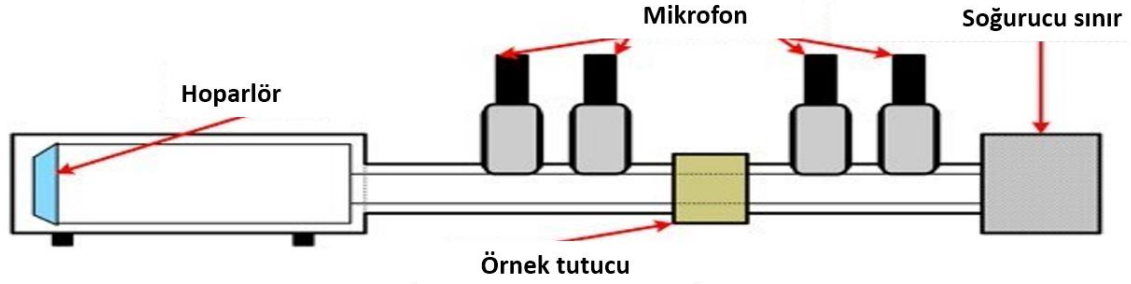
- Katı mekaniği için, iki boyutta düzlem gerilme ve düzlem gerilme, eksenel simetri ve üç boyutlu katılar
- Piezoelektrik modelleme
- 2D ve 3D ışınlar, Euler teoremi

Bu modüllerin çalışma özellikleri arasında statik, öz frekans, zamana bağımlılık, frekans tepkisi, sürtünme ve parametrik çalışmalar bulunur. Ayrıca doğrusal elastik ve viskoelastik malzemeler için tanımlanmış ara yüzleri de vardır. İzotropik, ortotropik ve tamamen anizotropik malzemeler tanımlanabilir ve malzeme özelliklerini belirlemek için yerel koordinat sistemleri kullanılabilir. Büyük ölçekli deformasyon hesaplamaları yapılabilir.

3.3. Hesaplama Alanının Belirlenmesi

Deneysel karşılığı empedans tüpü olan bir simülasyon modeli tasarlandı. Bu simülasyon modeli, FEM ile COMSOL Multiphysics yazılım programı kullanılarak üç boyutta frekansa bağlı akustik basınç ve katı mekaniği modülü ile yapıldı.

Modellemeyi daha iyi anlayabilmek için empedans tüpünü biraz inceleyelim. Empedans tüpü sesin yansıma, iletim ve yutum katsayılarını belirleyen bir sistemdir. Akustik özellikleri incelenecek olan malzeme empedans tüpünün orta kısmına yerleştirilir ve ses dalgaları malzemeye gönderilir. Malzemeden iletilen ve yansıyan ses dalgalarını ölçerek, elde edilen yüzey empedansından yutum katsayısı hesaplanır. Şekilde 3.3'te görüldüğü gibi empedans tüpünün bir ucunda ses dalgaları üreten kaynak, orta kısmında akustik özellikleri belirlenecek olan malzeme yer alır. Numunenin ön ve arka kısımlarına belirli mesafede iletilen ve yansıyan ses dalgalarını ölçmek için mikrofon yer alır. Tüpün diğer ucunda ise akustik dalga emici yer alır ve böylelikle ses dalgalarının yansiyarak geri dönmesini engeller.



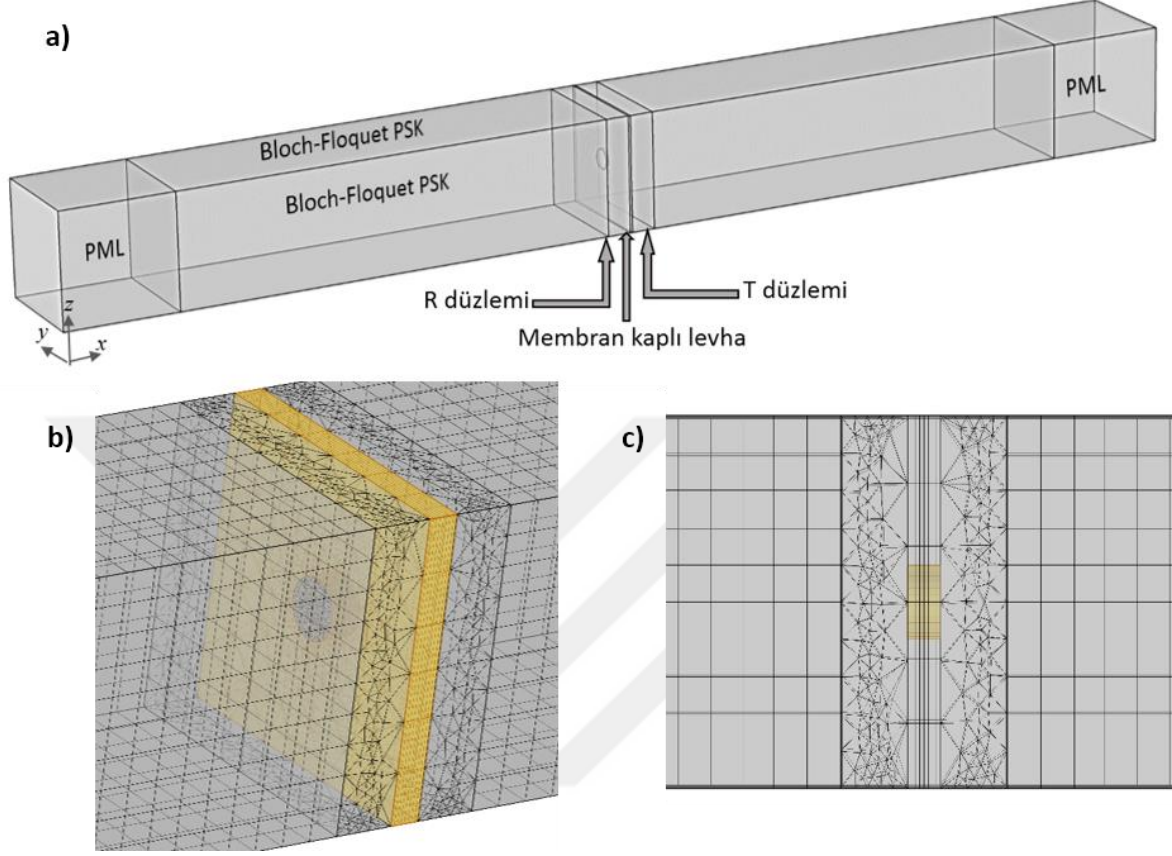
Şekil 3.3. Empedans tüpünün şematik gösterimi

Çalışmada tasarlanan mercek periyodik olarak dizilmiş membran kaplı dairesel kaviteler içermektedir. Bu dairesel kavitelerin $2B$ periyodik durumda etkin kırılma indisleri ve empedansları pratikte empedans tüpüne sayısal olarak karşılık gelen kare prizma biçimli hesaplama hacmi (Şekil 3.4(a)) kullanılarak ayrı ayrı her dairesel kavite için belirlenmiştir (C. Ding vd., 2010).

Empedans tüpündeki gibi prizma alanının orta kısmına orta noktasında r_c yarıçaplı dairesel kavite içeren alüminyum levha yerleştirilmiştir. Bu alüminyum levhanın kalınlığı üretim kolaylığı ve akustik basınç alanına etkisi göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Dairesel kavitelerin ses dalgası geliş yüzeyine t_m kalınlığında yapısal olarak doğrusal alüminyum membran eklenmiştir. Bu membran merceğe metamalzeme özelliği kazandıracak ve aynı zamanda odak uzaklığının ayarlanmasında rol oynayacaktır. Alüminyum levhanın ön ve arka yüzüne belirli mesafede iletim (T) ve yansıma (R) katlarını ölçebilmek için iletim ve yansıma düzlemleri eklendi. COMSOL bu T ve R düzlemleri üzerinde bu düzlemlere çarpan ses dalgaları üzerinde bir ortalama olarak iletim ve yansıma katsayılarını hesaplamaktadır. Burada hesaplama hacminin x eksenine dik sınırları PML ile tanımlanmıştır. Öte yandan, yanal sınırları Bloch-Floquet Periyodik Sınır Koşulları (PSK) ile tanımlanmıştır. Hesaplamalarda a kare prizmanın kenar uzunluğu ve r_c dairesel kavitenin yarıçapı olmak üzere $r_c \ll a$ seçilerek PSK ile ilişkilendirilen komşu hücreler arasındaki etkileşim en aza indirgenmiştir.

Projede bütün FEM simülasyonları $3B$ yürütülmüştür. Doğruluk oranı yüksek simülasyonların bilgisayar kaynaklarını etkin kullanarak yürütülmesi için Şekil 3.4(b)'deki gibi uyarlamalı ızgaralama (Adaptive Meshing) kullanılmıştır. Izgaralama işlemi hesaplama alanının her bölümünde ayrı yapılmıştır. Çünkü küçük alanlar daha sık ızgaralama gerektirmektedir. Kare prizma hesaplama alanında, yani hava bölgelerinde ızgara boyutu en

fazla $\lambda/10$ olacak şekilde ızgaralama yapılmıştır. Katı levha, dairesel kavite ve membran boyutları ile orantılı olacak şekilde daha sık ızgaralanmıştır (Şekil 3.4(c)).



Şekil 3.4. (a) Membran kaplı dairesel kavitelere sıfıra yakın yoğunluğu göstermek için kullanılan hesaplama hacmi, (b) ızgaralanmış hali ve (c) farklı bölgelerde kullanılan farklı ızgaralama biçimi

Mercekte yer alacak dairesel kavite için yarıçapı ve membran kalınlıkları bu hesaplama alanı ile hesaplanmıştır. Elde edilen bütün dairesel kavitelere sıfıra yakın yoğunluk göstermeleri ve olağanüstü akustik geçirgenlik sağlamaları için etkin kırılma indisi (n_{eff}) ve empedans (ζ_{eff}) hesaplamaları yapılmıştır. Elde edilen dairesel kavite üzerine yerleştirilmesi faz farkı hesabı ile yapılmış olup, mercek için ayrı bir hesaplama alanı modellenmiştir. Hesaplamalar aşağıda başlıklar altında sırası ile anlatılmaktadır.

3.4. Mercekte Üzerine Yerleştirilecek Dairesel Kavite Yarıçapları ve Membran Kalınlıklarının Belirlenmesi

COMSOL Multifizik programının akustik modülü ve katı mekaniği modülü kullanılarak yukarıda anlatılan kare prizma hesaplama alanı içerisinde (Şekil 3.4) akustik basınç dağılımı ve rezonans frekansı hesaplamaları yapıldı. Merceğin elde edilebilmesi için $f_0=2190$ Hz frekansında rezonans sağlayan delik yarıçapları ve membran kalınlıkları hesaplandı.

Membransız dairesel kavitede; kavite yarıçapı değişken seçilerek f_0 'da rezonans veren r_0 (membransız kavite yarıçapı) frekans taraması yapılarak belirlendi. Membran kaplı dairesel kavite ise $t_{m1}=70$ μm , $t_{m2}=100$ μm , $t_{m3}=150$ μm , $t_{m4}=200$ μm membran kalınlıkları için $f_0=2190$ Hz frekansında rezonansa gelmesi için gerekli r_c yarıçapları (r_1, r_2, r_3, r_4) frekans taraması yapılarak belirlendi. Çeperinden sabitlenmiş membran kaplı dairesel kavitenin temel titreşim kipinin rezonans frekansı Kirchhoff-Love ince levha teorisi kapsamında analitik olarak aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir (Blevins, 2015):

$$f_{00} = \frac{\lambda_{00}^2}{2\pi r_c^2} \sqrt{\frac{E_{Al} t_m^3}{12\mu(1-\nu_{Al}^2)}} \quad (3.2)$$

$$J_i(\lambda_{00}) I_{i+1}(\lambda_{00}) + I_i(\lambda_{00}) J_{i+1}(\lambda_{00}) = 0 \quad (3.3)$$

Burada f_{00} temel titreşim kipinin rezonans frekansı, r_c , halkasal kavitenin merkezinden hesaplanan yarıçap, E_{Al} ve ν_{Al} sırasıyla alüminyum membranın Young modülü ve Poisson oranı, μ de membranın birim alan başına yoğunluğudur. J_i (Y_i) ve I_i (K_i) sırasıyla $i=0$ ve 1. mertebeden birinci (ikinci) tip Bessel ve modifiye Bessel fonksiyonlarıdır. Yukarıdaki membran kalınlıkları için Şekil 3.4'deki hesaplama modeli kullanılarak r_c yarıçapları FEM simülasyonları ile belirlenmiştir. Bu değerler Eşitlik 3.2 ve 3.3'den hesaplanan değerler ile uyumlu olup mercek optimizasyonunda temel alınmıştır.

Mercek üzerine yerleştirilmek üzere bir tane membransız dairesel kavite (r_0) ve dört tane alüminyum membran kaplı dairesel kavite (r_1, r_2, r_3, r_4) elde edilmiş oldu. Elde edilen bütün dairesel kaviteelerde sıfıra yakın yoğunluk göstermeleri ve olağanüstü akustik geçirgenlik sağlamaları için n_{eff} ve ζ_{ef} hesaplamaları yapılmıştır.

3.5. Dairesel Kaviterin Sıfıra Yakın Yoğunluk Tayini

Membranlı dairesel kaviterlerde n_{eff} hesabı yapıldı. Çünkü tasarlamak istediğimiz merceğin olağanüstü akustik geçirgen olmasını ve sıfıra yakın yoğunluk göstermesini istiyoruz. Daha önce de belirtildiği gibi, bir metamalzemedeki kütle yoğunluğu sıfıra yaklaşırsa ise dalga grup hızı sonsuza gider ve olağanüstü geçirgenlik meydana gelir. Olağanüstü akustik geçirgenlik sayesinde metamalzemenin diğer tarafında daha şiddetli bir odaklanma elde edebiliriz.

n_{eff} ve ξ_{eff} hesaplarında membranla kaplı dairesel kaviteden geçen ve yansıyan dalgalar için T ve R katsayıları kullanılmıştır (Fokin, Ambati, Sun, ve Zhang, 2007). Bunun için membran kaplı levhadan saçılan akustik basınç alanının Şekil 3.4(a)'da R düzlemi ve T düzlemi olarak gösterilen alanlar üzerinde ortalaması alınmıştır. r ve x ,

$$r = \pm \sqrt{(R^2 - T^2 - 1) - 4T^2}, \quad x = (1 - R^2 + T^2 + r)/2T \quad (3.4)$$

olarak tanımlanırsa n_{eff} ve ξ_{eff} ,

$$n = \frac{-i \log x + 2\pi m}{kd} \quad (3.5a)$$

$$\xi = \frac{r}{1 - 2R + R^2 - T^2} \quad (3.5b)$$

eşitlikleri elde edilir (Fokin vd., 2007). Burada m ortam yoğunluklarının birbirine oranıdır.

FEM simülasyonlarından elde edilen R ve T değişimleri Eşitlik 3.4 ve 3.5'i çözmek için yazılan MATLAB kodunda kullanılarak n_{eff} ve ξ_{eff} elde edilmiş ve rezonans frekansı etrafında sıfıra yakın yoğunluk gösterilmiştir.

3.6. Faz Farkı Tayini

Aynı frekansta rezonans veren bu dört dairesel kavitenin mercek üzerinde yerleşimi membransız deliğe göre faz farklarından yararlanılarak yapılmıştır. Membransız kavite merceğin orta noktasına yerleştirilmiş ve referans olarak kabul edilmiştir.

Faz hesabı akustik basınç dağılımından elde edilmiştir. Eşitlik 3.1'deki akustik basınç dağılımının çözümünden elde edilen akustik basınç;

$$p = p_0 e^{i(kz - wt + \varphi)} \quad (3.7)$$

şeklindedir. Bu akustik basıncın reel ve sanal kısmı;

$$\text{Re}(p) = \cos(kz - wt + \varphi) \quad (3.8)$$

$$\text{Im}(p) = \sin(kz - wt + \varphi) \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilir. Kaviterin faz açılarının reel ve sanal akustik basınca bağıllığı, akustik eksen boyunca,

$$\Phi(z) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(p(z))}{\text{Re}(p(z))} \right) \quad (3.10)$$

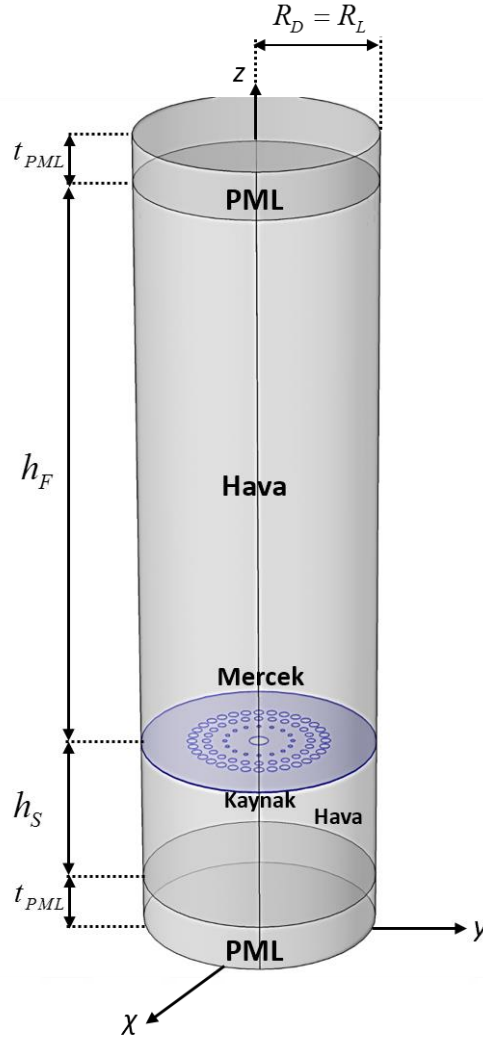
şeklinde ifade edilir. Kaviterin faz farkları $\text{Re}(p)$ ve $\text{Im}(p)$ kullanılarak hesaplanmıştır. Dairesel kaviterin membransız dairesel kaviteye göre faz farkları; membranlı dairesel kaviterin faz açısından, membransız dairesel kavitenin faz açısı çıkarılarak elde edilmiştir.

$$\Delta\Phi(z) = \Phi_{\text{membranlı}} - \Phi_{\text{membransız}} \quad (3.11)$$

Her dairesel kavitenin membransız dairesel kaviteye göre faz farkı bu denkleme göre hesaplanmıştır. Kaviter dairesel alüminyum levha üzerine bu faz farklarından yararlanılarak yerleştirilmiştir.

3.7. Kaviterin Mercek Üzerine Yerleştirilmesi ve Optimizasyon

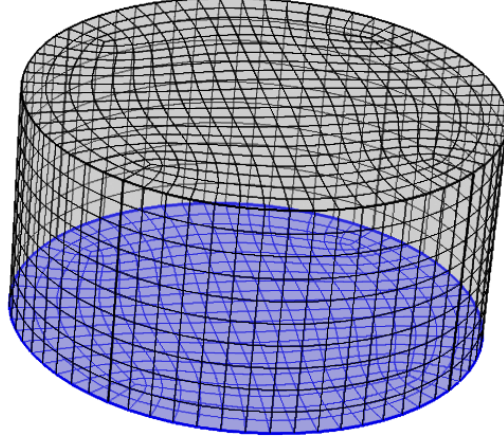
Kaviterin mercek üzerine yerleştirilmesi Fresnel prensibinden yola çıkarak yapılmıştır. Fresnel prensibine göre komşu iki açıklıktan çıkan dalga bileşenleri arasında bir dalga boyu yol farkı (yani 2π faz farkı) olması için Eşitlik 2.1 koşulunun sağlanması gerekmektedir. Bu durumda akustik enerji odak noktasında etkin olarak yoğunlaştırılabilir. Ancak mercede komşu açıklıklar arasında merceğin hemen üzerinde $0 < \Delta\Phi < \pi/2$ faz farkı olduğundan R_i (dairese kaviterin merkezden uzaklığı) yarıçapları;



Şekil 3.6. Akustik merceğin FEM simülasyonlarında kullanılan 3 boyutlu hesaplama hacmi

FEM simülasyonlarında Şekil 3.6'daki hesaplama hacmi z doğrultusunda PML ile sonlandırılmıştır (Berenger, 1994). Öte yandan radyal doğrultuda düzlem dalgalar için soğuran sınır koşulları tercih edilmiştir (Yoon vd., 2007). Sınır koşullarının seçimi hesaplama hacmini terk eden dalga bileşenlerinin istenmeyen yansımalarını en aza indirgeyecek biçimdedir.

Kullanılan bu hesaplama alanında ızgaralama işlemi her bölgede ızgara sıklığı ve ızgaralama şekli farklı olacak şekilde yapıldı. Silindirik hesaplama alanında ızgara boyutu en fazla $\lambda/10$ olacak şekilde seçilmiştir. Mercek üzerindeki dairesel kavite ve membranlar ayrı ayrı daha sık ızgaralandı. Çünkü dairesel kavite ve membran boyutları daha küçük olduğu için sık ızgaralama ile daha iyi sonuçlar vermektedir.



Şekil 3.7. Akustik mercek üzerindeki bir dairesel kavitenin ızgaralama gösterimi

Şekil 3.7’de bir dairesel kavitenin ızgaralanmış hali gösterilmiştir. Mavi ile gösterilen yüzey membranı göstermektedir.

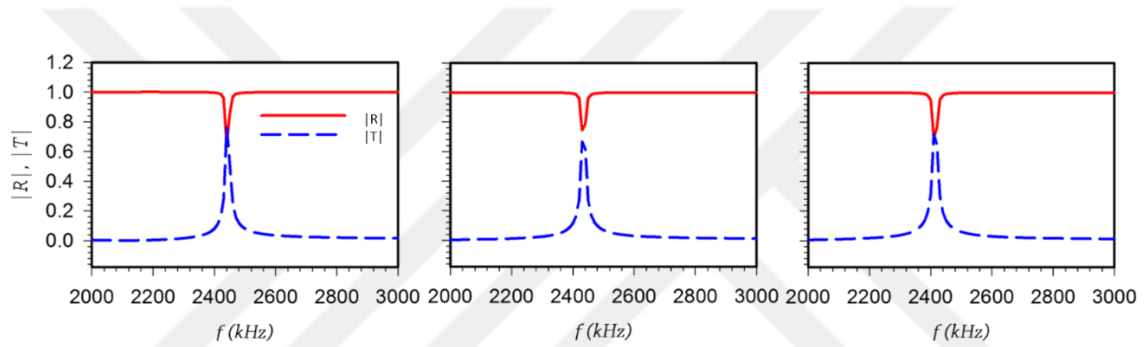
Izgaralama işleminden sonra model akustik basınç alanı taramak için hazır hale gelmiş durumdadır. Elde edilen bu modellemede akustik basınç dağılımı, akustik odak uzaklığı (F) ve odak derinliği (OD) hesaplandı.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Mercek Kalınlığının Belirlenmesi

Tasarımda ilk olarak mercek kalınlığı belirlendi. Merceğin kalınlığı iki sebeple önemlidir. Bunlardan ilki, çok ince olması durumunda merceğin titreşim kipleri uyarılır ve merceğin kendisi rezonansa gelen bir plakaya dönüşür. Bu yüzden ses titreşimlerinden etkilenecek kadar ince bir mercek olmamalıdır. İkincisi ise mercek çok kalın olursa, kullanım açısından zorluk oluşturacaktır. Bu yüzden çok kalın bir mercek olmamalıdır.

Mercek kalınlığını belirlemek için birtakım hesaplamalar yapıldı. Mercek kalınlığı belirlenirken, rezonans frekansının mercek kalınlığından etkilenip etkilenmediğine bakıldı.



Şekil 4.1. 100 µm membran kalınlığı ve 10 mm kavite yarıçapına sahip, sırası ile mercek kalınlığının 2 mm, 5 mm ve 10 mm olduğu rezonans frekans taraması

Mercek kalınlığı, $t_L=2$ mm, $t_L=5$ mm ve $t_L=10$ mm için rezonans frekansı çizdirildi (Şekil 4.1) ve rezonans frekansının mercek kalınlığı ile değişmediği gözlemlendi. Bu yüzden mercek kalınlığı, yukarıda bahsedilen iki önemli unsur göz önüne alınarak, $t_L=2$ mm seçildi.

4.2. Mercekte Üzerine Yerleştirilen Dairesel Kavite Yarıçapları ve Membran Kalınlıkları

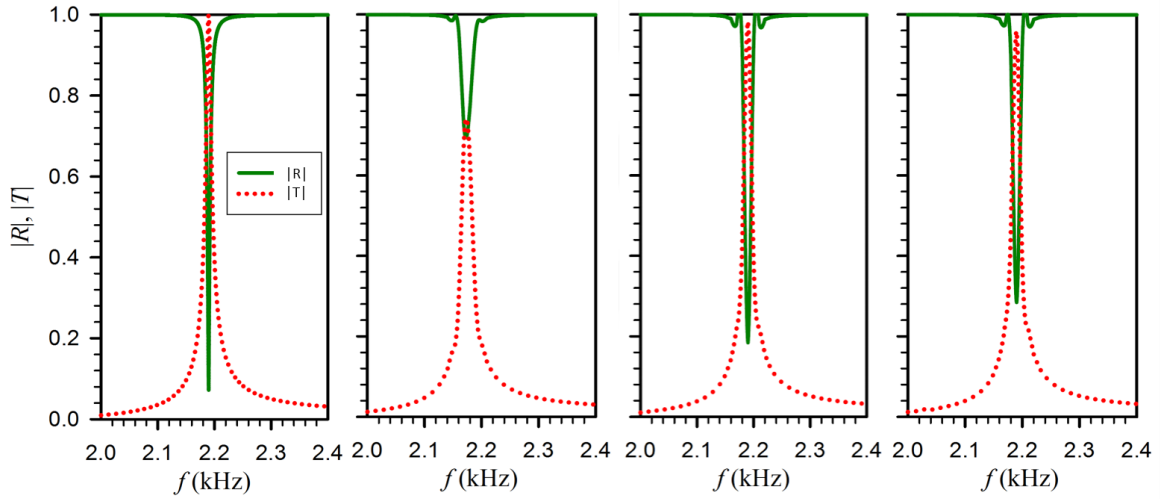
Membransız yapıda kavitenin yarıçapı değişken tanımlanarak $f_0=2190$ Hz frekansında rezonans veren dairesel kavitenin yarıçapı (20.4 mm) Tablo 4.1’te verilmiştir. Membranlı yapıda ise membran olarak alüminyum kullanıldı ve alüminyum membranın kalınlığı piyasada bulunabilecek kalınlıklarda (70 µm, 100 µm, 150 µm ve 200 µm) seçildi. Membran kalınlıkları bu değerlerde sabit tutularak 2190 Hz de rezonans veren dairesel kavite yarıçapları belirlendi.

Tablo 4.1. Membran kaplı dairesel kavite için 2190 Hz rezonans frekansında hesaplanan yarıçap değerlerinin membran kalınlığı ile değişimi

$t_m (\mu m)^a$	0	70	100	150	200
$r_c (mm)^b$	20.4	8.8	10.60	13.0	15.0

^aMembran kalınlığı; ^bDairesel kavite yarıçapı

Tablo 4.1’de 2190 Hz frekansında rezonans veren membran kalınlıkları ve kavite yarıçapları verilmiştir. Membran kalınlığı arttıkça dairesel kavitenin doğru orantılı olarak yarıçapının arttığı gözlemlenmiştir. Farklı membran kaplı dairesel kavite için rezonans frekansları etrafında iletim ve yansımalar Şekil 4.2’de verilmiştir.



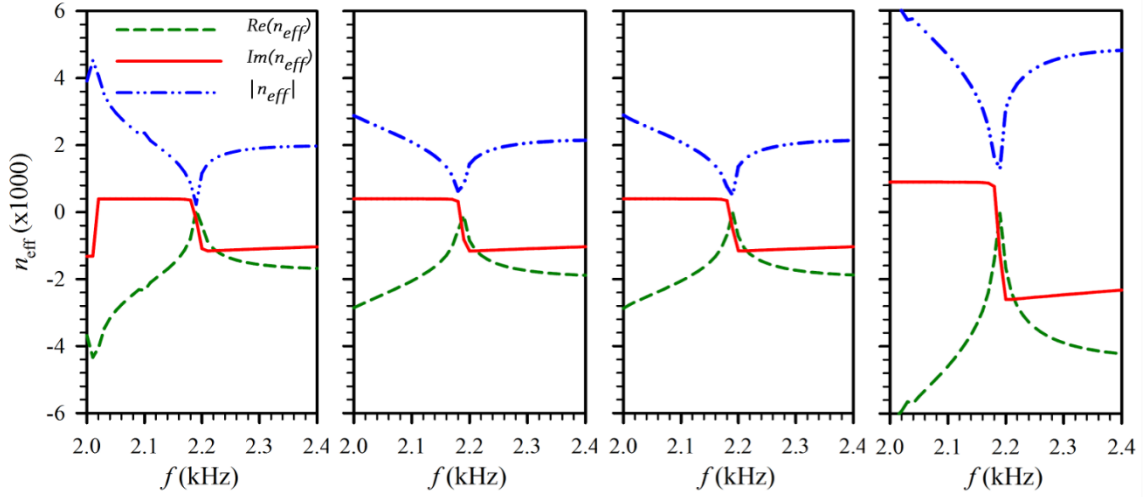
Şekil 4.2. Sırası ile 70 μm , 100 μm , 150 μm ve 200 μm membran kaplı dairesel kavitenin $f_0=2190$ Hz frekansında iletim ve yansımalar spektrumu

Bütün membran kalınlıkları için $f_0=2190$ Hz frekansında $|T|$, 1’e yaklaşırken $|R|$, 0’a yaklaşmaktadır. Rezonans iletim piki yarı genişliği 100 Hz mertebesindedir. Buradaki dairesel kavite Şekil 3.4(a)’daki sınır koşullarından dolayı iki boyutta periyodik olduğundan Şekil 4.2’de gözlenen olay olağanüstü akustik geçirgenliğe bir örnektir.

4.3. Sıfıra Yakın Yoğunluğun Gösterimi

Kompleks R ve T ’nin frekansa bağıllığı kullanılarak Eşitlik 3.4 ve 3.5 yardımı ile Şekil 3.4’te modellenen dairesel kavite için etkin kırılma indisleri ve empedansları hesaplanmıştır. Şekil 4.3’de $t_{m1}=70 \mu m$, $t_{m2}=100 \mu m$, $t_{m3}=150 \mu m$ ve $t_{m4}=200 \mu m$ için etkin

kırılma indisinin mutlak değerinin, gerçel ve sanal kısımlarının frekansla değişimi verilmiştir.

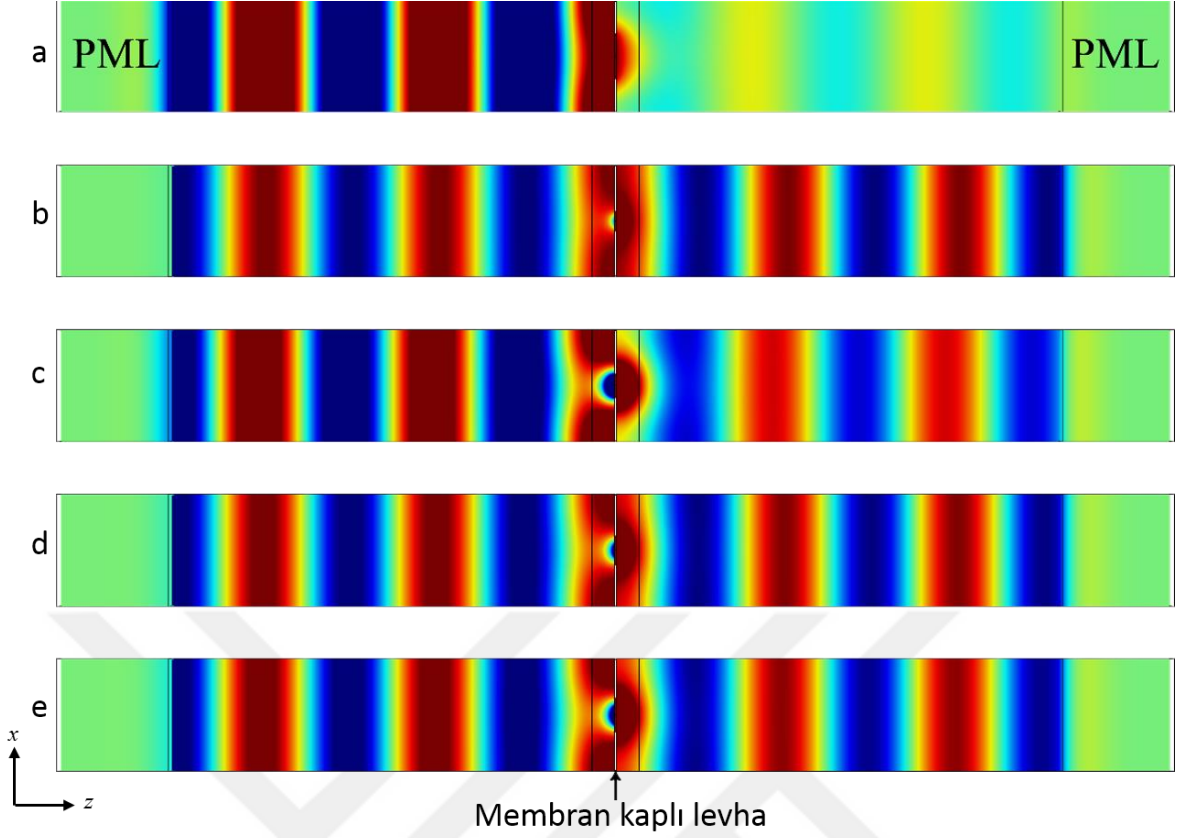


Şekil 4.3. Sırası ile 70 μm , 100 μm , 150 μm ve 200 μm membran kaplı dairesel kavitenin $f_0=2190$ Hz frekansı etrafında etkin kırılma indisinin frekansla değişimi

Bütün membranlı kavite rezonans frekansında $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ işaret değiştirmektedir. Ayrıca, $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ hızla sifira yaklaşmaktadır. Bunların sonucu olarak $|n_{\text{eff}}|$ 'in sifira yaklaşmasıyla sifira yakın yoğunluk elde edilmiş olur.

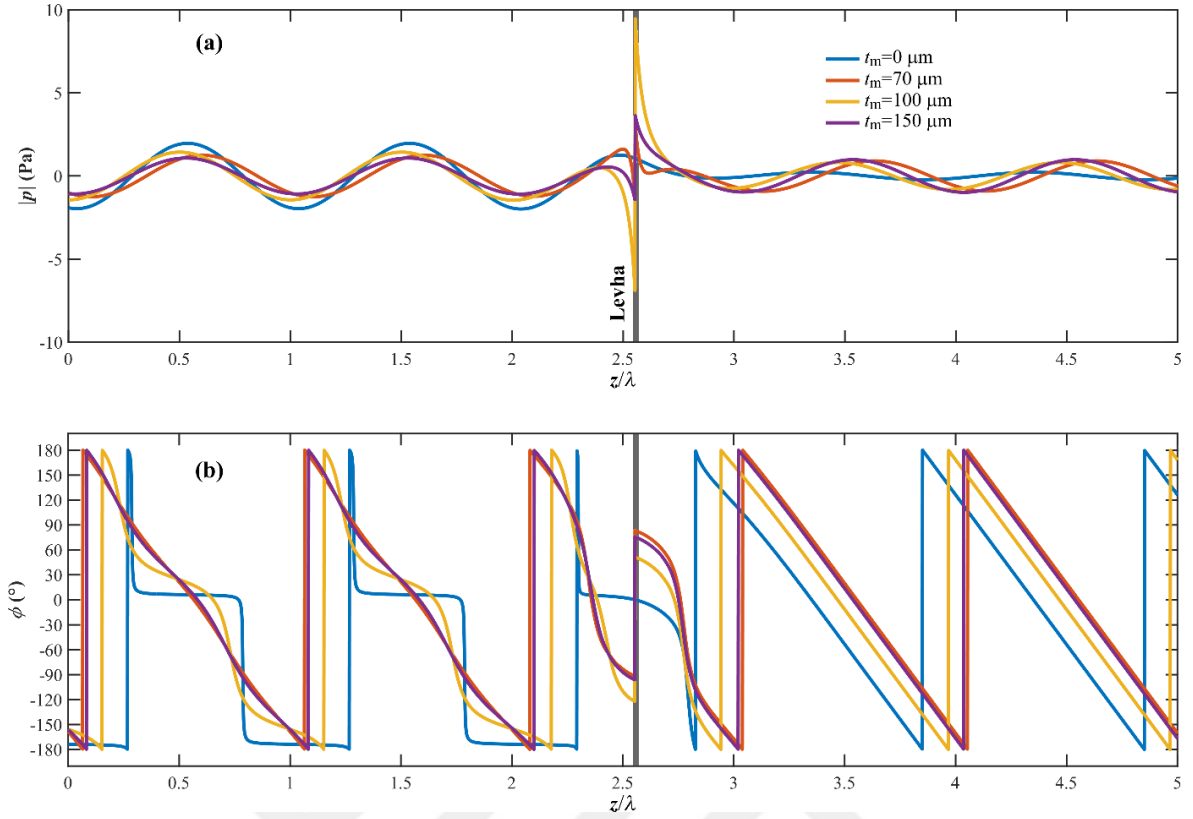
4.4. Faz İlişkisi Tayini

Membran kaplı olan ve olmayan dairesel kavite rezonans frekansında $f_0=2190$ Hz frekansında Şekil 3.4'deki model ile hesaplanan FEM simülasyon sonuçları mutlak basınç alanı cinsinden Şekil 4.4'de verilmiştir. Şekil 4.4'de görüldüğü gibi membranlı kavite rezonans frekansında akustik dalgaların sağ tarafa iletimi maksimum olmaktadır. Dairesel kavite rezonans frekansında basınç alanının değişimi yakından incelendiğinde, en üstteki membran kaplı olmayan dairesel kavitede sürekli bir geçiş görülmektedir. Ancak, membran kaplı dairesel kavite rezonans frekansında geçiş süreksizdir ve membran kaplı dairesel kaviteden geçerken akustik dalgaların faz değiştirdiği açıkça görülmektedir. Bu sonuç mercek tasarımında kullanılmıştır.



Şekil 4.4. (a) Membransız ve membran kalınlığı, (b) 70 μm , (c) 100 μm , (d) 150 μm ve 200 μm olan dairesel kavite için $f_0=2190$ Hz frekansında FEM simülasyon sonuçları

Tablo 4.1’de geometrik parametreleri verilen membran kaplı dairesel kavite için Şekil 3.4’deki modelde $f_0=2190$ Hz frekansında akustik eksen boyunca mutlak basınç değişimleri Şekil 4.5(a)’da verilmiştir. Mavi çizgi ile gösterilen veriler membran kaplı olmayan dairesel kaviteye aittir ve levha boyunca basınç alanının değişimi süreklidir. Ancak, empedans süreksizliğinden dolayı membran kaplı dairesel kavite için levha boyunca sıçrama görülmektedir. Farklı kalınlıklar için sıçrama düzeyi farklıdır. Bu da membran kaplı dairesel kaviteye göre levha boyunca 180° ’den küçük faz farkına neden olmaktadır.



Şekil 4.5. Membran kapı dairesel kavite için $f_0=2190$ Hz frekansında (a) mutlak akustik basıncın ve (b) alan fazının akustik eksen boyunca membran kalınlığına bağlı değişimi

Şekil 4.5(a)'da verilen basınç alanı değişimi verileri ve Eşitlik 3.10 kullanılarak hesaplan akustik eksen boyunca faz değişimleri Şekil 4.5(b)'de verilmiştir. Levhadan $f_L=200$ mm uzakta membransız dairesel kavite referans alınarak hesaplanan faz farkları Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Dairesel kavite için hesaplanan faz açıları ve membransız dairesel kaviteye göre hesaplanan faz farkları

t_m (μm) ^a	$\text{Re}(p)$ ^b	$\text{Im}(p)$ ^c	ϕ ($^\circ$) ^d	$\Delta\phi$ ($^\circ$) ^e
0	-0,19	0,119	147,9404	0
70	0,267	0,959	74,442	73,298
100	-0,229	0,781	106,3419	41,9757
150	0,158	0,968	80,72975	67,023
200	0,056	0,957	86,66302	60,9689

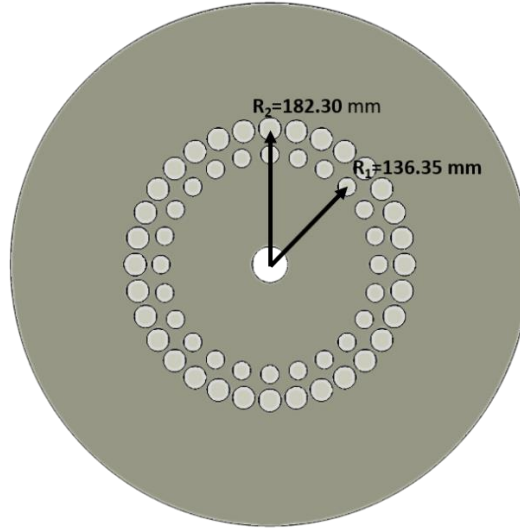
^aMembran kalınlığı; ^bReel akustik basınç; ^cSanal akustik basınç; ^dFaz açısı; ^eFaz farkı

Dairesel kaviteler, bu faz farklarına göre odak noktasındaki faz farkını yok edecek şekilde mercek üzerine yerleştirildi.

4.5. Dairesel Kaviteilerin Mercek Üzerine Yerleştirilmesi

Dairesel kaviteeler odak noktasındaki ($f_L=200$ mm) faz farkı dalga boyunun tam katları olacak şekilde mercek üzerine yerleştirildi. Referans kabul edilen membransız delik merceğin merkezine yerleştirildi. Membranlı daireseel kaviteelerin merkezden uzaklıkları, membransız daireseel kaviteeye göre elde edilen Tablo 4.2'deki faz farklarından yararlanılarak Eşitlik 3.13'e göre hesaplandı. Membransız daireseel kavite referans olarak alındığı için merceğin merkezine yerleştirildi ve $R_0=20,40$ mm olmuş durumdadır. $t_L=2$ mm için 70 μm , 100 μm , 150 μm ve 200 μm kalınlığında membrana sahip daireseel kavitenin merkezden uzaklıkları Eşitlik 3.13'e göre 200 mm uzaklıkta rezonans verecek şekilde hesaplandığında sırası ile $R_1=136,3554$ mm, $R_2=173,2275$ mm, $R_3=182,2931$ mm ve $R_4=165,0125$ mm elde edilmiştir.

Hesaplanan verilere göre mercek üzerine daireseel kaviteeler yerleştirilmek istendiğinde bazı daireseel kaviteeler iç içe geçmektedir. Bu nedenle elde edilen membranlı daireseel kaviteelerden sadece 70 μm ve 150 μm kalınlığında membrana sahip daireseel kaviteeler kullanıldı.



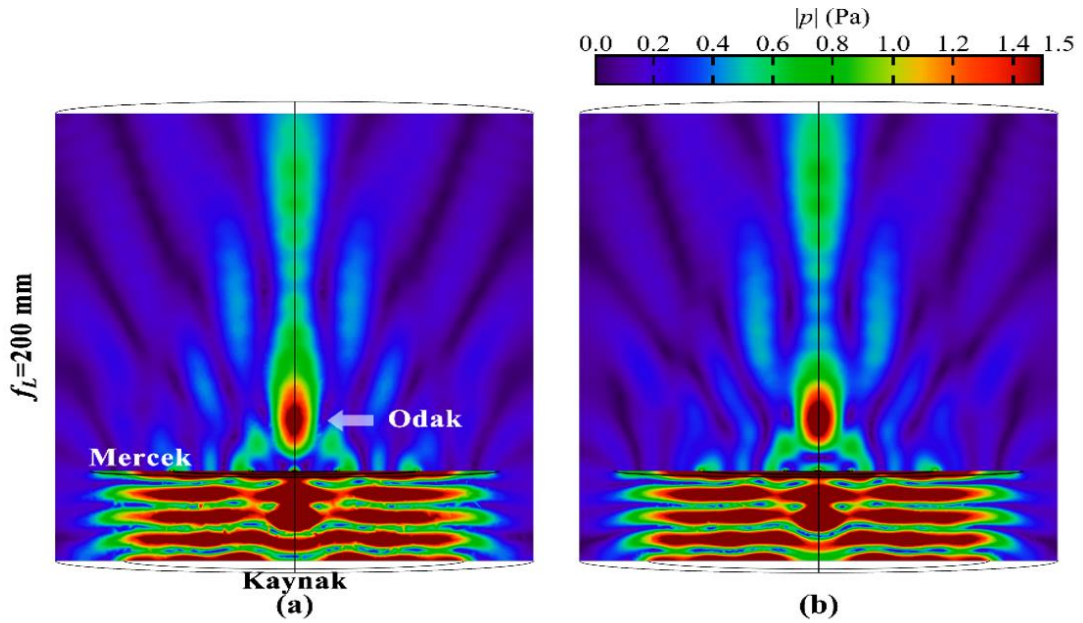
Şekil 4.6. Tasarlanan akustik merceğin şematik görüntüsü

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi 70 μm kalınlığında membrana sahip daireseel kavitee merkezden $R_1=136,3554$ mm uzaklığa $N_1=24$ adet olacak şekilde, 150 μm kalınlığında membrana sahip

dairesel kavite merkezden $R_2=182,2931$ mm uzaklığa $N_2=32$ adet olacak şekilde yerleştirilmiştir. Dairesel kavite sayıları seçilirken maksimum düzeyde ses dalgalarını karşıya geçirebilmesi için halka üzerine sığabilecek maksimum sayıda dairesel kavite seçilmiştir. Merceklerin yarıçapı $R_L=250$ mm alınmıştır.

4.6. Odaklama Sonuçları

Optimizasyon Şekil 3.6’da verilen hesaplama hacmi içerisinde yapılmıştır. Yalnızca $70 \mu\text{m}$ ve $150 \mu\text{m}$ kalınlığında membran kaplı $N_1=24$ ve $N_2=32$ olmak üzere iki sıra dairesel kavite içeren ve $t_L=2,0$ mm kalınlığında levhadan oluşan merceğin 2190 Hz frekansında FEM simülasyon sonuçları Şekil 4.7’de verilmiştir.



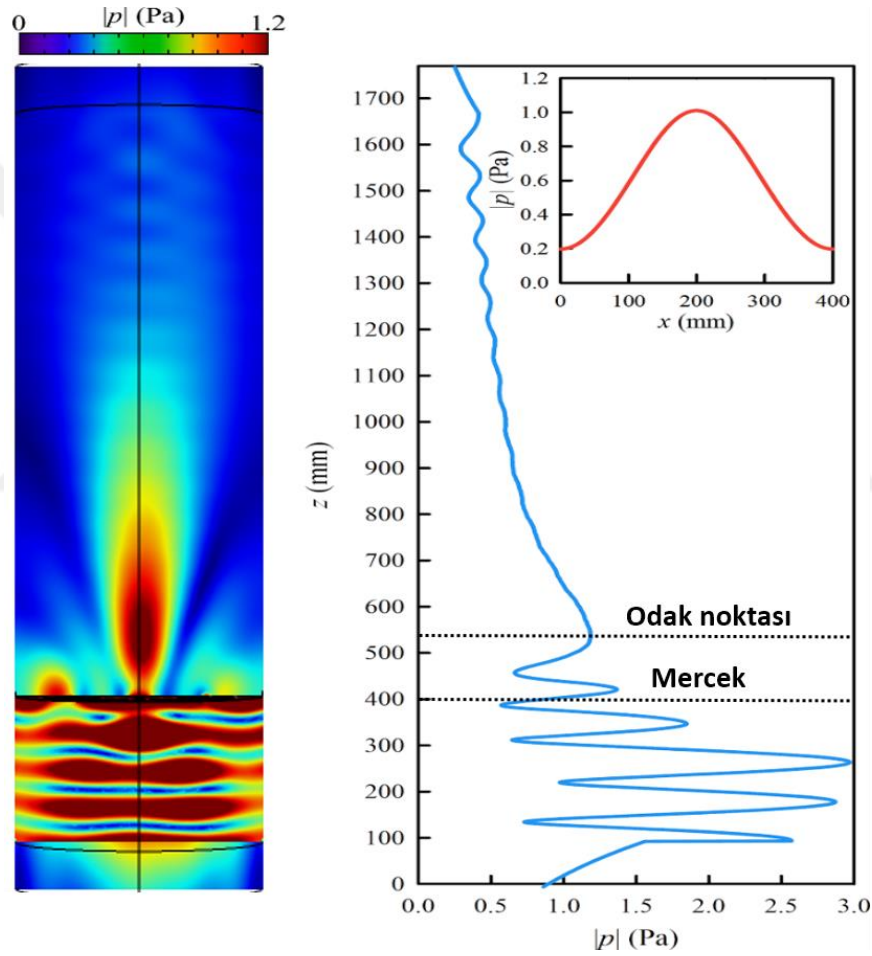
Şekil 4.7. Faz ilişkileri göz önünde bulundurularak optimize edilen gözenekli merceğin sırasıyla (a) $t_m=70 \mu\text{m}$ ve (b) $150 \mu\text{m}$ için $f_L=200$ mm uzakta odaklama özelliklerinin FEM simülasyon sonuçları

Burada, $f_L=200$ mm için optimizasyon yapılmıştır. Merceklerin yarıçapı $R_D=250$ mm alınmıştır. Şekil 4.7(a)’da $t_m=70 \mu\text{m}$ olan merceğin keskin odaklama sağladığı görülmektedir. Bu mercek için tasarım parametreleri $r_c=8.8$ mm, $R_1=136,3$ mm, ve $r_c=13.0$ mm $R_3=182,3$ mm alınmıştır.

Şekil 4.7(b)’de $f_L=200$ mm için optimize edilmiş sırasıyla $150 \mu\text{m}$ kalınlığında membran kaplı merceğin 2190 Hz frekansında FEM simülasyon sonuçları görülmektedir.

Her iki tasarım için de Şekil 4.7(a)'daki mercekte olduğu gibi keskin odaklama sağlanmaktadır ancak nokta genişliği daha büyüktür.

Merkez kavitenin etrafında iki sıra dairesel açıklık içeren $t_L=2$ mm kalınlığa sahip ve $f_L=200$ mm için tasarlanan merceğinin 2190 Hz frekansında FEM simülasyonu Şekil 4.8'de verilmiştir. Burada $R_0=20.4$ mm, $R_1=136.3$ mm ve $R_2=182.3$ mm alınmıştır. Bunun yanı sıra, $R_0=r_{c0}=20.4$ mm, $r_{c2}=8,815$ mm, $r_{c3}=13,000$ mm, ve $N_1=24$, $N_2=32$ alınmıştır. Mercek ve hesaplama hacmi yarıçapları $R_L=R_D=250$ mm ve PML kalınlığı $t_{PML}=100$ mm olarak alınmıştır.



Şekil 4.8. Dairesel kavitelerden oluşan ve FP rezonansı içeren mercekte (sol) akustik basıncın mutlak değerinin akustik eksenden geçen kesit düzleminde değişimi, (sağ) basıncın akustik eksen boyunca ve odak düzleminde değişimi

Yukarıda tasarım parametreleri verilen merceğin 2190 Hz frekansındaki simülasyonu Şekil 4.8'e bakıldığında görülmektedir. Odak noktasında $p/p_0=1.2$ hesaplanmıştır.

FP rezonansı içeren bir klasik akustik Fresnel merceğinin kalınlığı dalga boyunun yarısı kadar iken, elde ettiğimiz merceğın kalınlığı 2 mm'dir. Bu kalınlık çalışma aralığındaki dalga boyunun 78'de biridir. Ayrıca çalışmadan elde edilen önemli sonuçlardan biride, geleneksel bir Fresnel merceğine göre %80'e kadar daha küçük yarıçaplı mercek tasarlandı. Tasarlanan akustik mercek, tasarım sadeliği ve küçük boyutlu olması bakımından literatürdeki radyal doğrultuda değişken akustik empedans sergileyen örneklere kıyasla üstünlük sağladığı görüldü.



5. SONUÇ

Membran kaplı dairesel kaviterler içeren akustik merceğin tasarımında periyodik kaviterlerin rezonans frekansında sıfıra yakın yoğunluk ve olağanüstü akustik geçirgenlik sergilediği simülasyonlarla gösterildi. Faz ilişkileri incelenerek kaviterlerin çıkışında membran kaplı olmayan kaviteye göre küçük faz farklarının oluştuğu belirlendi. Membranlar boyunca oluşan faz süreksizliği odak noktasının belirlenmesinde ve merceğin yapısal tasarımında kullanılmıştır. Merkez etrafında iki sıra dairesel kavite içeren tasarımda kırınım limitine yakın odaklama gösterildi. Geleneksel Fresnel merceğinin boyutu dalgaboyu mertebesinde (Moleron vd., 2014) olmasına rağmen tasarladığımız merceğin boyutu dalgaboyuna göre çok çok küçüktür ($\lambda \ll R_D$). Sayısal olarak tasarladığımız merceğin toplam merceğın çapı, geleneksel Fresnel merceğine göre %80 daha küçüktür. Bu çalışmada tasarlanan akustik merceğın sektörel uygulamalara yönelik çalışmalar için önemli bir adımdır.

Akustik dalgaların yönlendirilmesi veya odaklanması günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Deniz altı görüntüleme çalışmalarında (Hodges, 2011), tıbbi görüntüleme tekniklerinde ve son zamanlarda ortaya atılan HIFU (yüksek yoğunluklu odaklanmış ultrason – High intensity focused ultrasound) (Günaydın vd., 2017) çalışmalarında kullanılmaktadır. HIFU ses dalgalarının dokuda odaklanması ve odaklandığı bölgeyi tahrip ederek hücre yenilenmesini sağlayan bir yöntemdir. Özellikle deri üzerine uygulayarak gençleşme çalışmaları günümüzde yapılmaktadır. Son zamanlarda ise kanser çalışmalarında HIFU yer almaktadır. Sesi kanser hücreleri üzerinde odaklanmasını sağlayarak o bölgede sıcaklık artışına neden olukta ve kanser hücrelerini bu sayede parçalamaktadır. Bu tür tekniklerde sesin istenilen yerde odak odaklanabilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada tasarlanan mercekte ise odak mesafesi membran kalınlığı ve kavite yarıçapı gibi değişkenlere bağlı olarak değiştirilebileceği öngörülmektedir. Yapmış olduğumuz çalışma bu tür uygulamalara ışık tutması düşünülmektedir.

Sesin istenilen bölgede odaklanması ile ilgili örneğın, çoklu ses kaynağının olduğu bir eğlence merkezinde seslerin karışmasını ve gürültü kirliliğinin azaltılması gibi uygulamalarda bu tarz akustik merceğın kullanılarak önlenebileceği öngörülmektedir. Bu çalışmada tasarlanan merceğın tek bir frekansta çalışmaktadır. Bu çalışmanın sonuçlarından yola çıkılarak planlanan ileriki çalışmalarda belirli frekans aralığında çalışan akustik merceğın yapılabileceği öngörülmektedir. Bu sayede ses kaynağının önüne yerleştirilen akustik merceğın ile sesin sadece istenilen bölgede duyulması sağlanabilir.

Bu çalışmada tasarlanan akustik mercek tasarım sadeliği ve küçük boyutlu olmaları bakımından literatürdeki radyal doğrultuda değişken akustik empedans sergileyen örneklere kıyasla üstünlük sağladığı görüldü ve çalışmalarımız, tasarlanan merceklerin deneysel olarak incelenmesi ve sektörel uygulamalara yönelik mercekler geliştirme yönünde devam etmektedir.



KAYNAKLAR

- Bathe, K.J., 2006. *Finite Element Procedures*, Klaus-Jurgen Bathe.
- Berenger, J.P., 1994. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics*, 114 (2), 185-200.
- Blevins, R. D., 2015. *Formulas For Dynamics, Acoustics and Vibration*: John Wiley ve Sons, United Kingdom.
- Craster, R. V., ve Guenneau, S., 2012. *Acoustic Metamaterials: Negative Refraction, Imaging, Lensing and Cloaking*, (Vol. 166): Springer Science ve Business Media.
- Deng, K., Ding, Y., He, Z., Zhao, H., Shi, J., ve Liu, Z., 2009. Graded negative index lens with designable focal length by phononic crystal. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42 (18), 185505.
- Deymier, P. A., 2013. *Acoustic Metamaterials And Phononic Crystals*, (Vol. 173): Springer Science ve Business Media. Tuscon, Arizona
- Ding, C., Hao, L., ve Zhao, X., 2010. Two-dimensional acoustic metamaterial with negative modulus. *Journal of Applied Physics*, 108 (7), 074911.
- Ding, Y., Liu, Z., Qiu, C., ve Shi, J., 2007. Metamaterial with simultaneously negative bulk modulus and mass density. *Physical Review Letters*, 99 (9), 093904.
- Ebbesen, T. W., Lezec, H. J., Ghaemi, H., Thio, T., ve Wolff, P., 1998. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays. *Nature*, 391 (6668), 667-669.
- Fang, N., Xi, D., Xu, J., Ambati, M., Srituravanich, W., Sun, C., ve Zhang, X., 2006. Ultrasonic metamaterials with negative modulus. *Nature materials*, 5 (6), 452.
- Fleury, R., ve Alù, A., 2013. Extraordinary sound transmission through density-near-zero ultranarrow channels. *Physical Review Letters*, 111 (5), 055501.
- Fok, L., Ambati, M., ve Zhang, X., 2008. Acoustic metamaterials. *MRS bulletin*, 33 (10), 931-934.
- Fokin, V., Ambati, M., Sun, C., ve Zhang, X., 2007. Method for retrieving effective properties of locally resonant acoustic metamaterials. *Physical Review B*, 76 (14), 144302.
- Günaydın, B., ve Çaşkurlu, T. Prostat kanserlerinin tedavisinde HİFU'nun yeri HIFU (Yüksek Yoğunluklu Odaklanmış Ultrason). *Yeni Üroloji Dergisi*, 12 (3), 72-83.
- He, Z., Jia, H., Qiu, C., Peng, S., Mei, X., Cai, F., Liu, Z., 2010. Acoustic transmission enhancement through a periodically structured stiff plate without any opening. *Physical review letters*, 105 (7), 074301.

- Hou, B., Mei, J., Ke, M., Wen, W., Liu, Z., Shi, J., ve Sheng, P., 2007. Tuning Fabry-Perot resonances via diffraction evanescent waves. *Physical Review B*, 76 (5), 054303.
- Hodges, R. P., 2011. Underwater acoustics: Analysis, design and performance of sonar. *John Wiley ve Sons*.
- Huang, H., ve Sun, C., 2009. Wave attenuation mechanism in an acoustic metamaterial with negative effective mass density. *New Journal of Physics*, 11 (1), 013003.
- Jing, Y., Xu, J., ve Fang, N. X., 2012. Numerical study of a near-zero-index acoustic metamaterial. *Physics Letters A*, 376 (45), 2834-2837.
- Kaya, O. A., Cicek, A., ve Ulug, B., 2011. Focusing with two-dimensional angular-symmetric circular acoustic lenses. *Acoustical Physics*, 57 (3), 292.
- Ke, M., Liu, Z., Qiu, C., Wang, W., Shi, J., Wen, W., ve Sheng, P., 2005. Negative-refraction imaging with two-dimensional phononic crystals. *Physical Review B*, 72 (6), 064306.
- Khelif, A., Choujaa, A., Benchabane, S., Djafari-Rouhani, B., ve Laude, V., 2004. Guiding and bending of acoustic waves in highly confined phononic crystal waveguides. *Applied Physics Letters*, 84 (22), 4400-4402.
- Körözlü, N., 2017. Fotonik Kristal Kaplama İle Gösteri Salonlarında Akustik Yalıtımın Sayısal İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 19 (56), 681-692.
- Lee, D., Nguyen, D. M., ve Rho, J., 2017. Acoustic wave science realized by metamaterials. *Nano Convergence*, 4 (1), 3.
- Lee, S. H., Park, C. M., Seo, Y. M., Wang, Z. G., ve Kim, C. K., 2009. Acoustic metamaterial with negative modulus. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 21 (17), 175704.
- Lee, S. H., Park, C. M., Seo, Y. M., Wang, Z. G., ve Kim, C. K., 2010. Composite acoustic medium with simultaneously negative density and modulus. *Physical Review Letters*, 104 (5), 054301.
- Li, J., ve Chan, C. T., 2004. Double-negative acoustic metamaterial. *Physical Review E*, 70(5), 055602.
- Li, J., Fok, L., Yin, X., Bartal, G., ve Zhang, X., 2009. Experimental demonstration of an acoustic magnifying hyperlens. *Nature Materials*, 8 (12), 931.
- Maldovan, M. 2013. "Sound and heat revolutions in phononics", *Nature*, 503, 209-217.
- Martin, T. P., Nicholas, M., Orris, G. J., Cai, L.-W., Torrent, D., ve Sánchez-Dehesa, J., 2010. Sonic gradient index lens for aqueous applications. *Applied Physics Letters*, 97 (11), 113503.

- Martínez-Sala, R., Rubio, C., García-Raffi, L. M., Sánchez-Pérez, J. V., Sánchez-Pérez, E. A., ve Llinares, J., 2006. Control of noise by trees arranged like sonic crystals. *Journal of Sound and Vibration*, 291 (1-2), 100-106.
- Mei, J., Hou, B., Ke, M., Peng, S., Jia, H., Liu, Z., Sheng, P., 2008. Acoustic wave transmission through a bull's eye structure. *Applied Physics Letters*, 92 (12), 124106.
- Molerón, M., Serra-Garcia, M., ve Daraio, C., 2014. Acoustic Fresnel lenses with extraordinary transmission. *Applied Physics Letters*, 105 (11), 114109.
- Park, J. J., Lee, K., Wright, O. B., Jung, M. K., ve Lee, S. H., 2013. Giant acoustic concentration by extraordinary transmission in zero-mass metamaterials. *Physical Review Letters*, 110 (24), 244302.
- Peng, S., He, Z., Jia, H., Zhang, A., Qiu, C., Ke, M., ve Liu, Z., 2010. Acoustic far-field focusing effect for two-dimensional graded negative refractive-index sonic crystals. *Applied Physics Letters*, 96 (26), 263502.
- Sukhovich, A., Jing, L., ve Page, J. H., 2008. Negative refraction and focusing of ultrasound in two-dimensional phononic crystals. *Physical Review B*, 77 (1), 014301.
- Vasseur, J., Hladky-Hennion, A.C., Djafari-Rouhani, B., Duval, F., Dubus, B., Pennec, Y., ve Deymier, P. A., 2007. Waveguiding in two-dimensional piezoelectric phononic crystal plates. *Journal of Applied Physics*, 101 (11), 114904.
- Wang, X., 2010. Acoustical mechanism for the extraordinary sound transmission through subwavelength apertures. *Applied Physics Letters*, 96 (13), 134104.
- Xiao-Jian, L., ve You-Hua, F., 2013. Band structure characteristics of T-square fractal phononic crystals. *Chinese Physics B*, 22 (3), 036101.
- Xiao, S., Ma, G., Li, Y., Yang, Z., ve Sheng, P., 2015. Active control of membrane-type acoustic metamaterial by electric field. *Applied Physics Letters*, 106 (9), 091904.
- Yang, S., Page, J. H., Liu, Z., Cowan, M. L., Chan, C. T., ve Sheng, P., 2004. Focusing of sound in a 3D phononic crystal. *Physical Review Letters*, 93 (2), 024301.
- Yang, Z., Mei, J., Yang, M., Chan, N., ve Sheng, P., 2008. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass. *Physical Review Letters*, 101 (20), 204301.
- Yoon, G. H., Jensen, J. S., ve Sigmund, O., 2007. Topology optimization of acoustic-structure interaction problems using a mixed finite element formulation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 70 (9), 1049-1075.
- Zhang, X., 2005. Acoustic resonant transmission through acoustic gratings with very narrow slits: Multiple-scattering numerical simulations. *Physical Review B*, 71 (24), 241102.
- Zhang, X., ve Liu, Z., 2004. Negative refraction of acoustic waves in two-dimensional phononic crystals. *Applied Physics Letters*, 85 (2), 341-343.

- Zhou, Y., Lu, M.-H., Feng, L., Ni, X., Chen, Y.-F., Zhu, Y.Y., Ming, N.B., 2010. Acoustic surface evanescent wave and its dominant contribution to extraordinary acoustic transmission and collimation of sound. *Physical Review Letters*, 104 (16), 164301.
- Zhu, J., Christensen, J., Jung, J., Martin-Moreno, L., Yin, X., Fok, L., Garcia-Vidal, F., 2011. A holey-structured metamaterial for acoustic deep-subwavelength imaging. *Nature Physics*, 7 (1), 52-55.



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Döne ÖZTÜRK

Doğum Yeri ve Yılı : Bucak / 1990



<u>Eğitim Durumu</u>	<u>Yıl</u>
Lise : Bucak Şehit Ayfer Gök lisesi	2002-2006
Lisans : Aydın Adnan Menderes Üniversitesi / Fizik	2008-2012
Yüksek Lisans : Aydın Adnan Menderes Üniversitesi / Biyofizik	2013-2016
Yüksek Lisans : Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi / Fizik	2017-2019

<u>Çalıştığı Kurum / Kurumlar</u>	<u>Yıl</u>
1- Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Gölhisar Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu	2019 –

ÖDÜLLER

- 1- En iyi sunum ödülü, Extraordinary Acoustic Transmission Through Density Near Zero Metasurfaces, International Conference on Engineering Technologies (ICENTE 2017), Konya, TÜRKİYE

PROJELER

- 1- Körözlü N, Öztürk D, Çiçek A, Kaya O.A, Uluğ B, Numerical Study of Compact Density Near Zero Acoustic Fresnel Lenses, MAKÜ, TÜBİTAK Projesi, Proje kodu:116F312, 2017-2019 (Tez Çalışması)
- 2- Öztürk D, Körözlü N, Çiçek A, Extraordinary Acoustic Transmission Through Density Near Zero Metasurfaces, MAKÜ, TÜBİTAK Projesi, Proje kodu:116F312, 2017, (Yüksek lisans tez çalışması)

- 3- Bozkurt Ö. (yürütücü), Bilgin M.D. (Araştırmacı), Öztürk D. (Araştırmacı), Keser H. (Araştırmacı), Köken EC. (Araştırmacı), Deneysel diyabet modelinde pterostilbenin ve pterokarbosidin olası nöroprotektif etkisinin elektrobiyofiziksel, nosiseptif, biyokimyasal ve FTIR spektroskopik yöntemlerle araştırılması, ADÜ-BAP projesi, Proje kodu:TPF-14009, süre: 2014-2016
- 4- Bozkurt Ö. (yürütücü), Öztürk D. (Araştırmacı), Overektomi uygulanan sıçanlarda periferik sinir hasarı üzerine selenyumun etkileri. ADÜ-BAP projesi, Proje kodu:TPF-15030, süre: 2014-2016 (Yüksek Lisans Tez Çalışması)

BİLDİRİLER

- 1- Öztürk D, Bozkurt- Girit Ö, Pınarbaşı MM, Uçar EH, Çetin H, Bilgin MD, Selenyumun menopozda ve menopozdaki sinir hasarında periferik sinir fonksiyon gerikazanımındaki rolü, 16. Ulusal Sinirbilim Kongresi, 20-23 Mayıs 2018, İstanbul, Kongre bildiri kitabı sf. 178, Ps-127, Poster sunumu
- 2- Öztürk D, Körözlü N, Çiçek A, Extraordinary Acoustic Transmission Through Density Near Zero Metasurfaces, International Conference on Engineering Technologies (ICENTE 2017), 7-9 Aralık 2017, Konya, Kongre Özet Kitabı sf. 109, Sözlü Sunum
- 3- Körözlü N, Öztürk D, Çiçek A, Kaya O.A, Uluğ B, Numerical Study of Compact Density Near Zero Acoustic Fresnel Lenses, International Conference on Engineering Technologies (ICENTE 2017), 7-9 Aralık 2017, Konya, Kongre Özet Kitabı sf. 95
- 4- Öztürk D, Sayarcan Ö, Eryılmaz U, Bilgen M, Normal Kalp Sol Ventrikül Duvarı Hareketinde Mekansal ve Zamansal Gerilmesinin Karakterizasyonu, 27. Ulusal Biyofizik Kongresi 26 Eylül- 03 Ekim 2015, Malatya, Kongre Özet Kitabı sf. 47, Sözlü Sunumu
- 5- Bilgin MD, Öztürk D, Sayarcan Ö, Bozkurt Ö, Deneysel diyabetik nöropatide pterokarbosit tedavisinin olası nöroprotektif etkileri, 13. Ulusal Sinir Bilim Kongresi, 1-3 Mayıs 2015, Konya, Kongre Özet Kitabı sf. 141, Poster Sunumu