



T.C.

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

TEZİN ADI

**IR REZONANS TABANLI FOTOAKUSTİK HOPARLÖR
GELİŞTİRİLMESİ**

BENGİ DERYA MUŞDAL

Tez Danışmanı

PROF. DR. MUSTAFA KURT

ÇANAKKALE – 2022



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

IR REZONANS TABANLI FOTOAKUSTİK HOPARLÖR GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

BENGİ DERYA MUŞDAL

Tez Danışmanı

PROF. DR. MUSTAFA KURT

ÇANAKKALE – 2022



T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



Bengi Derya MUŞDAL tarafından Prof. Dr. Mustafa KURT yönetiminde hazırlanan ve **23/04/2022** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**IR Rezonans Tabanlı Fotoakustik Hoparlör Geliştirilmesi**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Fizik Anabilim Dalı**’nda **DOKTORA TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Prof. Dr. Mustafa KURT
(Danışman)

.....

Doç. Dr. Murat ERTÜRK

.....

Doç. Dr. Necati KAYA

.....

Prof. Dr. Şevket Erol OKAN

.....

Prof. Dr. Hasan Hamit YURTSEVEN

.....

Tez No : 10463996

Tez Savunma Tarihi : 23/05/2022

.....
Doç. Dr. Yener PAZARCIK

Enstitü Müdürü

.././2022

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarımı kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

(İmza)

Bengi Derya MUŞDAL

(Tarih) .././2022

TEŞEKKÜR

Bu tezin oluŐuŐmasından olgunlaŐmasına kadar büyük emeği geçen, çalışmanın en kritik noktalarında değerli katkılarıyla kurtarıcı olan ve her ne olursa olsun sonsuz sabır ve anlayıŐla yaklaŐan sayĐı değer Danışman Hocam Prof. Dr. Mustafa KURT'a ve ailesine; tezin her aşamasında ilgi ve yönlendirmeleriyle moral ve manevi desteğini asla esirgemeyen değerli Hocam Prof. Dr. K. Gediz Akdeniz'e; ayrıca bu doktora sürecinde ortak ders aldĐđm, paylaŐım ve dayanıŐma gösteren tüm arkadaŐlarım ve hocalarıma; doktora başlamam konusunda beni ikna eden, her zaman başarabileceğime inanan ve beni inandıran, varlığıyla en büyük ve en önemli manevi desteğini içtenlikle sakınmadan sunan en kıymetlim canım annem Serpil Türemen en başta olmak üzere aileme ve güzel aile dostlarımıza en içten sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Bengi Derya MUŞDAL
Çanakkale, Nisan 2022

ÖZET

IR REZONANS TABANLI FOTOAKUSTİK HOPARLÖR GELİŞTİRİLMESİ

Bengi Derya MUŞDAL

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Mustafa KURT

23/05/2022, 77

Fotoakustik etki ile akustik sinyalin iletilmesi ve yeniden üretilmesi, 1880 yılındaki Alexander Graham Bell'in deneylerinden bu zamana kadar, Fizik bilimindeki ilgi çeken araştırma konularından biri olmuştur. Son yirmi yıl içinde lazer cihazları (*LASER*) ve Fotonik alanındaki gelişmeler sayesinde, bu etki kullanılarak özellikle medikal görüntüleme ve fotoakustik spektroskopi alanlarında deneysel ve teorik çok sayıda çalışma literatüre girmiş olmasına rağmen, ses teknolojileri alanında fotoakustik etkiye dayalı yapılan çalışmalar oldukça kısıtlı sayıdadır. Fotoakustik etki katı, sıvı, gaz ve yoğunlaşmış fazlarda bulunan moleküllerin, ışık - madde etkileşimi sonucunda ortaya çıkan bir olgudur. Bir molekül, koherent kızıl ötesi (IR) ışık ile etkileşime girdiğinde, moleküler bağlar bu IR ışık ile rezonans frekansta titreşerek mikro ölçekte genişir ve bir basınç dalgalanmasının oluşmasını sağlar. Ancak elektromanyetik etkileşim üretmeyen işitilebilir aralıktaki frekansta (20 Hz – 20kHz) ve seviyede (0-120 dB SPL) ses üretebilecek kapasiteye sahip etkin bir ses kaynağına literatürde rastlanmamıştır. Bu çalışma kapsamında Diebold ve Westervelt'in ortaya koymuş olduğu model kullanılarak üretilen bu basıncın parametreleri frekans ve ses basınç seviyesi (dB SPL) bağlamında teorik olarak çalışılmıştır. Ayrıca konsept bir kulaklık tasarımı yapılarak fotoakustik etki ile sesin üretilebilirliği gösterilmiştir. Bu çalışma ile işitilebilir aralıktaki sesin fotoakustik etki ile iletimi ve yeniden üretilmesi amacıyla yeni bir deneysel yöntem, teorik olarak ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Fotoakustik, Akusto-optik, Opto-akustik, Fotonik, Psikoakustik, Fizik

ABSTRACT

DEVELOPING PHOTO-ACOUSTIC SPEAKER: BASED ON IR RESONANCE

Bengi Derya MUŞDAL

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Doctoral Dissertation in Physics

Advisor: Prof. Dr. Mustafa KURT

23/05/2022, 77

Transmitting and reproducing the acoustical signal via the photoacoustic effect discovered by the studies of Alexander Graham Bell in 1880, has been one of the most challenging research topics in Physics since then. Even though plenty of experimental and theoretical studies have been performed particularly on medical imaging and photoacoustic spectroscopy by using this effect through the innovations of the photonics and the lasers in the last two decades, the number of the audio technology studies on photoacoustics has quite limited availability. The photoacoustic effect is an acoustical phenomenon that occurs as a result of light-matter interaction. When a proper molecule, which is solid, liquid, gas or in an intense phase, interacts with a coherent infrared (IR) light, vibrating the molecular bonds with the same resonant frequency of the IR light causes expansion on a micro scale and pressure fluctuations. However, there has not been reported an electromagnetic interference (EMI) free photoacoustic sound source, which can produce the sound in audible frequency and level ranges. In the scope of this work, photoacoustic audible pressure has been theoretically studied in the context of the frequency and the sound pressure level (dB SPL) based on the pressure expressions of Diebold and Westervelt. Additionally, reproducibility of the audible sound by the photoacoustic effect has been also demonstrated as a conceptual EMI-free photoacoustic earphone design. In this study, with the intention of transmitting and reproducing the audible sound by means of the photoacoustic effect has been theoretically presented a novel experimental method.

Keywords: Photoacoustics, Acousto-optics, Optoacoustics, Photonics, Psychoacoustics, Physics

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

JÜRİ ONAY SAYFASI	i
ETİK BEYAN	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR	ix
TABLolar DİZİNİ	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1.1. Akustik, Psikoakustik ve Ses Teknolojileri	3
1.1.1. Ses	3
Ses Seviyeleri ve Desibel Kavramı	7
1.1.2. İşitme Duyusu ve Sesin Algılanması	10
İnsan İşitme Sisteminin Anatomik ve Fizyolojik Yapısı	12
Algılanan Ses seviyeleri	13
1.1.3. İşitilebilir Ses Üreten Konvansiyonel Cihazların Temel Çalışma Prensibi	15
Hoparlörler	16
Kulaklıklar	19
1.2. Fotonik	22
1.2.1. Lazer Işığının Özellikleri ve Yayılımı	24
Katkılı Yarı İletkenler ve Diyot Lazer	26
1.2.2. Işığın Modülasyonu	28
1.2.3. Moleküler Düzeyde Işık - Madde Etkileşmesi ve Moleküler Rezonans ...	30
1.3. Fotoakustik	33
1.3.1. Fotoakustik Etki	34

İKİNCİ BÖLÜM
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 37

2.1. Elektromanyetik etkileşim (EMI)	37
2.2. Fotoakustik	39

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
MATERYAL VE YÖNTEM 43

3.1. Teori	43
3.1.1 Üretilmesi Gereken Ses Basınç Seviyeleri	44
3.1.2 Fotoakustik Ses Basıncı Hesabı	45
3.2 Kavramsal Deneysel Düzenek	49
3.2.1 Ses İşleme Mekanizması	50
3.2.2 Fotoakustik Ses İletim Mekanizması	50
3.2.3 Ses Kalibrasyon Mekanizması	52
3.2.4 Fotoakustik Kulaklık	54

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA BULGULARI 57

4.1. Fotoakustik etki ile İşitilebilir Ses Basıncı Oluşturulması	57
4.2. Fotoakustik Etki ile İşitilebilir Ses Basıncı Oluşturabilecek Diğer <i>Laser-</i> Molekül Eşleşmeleri	62

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ ve ÖNERİLER 63

5.1. Araştırma Bulgularının Değerlendirilmesi	63
5.2. Gelecek Deneysel Çalışmalar ve Yüksek Çözünürlüklü PA Ses İletimi	66
KAYNAKÇA	69

EKLER	I
EK 1.	I
EK 2.	II
EK 3.	III
EK 4.	IV
ÖZGEÇMİŞ	IV



SİMGELER VE KISALTMALAR

IR	Kızıl ötesi, <i>infrared</i>
LASER, <i>laser</i>	Lazer, <i>Ligth Apmlification by Stimulated Emission of Radiation</i>
Pa	Pascal
μ Pa	MikroPascal
Magnet	Mıknatıs
EM	Elektromanyetik
EMI	Elektromanyetik etkileşme, <i>electromagnetic interference</i>
PA	Fotoakustik, <i>Photoacoustics</i>
PAE	Fotoakustik Etki, <i>Photoacoustic Effect</i>
m	Metre
A	Genlik
f	Frekans
λ_s	Sesin Dalgaboyu
ρ	Yoğunluk
T _{emp.}	Sıcaklık
°C	Cantigrad derece
s	Saniye
v	Ses hızı
%	Yüzde
3D	Üç boyutlu, <i>three dimensional</i>
RMS	Ortalama etkin değer, <i>Root Mean Square</i>
z	Akustik empedans
u	Moleküler hız
P	Basınç, Ses Basıncı
B	Bulk modülü
mPa	mili <i>Pascal</i>
dB	Desibel, <i>deciBell</i>
dB SIL	Desibel cinsinden ses yoğunluk seviyesi
dB SPL	Desibel cinsinden ses basınç seviyesi
Hz	<i>Hertz</i>
kHz	Kilo <i>Hertz</i>

W	Watt
μPa	mikro <i>Pascal</i>
pW	pikoWatt, <i>picoWatt</i>
I_s	Ses yoğunluğu
I_{s_0}	Referans ses yoğunluğu
P_0	Referans ses basıncı
mm	Mili metre
<i>ff</i>	Fortissimo
<i>pp</i>	Pianissimo
<i>phon</i>	Algılanan ses yüksekliği seviyesi
HBM	Hareketli bobin motoru
B	Manyetik alan
<i>l</i>	Bobini oluşturan telin uzunluğu
EMF	Elektromotor kuvveti
I	Akım
T	Tesla
F_M	Manyetik kuvvet
T.m	Tesla.metre
Ω	Ohm
N	Newton
c	Işık hızı
ν	Foton frekansı
λ	Foton dalgaboyu
E_c	Foton enerjisi
<i>h</i>	<i>Planck</i> sabiti
μm	Mikro metre
nm	Nano metre
pm	Piko metre
CW	Sürekli kipte, <i>continuous wave</i>
QCL	Kuantum tuzaklanmış (<i>cascade</i>) laser
AM	Genlik modülasyonu, <i>amplitude modulation</i>
FM	Frekans modülasyonu, <i>frequency modulation</i>
Ga	Galyum

Ar	Arsenik
Al	Alüminyum
AOM	Akusto-optik modülatör
LED	Işık yayan diyot, <i>light emitting diode</i>
NIR	Yakın kızılötesi, <i>near infrared</i>
$\bar{\nu}$	Dalga sayısı
cm	Santimetre
J	<i>Joule</i>
k_f	Bağ kuvveti
m	Atom kütlesi
π	<i>Pi</i> sayısı
α	Soğurma katsayısı
I_0	Gelen ışının güç yoğunluğu
I	Işının güç yoğunluğu
L	Numune uzunluğu
ϵ	Numunenin molar soğurma miktarı
C	Numunenin konsantrasyonu
T	Geçirgenlik, <i>Transmittance</i>
OA	Optoakustik
PT	Fototermal, <i>photothermal</i>
HD	Yüksek çözünürlüklü, <i>high definition</i>
mT	Mili <i>Tesla</i>
EEG	Elektroensefalogram
Pb	Kurşun
Hg	Cıva
Cd	Kadmiyum
Cr	Krom
PBB	Polibromlu-bifenil
PBDE	Polibromlu-difenil-eter
ABR	Beyin sapı yanıtı, <i>Auditory Brainstem Response</i>
N_2	Azot
CO_2	Karbon-di-oksit
MEG	Manyetoensefalogram

fMRI	Fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme, <i>functional magnetic resonans imaging</i>
v_o	Ortam içerisindeki ses hızı
β	Logaritmik termal genişleme katsayısı
C_p	Özısı, ısı kapasitesi
H	Birim zamanda birim hacim içinde soğurulan enerji
$P(\vec{r}, t)$	Konum ve zamana bağımlı basınç fonksiyonu
ω	Açısal modülasyon frekansı
\vec{r}	Gözlem noktasının vektörel pozisyonu
\vec{r}'	Küre üzerindeki bir noktadan gözlem noktasına olan vektörel mesafe
S_0	Lazer etki alanı
θ	Küresel koordinatlar için kutupsal açı
a	Kürenin yarıçapı
r	Kürenin merkezine uzanan mesafe
\hat{r}	Merkezden küreye olan boyutsuz mesafe
q	Boyutsuz frekans (dalga vektörü)
$\hat{t} - 1$	Boyutsuz gecikmeli zaman
sin	Sinüs fonksiyonu
cos	Kosinüs fonksiyonu
DAW	Ses işleme programı, <i>digital audio workstation</i>
mW	Mili Watt
R-NH ₂	Primer amin grubu
N-H bağı	Azot-hidrojen bağı
p_L	Lazerin gücü
r_{fb}	Lazerin moleküle etkidiği etkin mesafe yarıçapı

TABLolar DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	Havadaki sıcaklık ve bağıl nem değişimine bağlı ses hızı	5
Tablo 2	Duyuma eşiğinden acı eşiğine: Ses yoğunluğu - dB SIL ve ses basıncı - dB SPL karşılaştırması	10
Tablo 3	HBM'lu ve İzodinamik kulaklıklar için temel parametreler	21
Tablo 4	Ses Yüksekliğine (phon) karşılık gelen Ses Basıncı Seviyesi (dB SPL) ve Basıncı (mPa) ilişkisi	45
Tablo 5	Frekans değişimine göre q ve Denklem 3.6 ile hesaplanmış basınç değerleri	59
Tablo 6	Frekans değişimine göre Denklem 3.10 ile hesaplanmış basınç değerleri	60
Tablo 7	Frekans değişimine göre Denklem 3.6 ($P(q)$) ve Denklem 3.10 ($P(f)$) ile hesaplanmış basınç değerlerine karşılık gelen ses basınç seviyeleri karşılaştırması	61
Tablo 8	PA ses iletim mekanizmasında kullanılabilen diğer <i>laser</i> -molekül eşişmeleri	62

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Ses dalgalarının havada ilerlemesi	4
Şekil 2	Özdeş iki ses kaynağının yayılımı, 3D temsili	6
Şekil 3	Frekans aralıklarına karşılık gelen ses seviyeleri	8
Şekil 4	(a) İnsan işitme sistemi, (b) Kulak zarı ve orta kulak, (c) Koklea kesiti, (d) Korti organı	11
Şekil 5	İnsan kulağının frekans ve ses basınç seviyesine göre değişen işitme kapasitesi	14
Şekil 6	dB SPL'e karşılık gelen basınç (mPa) değerleriyle Fletcher Munson eğrileri	15
Şekil 7	Kavramsal ses sistemi temsili	16
Şekil 8	Dinamik, lineer EM motorlu konvansiyonel hoparlörün çalışma prensibi	18
Şekil 9	Kulağa uygulanmış halde kulaklık çeşitleri: (a) HBM'lu, kulak içi kullanılabilen mini kulaklık, (b) HBM'lu, kulak üstü dinamik kulaklık, (c) İzodinamik kulaklık	20
Şekil 10	Elektromanyetik spektrum	23
Şekil 11	(a) Soğurma - kendiliğinden emisyon - uyarılmış emisyon, (b) Lazeri oluşturan temel unsurlar, (c) Üç seviyeli ve dört seviyeli lazer, (d) İdeal lazer ışınının yayılımı	25
Şekil 12	(a) Bir diyot lazerin gerçek görüntüsü, (b) p-n <i>junction</i> diyot lazer, (c) GaAs katkılı yarı iletken diyot lazer örneği	27
Şekil 13	Başlıca modülasyon çeşitleri	29
Şekil 14	Fotofon cihazının şematik gösterimi	34

Şekil 15	(a) Ses verisi, (b) Modülasyon, (c) Dalga kılavuzu, (d) Demodülasyon ve (e) Ses çıkışı olmak üzere IR Rezonans tabanlı PA hoparlör için tasarlanmış kavramsal deneysel düzenek	49
Şekil 16	<i>Bias sürme modlu diyot lazer</i>	51
Şekil 17	IR Rezonans tabanlı PA hoparlör için tasarlanmış kavramsal deneysel düzeneğin kalibrasyonu	53
Şekil 18	IR Rezonans tabanlı PA kulaklık için tasarlanmış kavramsal deneysel düzenek	54



BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

Günümüzde kulaklık, telefon, bilgisayar, televizyon gibi sıklıkla kullanılan bütün cihazlarda sesin iletilmesi için kullanılan hoparlörler (*loudspeaker, speaker, referance monitor*), genellikle içeriğinde güçlü mıknatıslara (magnet) ve bobinlere sahiptirler. Mevcut platformlarda dijitalleştirilmiş ses verileri bu hoparlörlerin içerdikleri hareketli bobinler ve magnetler sayesinde akustik enerjiye dönüşür. İletilen ses akustik bir ortamda ilerleyerek insan kulağı tarafından toplanır ve beyin tarafından algılanarak işitme duyusu tamamlanmış olur. Dijital ses verileri bir ses kaynağı ile alıcıya iletiildiği esnada ses kaynaklarında var olan magnetler, özellikle tıbbi cihazlar olmak üzere elektronik başka cihazlarla elektromanyetik (EM) etkileşime (*Electromagnetic Interference, EMI*) geçtiği, ses kaynağı olarak kullanılan cihazların hemen hemen hepsinin kullanım kılavuzlarında güvenlik uyarısı olarak belirtilmektedir. Bu çalışmanın temel motivasyonu, ortaya çıkan bu EMI'lerin giderilmesinden doğan ihtiyacın, literatürde pratik ve etkili bir karşılığının var olmamasıdır. Bu çalışma kapsamında, bu problemin çözümüne katkıda bulunulmaya çalışılmıştır. Bu amaçla, çalışma kapsamında; ilk kez 1960 yılında keşfedilen lazer (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, LASER, laser*) teknolojisi sayesinde ortaya çıkmış, günümüze damgasını vuran Fotonik biliminin ışığında, yaklaşık 140 yıl önce ilk kez Alexander Graham Bell (1880; 1881) tarafından ortaya konan Fotoakustik (*Photoacoustic, PA*) Etki (PAE) ve üzerine yapılmış sayısız çalışma irdelenmiştir. Hareketli bobin motor (HBM) prensibi ile çalışan hoparlörlerin aksine, PAE'den faydalanılarak *LASER* ile madde etkileşimine dayanan kızılötesi (*Infrared, IR*) rezonans tabanlı PA hoparlör geliştirilmesi için yeni bir optik model ortaya konmuştur.

Bu bölümde, bu tez çalışmasının daha iyi anlaşılabilmesi için tezde yer alan terimlerin bağlı oldukları anabilim dallarıyla beraber gruplandırılıp, genel hatlarıyla yer yer tarihçelerine, anlam ve açıklamalarına bu çalışma ile bağlantılı olacak şekilde derlenerek yer verilmiştir. Zira her bir bölüm ve ona ait her bir alt başlık teker teker değerlendirildiğinde, neredeyse her başlığa verilen isimlendirmeler hakkında literatürde ciltlerce kitap bulunmakla beraber her biri başlı başına oldukça geniş bilgi içeren konulardır. Sesin akustik bir ortamda oluşmasından algılanmasına kadar gerçekleşen

süreçler ile mevcut hoparlörlerin çalışma prensibine dair bilgilere “Akustik, Psikoakustik ve Ses Teknolojileri”; *LASER* ve ışığın bir madde ile etkileşmesinin moleküler düzeyde nasıl olduğu ile ilgili bilgilere “Fotonik”; PAE’ye dair bilgilere ise “Fotoakustik” başlıkları altında değinilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde daha önce yapılmış çalışmalar kapsamlı bir literatür taraması yapılarak incelenmiş, “Elektromanyetik Etkileşim (EMI)” ve “Fotoakustik” olmak üzere sırasıyla bu çalışmada katkı sunulmak istenen temel problemin ne olduğu, neden kaynaklandığını ve problemin çözümünün ne olması gerektiğine odaklanılarak iki başlık altında irdelenmiştir.

Bu tezin üçüncü bölümünde ise bir IR rezonans tabanlı PA hoparlör geliştirilmesi için öne sürülen teori ve kavramsal tasarımın gerçekleşmesi için gerekli materyaller ve yöntem sırasıyla “Teori” ve “Kavramsal Deneysel Düzenek” başlıkları altında detaylı bir şekilde ortaya konmuştur. Üçüncü bölümde ortaya konan teorik ve kavramsal modelleme ile ilgili teorik hesaplamalara, tespit edilen materyallerin niceliksel verileriyle tezin dördüncü bölümünde bir IR rezonans tabanlı PA kulaklık için “Fotoakustik Etki ile İşitilebilir Ses Basıncı Oluşturulması” başlığında ve bir IR rezonans tabanlı PA hoparlör geliştirilmesi için olası başka verilerle elde edilebilecek değerlere “Fotoakustik Etki ile İşitilebilir Ses Basıncı Oluşturabilecek Diğer *Laser*-Molekül Eşleşmeleri” başlığı altında yer verilmiştir.

Tezin son bölümü olan beşinci bölümünde ise bir IR rezonans tabanlı PA hoparlör geliştirilmesi için bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen teorik hesaplamalar gözden geçirilen niceliksel sonuçlar karşılaştırmalı olarak ele alınmış, çalışmanın potansiyeli, literatüre yaptığı ve yapacağı katkı, ortaya çıkabilecek olası problemler, elde edilen sonuçların bekleneni ne kadar karşıladığı ve karşılaşılan kısıtlamalar objektif olarak “Araştırma Bulgularının Değerlendirilmesi” ve “Gelecek Deneysel Çalışmalar ve Yüksek Çözünürlüklü PA Ses İletimi” başlıkları altında değerlendirilmiştir.

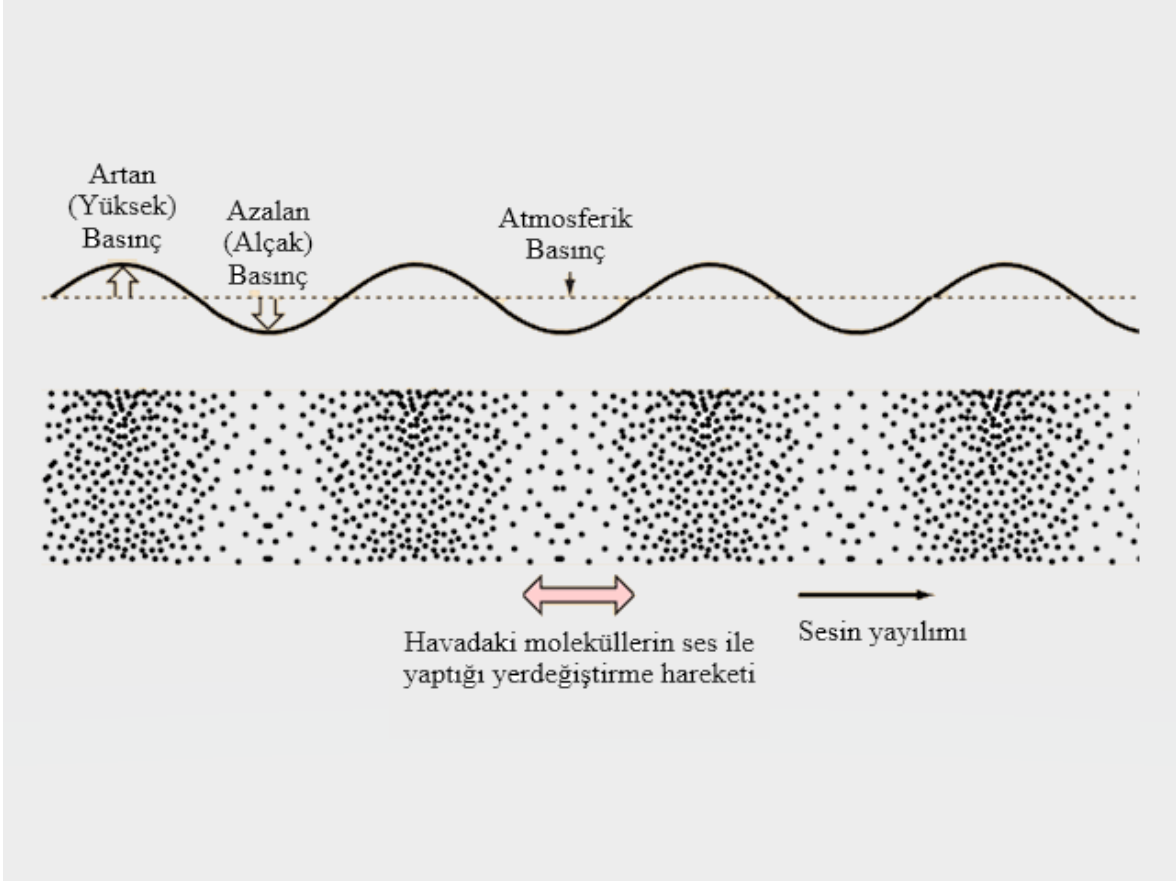
1.1. Akustik, Psikoakustik ve Ses Teknolojileri

Akustik ve psikoakustik birbirinden ayrılmaması gereken iki anabilim dalı olduğu düşünülduğünde, günümüzde gelişen ses teknolojileri ile de beraber değerlendirilmesi gerekliliği oluşmaktadır. Bu bölümde öncelikli olarak sesin ne olduğu ve ses ile ilgili akustik, fiziksel ve psikofiziksel (veya algısal) parametrelerin tanımlanmaları irdelenmiştir. Daha sonra, dijital olarak üretilen sesin ortamda ilerleyip kulaklarımıza gelmesi için ses kaynağı olarak kullanılan hoparlörlerin çalışma prensibine dair bilgilere yer verilmiştir.

1.1.1. Ses

Öncelikle sesin doğasının anlaşılmasını kolaylaştırmak için dalga hareketinin ses dalgasıyla ilişkili temel fiziksel özellikler hakkında kısa tanımlamalar yapılmasının faydalı olacağı düşünülmüştür.

Kararlı bütün sistemler, denge durumu bozulduğu anda denge durumundaki kararlı haline geri dönmeye meyillidir. Dalga hareketi, bir sistemin denge durumu bozulduğunda ve bu bozulma, sistemin bir bölgesinden diğerine ilerleyebildiği veya yayılabildiği zaman meydana gelen hareketin beraberinde madde aktarımı olmaksızın enerji aktarımının gerçekleşmesi durumu olarak tanımlanabilir. Bu bozulma; eğer dalganın ortamı olarak adlandırılan malzemeyi veya maddeyi oluşturan parçacıkların hareketiyle ortamdaki parçacıkların yer değiştirmeler yapması sonucu gerçekleşirse buna **mekanik dalga** denir. Bu yer değiştirmelerin yönü ile aynı yönde ilerleyen dalgaya **boyuna dalga** denir. Özellikle gaz bir ortamdaki partiküllerin, birbirini takip eden sayısız sıkışıp (yüksek basınç) gevşeme (alçak basınç) yapmaları ile ilerleyen boyuna dalgalar basınç dalgalanması oluşturursa, buna **basınç dalgası** denir (Halliday vd., 1996; Jewett ve Serway, 2004; Young ve Freedman, 2012).



(Nave, 2017)

Şekil 1. Ses dalgalarının havada ilerlemesi.

Ses dalgaları, ses kaynağından yayılan akustik enerji miktarı kadar üretilen basınç ile yayıldığı ortamdaki partikülleri titreştirip iterek ve partiküllerle sürekli olarak yerdeğiştirme yaparak ilerleyen mekanik, boyuna bir basınç dalgası olarak tanımlanmaktadır. Ses dalgaları havada ilerlerken havadaki moleküllerle yerdeğiştirme yaparak atmosferik basınçta ($10^5 \text{ Newton/m}^2 = 10^5 \text{ Pa}$) dalgalanmalar oluşturur (Şekil 1). Ses kaynağı ve alıcı ile aralarında iletici bir ortamın var olduğu durumlarda bu küçük değişimlerin bir sonucu olarak ses iletilebilir. Yani ışığın aksine ses, katı veya sıvı, veya gazdan oluşan bir ortam olmadan ilerleyemez. İlerleyen bu ses basınç dalgasının genliği (A), frekansı (f), dalgaboyu (λ_s) ve bulunduğu ortamın yoğunluğuna (ρ), sıcaklığına ve nem seviyesine göre değişen bir hızı vardır. Sesin havadaki hızı yaklaşık olarak 0°C 'ta 332 m/s iken, 20°C 'ta 344 m/s 'dir. Ses hızının (v) havadaki sıcaklık (*temperature, temp.*, $T_{\text{emp.}}$) ve bağıl neme göre değişen değerleri Tablo 1'de verilmiştir (Engineering ToolBox, 2003; Halliday, vd., 1996; Hartmann, 2013; Holland, 2001; Howard ve Angus, 2009; Jewett ve Serway, 2004; Young ve Freedman, 2012).

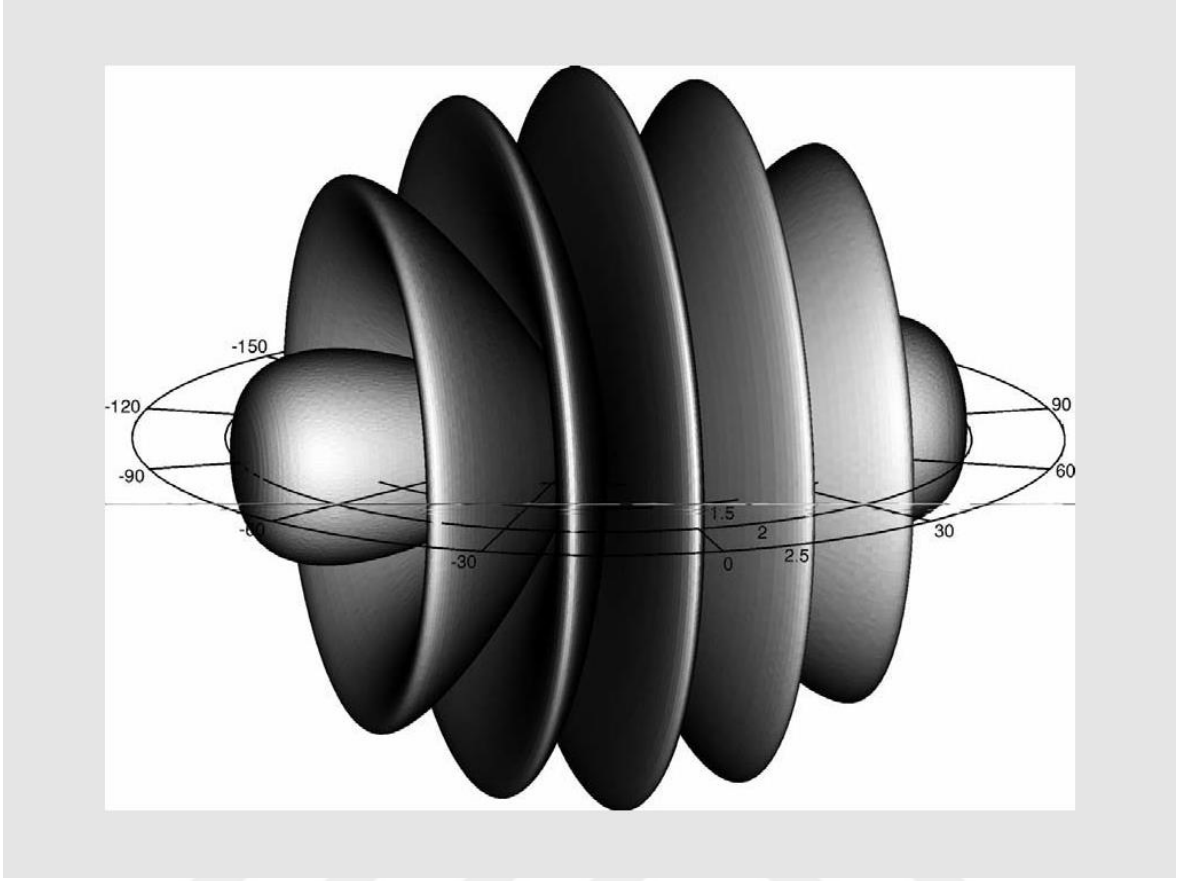
Tablo 1

Havadaki sıcaklık ve bağıl nem değişimine bağlı ses hızı.

Sıcaklık T _{emp.} (°C)	Ses Hızı (m/s)								
	Havadaki Bağıl Nem (%)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	100
0	331,5	331,5	331,5	331,6	331,6	331,7	331,7	331,7	331,7
5	334,5	334,6	334,6	334,7	334,7	334,7	334,8	334,8	334,9
10	337,5	337,6	337,7	337,7	337,8	337,9	337,9	338,0	338,0
15	340,5	340,6	340,7	340,8	340,9	341,0	341,1	341,2	341,2
20	343,5	343,6	343,7	343,9	344,0	344,1	344,2	344,4	344,5
25	346,4	346,6	346,8	347,0	347,1	347,3	347,5	347,6	347,8
30	349,4	349,6	349,9	350,1	350,3	350,5	350,8	351,0	351,2

(Engineering ToolBox, 2003a)

En basit ses dalgası tek bir frekans, genlik ve dalgaboyuna sahip, *pure tone* (saf ton) olarak adlandırılan, kaynağı sinüzoidal olarak titreşim yapan bir sinüs dalgası olarak kabul edilir. Ses dalgalarının kullanımı sırasında frekans bilgisi en önemli unsur olarak kabul edilir. Gerçek hayatta işitilen sesler bir sinüs dalgasından oldukça karmaşık ve kompleks bir yapıya sahiptir ve aynı zamanda küresel düzlem dalgalar olarak yayıldığı kabul edilmektedir, yani bir noktadan başlayarak her yöne doğru, bir balonun sonsuza kadar şişmesine benzer şekilde, küresel olarak ilerlemektedirler. Üç dalga boyu uzaklıkta konumlandırılmış eşdeğer iki ses kaynağından çıkan ses dalgalarının üç boyutlu (3D) olarak yayılımları Şekil 2’de temsili olarak gösterilmiştir. Yine de *pure tone*’lar, ses dalgalarının fiziksel özelliklerini anlamada ve işitsel araştırmalarda yaygın olarak kullanılır, ve işitsel olarak en temel veriyi en “saf” haliyle stabil olarak içerdiğinden, kullanılması anlamlıdır (Hall III, 2015; Hartmann, 1995; Holland, 2001; Howard ve Angus, 2009; Schnupp vd., 2011).



(Holland, 2001)

Şekil 2. Özdeş iki ses kaynağının yayılımı, 3D temsili.

Ses dalgaları havada ilerlerken havadaki moleküllerle yerdeğiştirme yaptıkları sırada moleküller, buldukları konuma geri döner. Havadaki moleküller ses dalgası ile beraber ilerlemeseler bile, havada ilerleyen ses dalgalarının yaptığı küçük basınç değişimlerine küçük yerdeğiştirmeleri yapan moleküllerin ortalama hızındaki değişim de eşlik eder. Hem bu küçük yerdeğiştirmeler hem de basıncadaki bu küçük değişimler, negatif ve pozitif değerler aldığı için ortalama etkin değerlerle (RMS, *Root Mean Square*) ifade edilirler. Titreşim hareketinin denklem çözümünü tamamlayıcı nitelikte olan RMS değeri Şekil 1'deki sinüs dalga formundaki dalgaların genliğiyle ilişkili olarak: önce dalganın anlık değerlerinin karesi (s , *square*) alınır, ardından bir çevrim için ortalama (m , *mean*) alınır daha sonra ise karekök (r , *root*) alınarak,

$$x_{RMS} = \frac{A}{\sqrt{2}} = 0,707A \quad (1.1)$$

denklemleri ile hesaplanır. Dolayısıyla z , akustik empedans olmak üzere; moleküllerin hızının RMS'i (u) ile ses basıncının RMS'i (P) arasındaki ilişki:

$$u = \frac{P}{z} \quad (1.2)$$

ile ifade edilir. Akustik empedans, ortamdaki ses ile parçacıkların yerdeğiştirme hareketi yapmaları (parçacık hareketi) için gereken basınç miktarıdır. Akustik empedans: ρ , ortamdaki maddenin yoğunluğu; v , ses hızı olmak üzere;

$$z = \rho v \quad (1.3)$$

olarak ifade edilir. Akustik empedansı yüksek, fakat yoğunluğu düşük malzemelerde sesin hızı yüksektir (Hartmann, 1995; Schnupp vd., 2011). Ayrıca sıvı bir ortam içerisinde ilerleyen ses hızı, Bulk modülü, B olmak üzere;

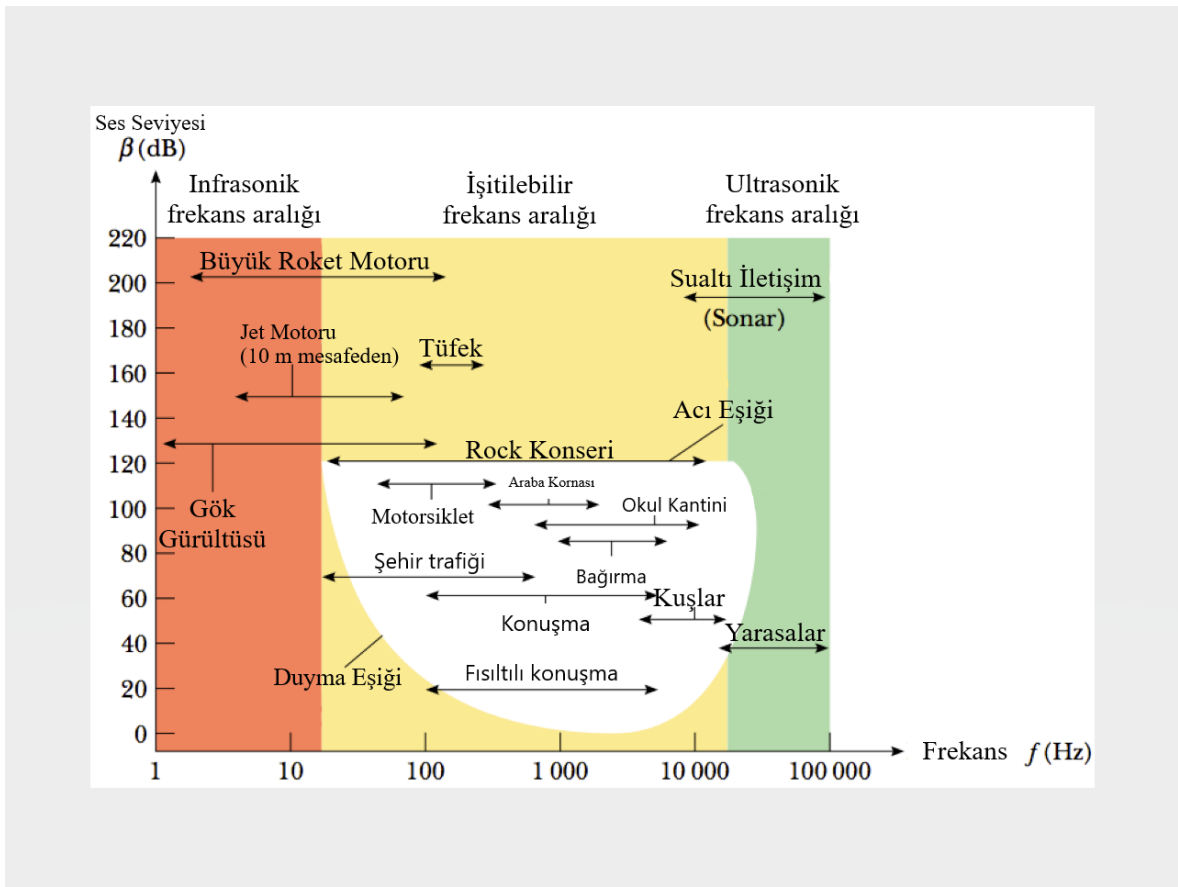
$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (1.4)$$

ile de hesaplanmaktadır. Sıvılar ve gazlar için Bulk modülü, katılar için ise Young modülü ortamı oluşturan maddenin sıkışıp gevşeme kapasitesinin maddeye özgü bir ölçütüdür. Gazlar için Bulk modülü, ortamın sıcaklığına ve gazın özelliklerine bağlı olarak değişmektedir (Jewett ve Serway, 2004; Young ve Freedman, 2012).

Ses Seviyeleri ve Desibel Kavramı

Ses seviyelerinden (*sound level*) bahsedilirken *decibel* (desibel, dB) birimi kullanılır. Sıkça kullanılan ses yoğunluk seviyesi (*sound intensity level*, dB SIL) ve ses basınç seviyesi (*sound pressure level*, dB SPL) başta olmak üzere birbirleriyle

karıştırılmaması gereken ve farklı hesaplanan dB birimi ile belirtilen birçok ses seviyesi vardır. dB kavramını anlaşılır kılmak için öncelikle ses seviyelerini frekans aralıkları ile ilişkilendirilmek faydalı olacaktır. Ses dalgaları, Şekil 3'te frekans aralıklarına göre infrasonik (ses altı) dalgalar (20 Hz altı), işitilebilir (sonik) dalgalar (20 Hz - 20 kHz arası) ve ultrasonik (ses üstü) dalgalar (20 kHz üzeri) olmak üzere üç gruba ayrılır. Bu çalışma kapsamında ilgilenilen, insanın işitme ses aralığına denk gelen işitilebilir dalgalar, Şekil 3'te bulunan beyaz bölgede gösterildiği gibidir (Everest ve Pohlmann, 2009; Howard ve Angus, 2009; Jewett ve Serway, 2004; Reese, 2000).



(Jewett ve Serway, 2004; Reese, 2000)

Şekil 3. Frekans aralıklarına karşılık gelen ses seviyeleri.

İnsan işitme sistemine bir sonraki bölümde daha detaylı bir biçimde değinilecektir. Bu bölüm için oldukça önemli olan duyma eşiği, insanın duyabileceği en düşük ses seviyesidir. Acı eşiği ise insanın duyabileceği en yüksek ses seviyesidir. Duyma eşiği dikkate alınarak, frekans değeri 1000 Hz (1 kHz) olan, yani saniyede 1000 defa titreşim

yapan, bir ses kaynağı için bazı eşdeğer referans seviyeleri kabul edilmektedir. Buna göre frekansı 1000 Hz olan bir ses kaynağı insan kulağında 20 µPa'lık bir ses basıncı uygularsa duyulur hale gelir, bu değer 0 dB'ye denk gelmektedir. Duyma eşiği aynı zamanda metrekare başına uygulanan 10^{-12} Watt (1 pW)'lık bir akustik güce de eş değerdir. Birim alana düşen güç, yoğunluk (*intensity*) olarak adlandırılır. Ses yoğunluğu (I_s , *sound intensity*), sesin ulaştığı alana iletilen akustik enerji transferi ile ilgili bilgi verir. Denklem 1.2 ve Denklem 1.3 de kullanılarak ses yoğunluğu:

$$I_s = Pu = \frac{P^2}{z} = \frac{P^2}{\rho v} \quad (1.5)$$

olarak ifade edilir. Acı eşiği için karşılık gelen değerler sırasıyla, 20 Pa, 120 dB ve 1 W/m²'dir. Tablo 2'de referans ve diğer değerler belirtilmiştir. Daha yüksek değerlerdeki işitilebilir sesler, bu denli küçük duyma eşiği referans değerleri ile karşılaştırıldığında çok büyük farklar ortaya çıktığı için daha anlamlı olması amacıyla logaritmik oranlamaya ihtiyaç duyulmuştur. dB kavramı da bu oranlama mantığı çerçevesinde ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla bu bölümün başında bahsedildiği gibi, birden fazla ses seviyesi tanımı olması, alınan referans değerlerindeki bu farklılaşmalardan kaynaklanmaktadır (Everest ve Pohlmann, 2009; Hartmann, 2013; Howard ve Angus, 2009). Buna göre, I_s , ses yoğunluğu, I_{s_0} , referans ses yoğunluğu olmak üzere ses yoğunluk seviyesi:

$$SIL = 10 \log \left(\frac{I_s}{I_{s_0}} \right) \quad (1.6)$$

denklemleri ile hesaplanır. Denklem 1.5, Denklem 1.6'ya uygulandığında, P_0 , referans ses basıncı olmak üzere ses basınç seviyesi:

$$SPL = 10 \log \left(\frac{P^2}{P_0^2} \right)$$

$$SPL = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (1.7)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Burada bahsedilen ses seviyeleri dışında, alınan akustik veya elektriksel referanslara göre birbirinden ayrılan ses seviyeleri güç, voltaj, akım ve benzeri parametrelere göre değişkenlik gösterebilir (Everest ve Pohlmann, 2009; Hartmann, 2013; Howard ve Angus, 2009). Tablo 2’deki P ve I_s verileri Denklem 1.6 ve Denklem 1.7 üzerinde kullanılarak dB SIL ve dB SPL verilerine ulaşılabilmektedir. Bu tez kapsamında akustik olarak ölçülebilecek ve üretilebilecek dB SPL değerleri dikkate alınarak çalışma gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2

Duyuma eşliğinden acı eşliğine: Ses yoğunluğu - dB SIL ve ses basıncı - dB SPL karşılaştırması.

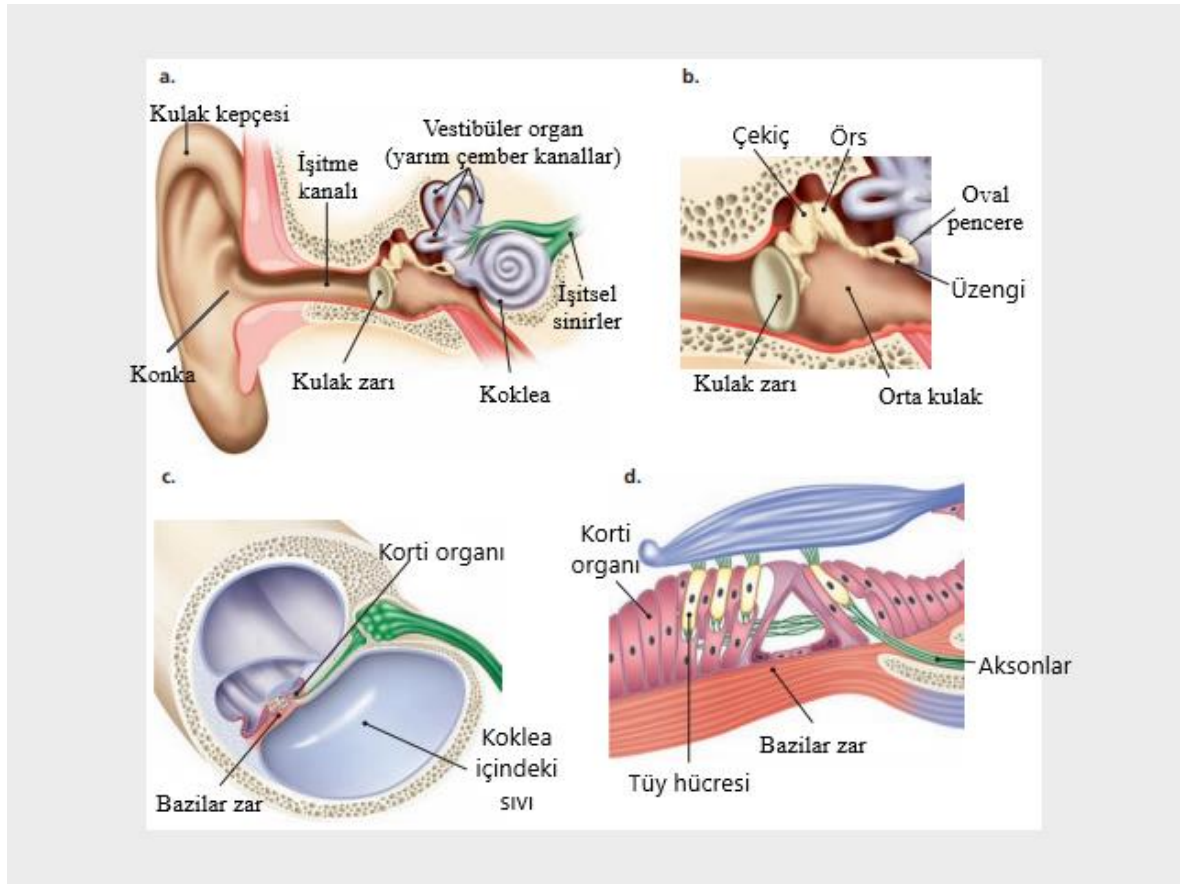
I_s, SES YOĞUNLUĞU (W/m^2)	dB-SIL (dB)	P, SES BASINCI (mPa)	SPL (dB SPL)
$I_0 = 10^{-12}$	0	$P_0 = 0,02$	0
10^{-10}	20	0,2	20
10^{-8}	40	2	40
10^{-6}	60	20	60
10^{-4}	80	200	80
10^{-2}	100	2000	100
1	120	20000	120

(Everest ve Pohlmann, 2009; Hartmann, 2013; Howard ve Angus, 2009; Zeren, 2014)

1.1.2. İşitme Duyusu ve Sesin Algılanması

İnsan kulağı küçük basınç değişimlerine duyarlıdır. Ses dalgalarının özellikle basınç dalgası (ses basıncı) olarak nitelendirilmeleri bu sebeptendir. İşitilebilir frekans aralığındaki ses dalgaları bir ortamda ilerleyerek insan kulağına ulaştığında, işitme duyusu

devreye girer. İşitme sisteminin oldukça karmaşık bir analiz süreci başlatmasına rağmen işitme olayı bir o kadar da hızlı gelişmektedir. Kulak tarafından içeri alınan akustik enerji kulak içi bölümlerde farklı işlemlere maruz kalır ve en son nöral kodlara çevrilir. Buradan işitsel sinir lifleri (aksonlar) ile iletilen nöroelektrik aktivite beyin tarafından algılanır ve işitme gerçekleşmiş olur (Şekil 4.a) (Cicarelli ve White, 2015; Everest, 2007; Howard ve Angus, 2009; Schnupp vd., 2011; Yates, 1995).



(Cicarelli ve White, 2015)

Şekil 4. (a) İnsan işitme sistemi, (b) Kulak zarı ve orta kulak, (c) Koklea kesiti, (d) Korti organı.

İnsan kulağı ve işitme duyusunun işleyişi hakkında bilgi edinmek, psikoakustik olarak sesin nasıl algılandığının, dolayısıyla işitilebilir seslerin niteliği ve niceliklerinin incelenmesi, çalışmanın daha iyi anlaşılması açısından kolaylık sağlayacaktır. Bu bölümde bu çalışma için gerekli görülen kısımlara yüzeysel olarak değinilecektir.

İnsan İşitme Sisteminin Anatomik ve Fizyolojik Yapısı

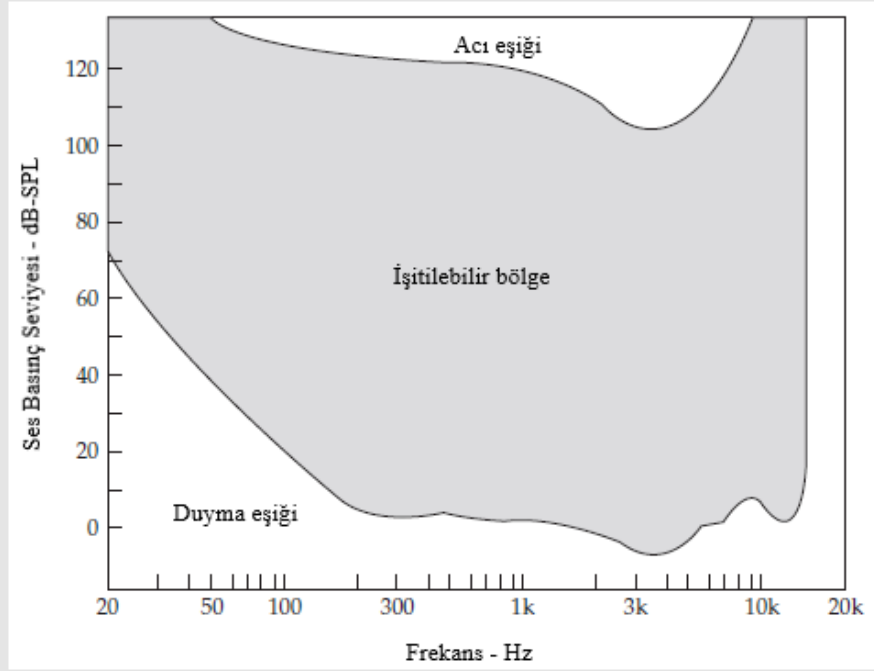
İnsan kulağı dış kulak, orta kulak ve iç kulak olmak üzere üç ana bölümden oluşur. Dış kulakta, kulak kepçesi (*pinna, auricle*), kulak kepçesi çukuru (konka, *concha*), işitme kanalı (*auditory meatus, ear canal*) ve kulak zarı (*tympanic membrane*); orta kulakta, aynı zamanda insan bedeninde bulunan en küçük kemikler olan birbirine kenetlenmiş halde zincirleme hareket eden (*ossicles chain*) çekiç (*malleus, hammer*), örs (*incus, anvil*) ve üzengi (*stapes, stirrup*) kemikçikleri (*ossicles*); iç kulakta ise içerisinde korti organını saklayan, oval pencere ile açılan ve şekli salyangozu andıran, içi sıvı dolu koklea bulunur (Şekil 4.a-b-c-d). İşitme duyusunun alıcısı olan dış kulakta bulunan kulak kepçesi ve konka, dış ortamda yayılmakta olan ses dalgalarını toplayarak akustik bir anten görevi görür ve işitmenin ilk adımını atar. Kulak kepçesi ve konka sesin yönünü tayin etmede önemli rol oynar. Konka akustik rezonatör gibi davranır. Toplanan ses dalgaları işitme kanalı ile orta kulağı dış kulaktan ayıran kulak zarına yönlendirilir. Çapı 9 mm olan konka ile kulak zarı arasındaki mesafe yaklaşık 25-35 mm arasındadır. Çapı yaklaşık 7,5 mm olan silindirik işitme kanalı girişi (*ear canal entrance*) ile kulak zarına kadar olan uzunluğu yaklaşık 19 mm'dir. Kulak zarı titreşerek, oluşan titreşimden kaynaklanan mekanik enerjiyi orta kulakta bulunan kemikçikler zincirine aktarır. Kemikçikler ise titreşimi orta kulakta bulunan kasların kasılmasıyla kokleaya açılan oval pencereden iç kulağa aktarır. Koklea içerisindeki sıvıda, akustik empedanstan dolayı daha hızlı (havaya kıyasla yaklaşık 4 kat hızlı, 1480 m/s) ilerleyen ses dalgaları, korti organı içinde bulunan bazılar zarın uzunluğu boyunca farklı frekanslara yanıt veren bölgelerinde rezonans oluşturur. Korti organını çevreleyen iç ve dış olmak üzere sayısı her bir kulak için yaklaşık 15000 adet kadar tüy hücresi, oluşan rezonansların konumsal verilerini, yani bu verilere karşılık gelen frekans bilgilerini, aksonlar yardımı ile önce boynun arkasında yer alan beyin sapına oradan da beynin sol lobunda bulunan işitsel kortekse iletir. Böylelikle iç kulakta bulunan kokleaya ulaşan mekanik enerji, tüy hücreleriyle nöro-elektiriksel ilettime çevrilmiş ve işitsel kortekste fizyolojik olarak işitme tamamlanmış olur. İşitilebilir frekans aralığının sınırları teorik olarak 20 Hz – 20 kHz aralığında tanımlansa da, bebeklerde bu aralığın üst sınırı 20 kHz'den biraz daha yükseğe çıkmakla beraber erişkinlerde yüksek frekans hassasiyeti azalarak, tüy hücrelerinin kaybından olduğu düşünülen bir nedenle, kişinin yaşına göre işitilen frekans aralığı daralarak kişiden kişiye değişmektedir. Yetişkinlerde

azalan yüksek frekans hassasiyeti açısından işitilebilir üst sınır 15 kHz - 17 kHz olarak değerlendirilmektedir (Cicarelli ve White, 2015; Howard ve Angus, 2009; Pickles, 2012; Poldy, 2001; Purves, vd., 2004; Schnupp vd., 2011; Ulehlova vd., 1987).

Algılanan Ses seviyeleri

İşitsel kortekste tamamlanan işitmenin beyin tarafından yorumlanması oldukça farklı ve işitmenin nasıl algılandığıyla yani işitmenin psikolojisiyle (psikoakustik) açıklanabilir. Psikoakustik, ölçülebilen fiziksel büyüklükler ile insan tarafından bildirilen psikolojik büyüklükleri ilişkilendiren Psikofizik biliminin akustik ile ilgili parametrelerini çalışın bilim dalıdır (Hartmann, 2013; Howard ve Angus, 2009). Bu çalışma kapsamında işitilebilir sesin frekansı ve ses seviyesi ile ilişkili olarak değişkenlik gösteren, algılanan ses seviyeleri ile ilgili bilgi verilecektir. Bunun için insanın duyabileceği ses aralığına (Şekil 3'te gösterilen beyaz alan) yakından bakmak faydalı olacaktır (Şekil 5).

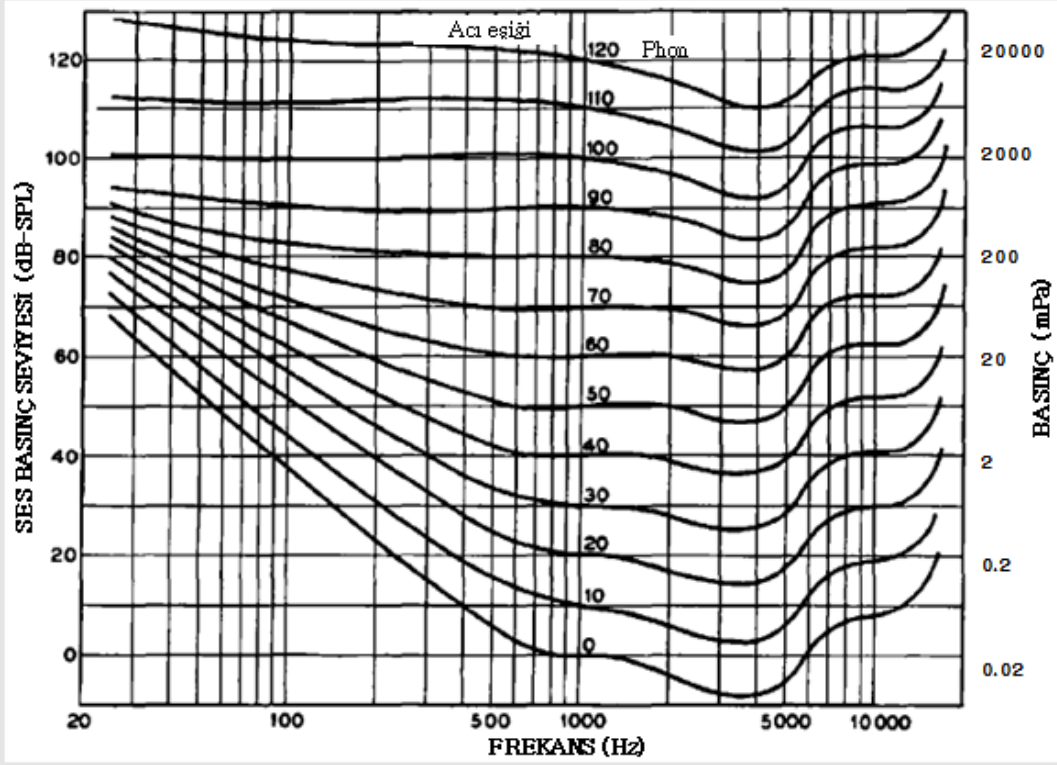
İnsanın bir ses duyduğunda sesin ne kadar yüksek ya da kısık olduğunu belirttiği parametreler “çok yüksek”ten “çok kısık”a doğru azalırken, bunlara karşılık gelen müzik notasyonları Fortissimo (*ff*)’dan Pianissimo (*pp*)’ya doğru gider. Müzikal notasyonların çoğu İtalyanca kelimelerle ifade edilir ve evrenseldir. Kişiden kişiye değişebilecek bu belirtilen parametrelerin, bir ses dalgasının frekansının tam olarak ne olduğu veya ses seviyesinin kaç dB SPL olduğu gibi tam olarak ölçülebilen mutlak bir değere karşılık gelmeyeceği açıktır. Ses yüksekliği (*Loudness*), insanın bir ses duyduğunda o sesin büyüklüğünü ortaya koyan psikolojik bir terimdir ve algılanan ses seviyelerini anlamlandırmaktadır. İngilizce karşılığı *Loudness* olan bu terim, tükçeye “gürlük” olarak çevriliyor olsa da “gürlük” kelimesinin sık kullanılmayan bir kelime olması sebebiyle bu çalışmada “ses yüksekliği” olarak kullanılmasının daha kapsayıcı ve anlaşılır olacağı düşünülmüştür. Şekil 5'te koyu gri alanla gösterilen insanın işitebileceği sesin frekans ve seviyesine göre değişimi, aslında bir sesin ne kadar yüksek veya kısık olabileceğinin algılanması hakkında bilgi vermektedir (Benward ve Saker, 2009; Everest, 2001; Fletcher ve Munson, 1933; Howard ve Angus, 2009; Önen, 2012; Zeren, 2014).



(Everest, 2001)

Şekil 5. İnsan kulağının frekans ve ses basınç seviyesine göre değişen işitme kapasitesi.

İşitsel olarak aynı ses seviyesinde algılanan farklı frekansları gösteren grafik *Fletcher-Munson* eğrileri veya *equal loudness curves* olarak literatüre geçmiştir. Uluslararası Standartlar Organizasyonu (ISO, *International Organization for Standardization*) tarafından ISO 226:2003 ile standartize edilmiştir. Bu çalışma kapsamında bu eğrilerden “aynı algılanan ses yüksekliği eğrileri” veya “eş duyum eğrileri” olarak bahsedilecektir. *Fletcher-Munson* eğrileri Şekil 6’da, dB SPL’e karşılık gelen basınç değişimleri de eklenerek gösterilmiştir. Frekansı 1000 Hz olan bir *pure tone*’un ses seviyesi, ses yüksekliği seviyesi (*phon*) olarak referans alındığında; aynı ses yüksekliğinde algılanan farklı frekanslar, farklı ses seviyelerine denk gelmektedir. Her bir eğri takip edildiğinde ses seviyeleri farklı olsa bile aynı seviyedeymiş gibi algılanmaktadır. Buna göre kısık sayılabilecek dB SPL’lerde 1000 Hz’lik bir sesin bas tonlardaki sesler ile aynı seviyede duyulması için bas tonlardaki seslerin ses seviyesinin çok daha yüksek olması gerekmektedir (Fletcher ve Munson, 1933; Howard ve Angus, 2009; Schnupp vd., 2011).



(Fletcher ve Munson, 1933; Muşdal ve Kurt, 2019b)

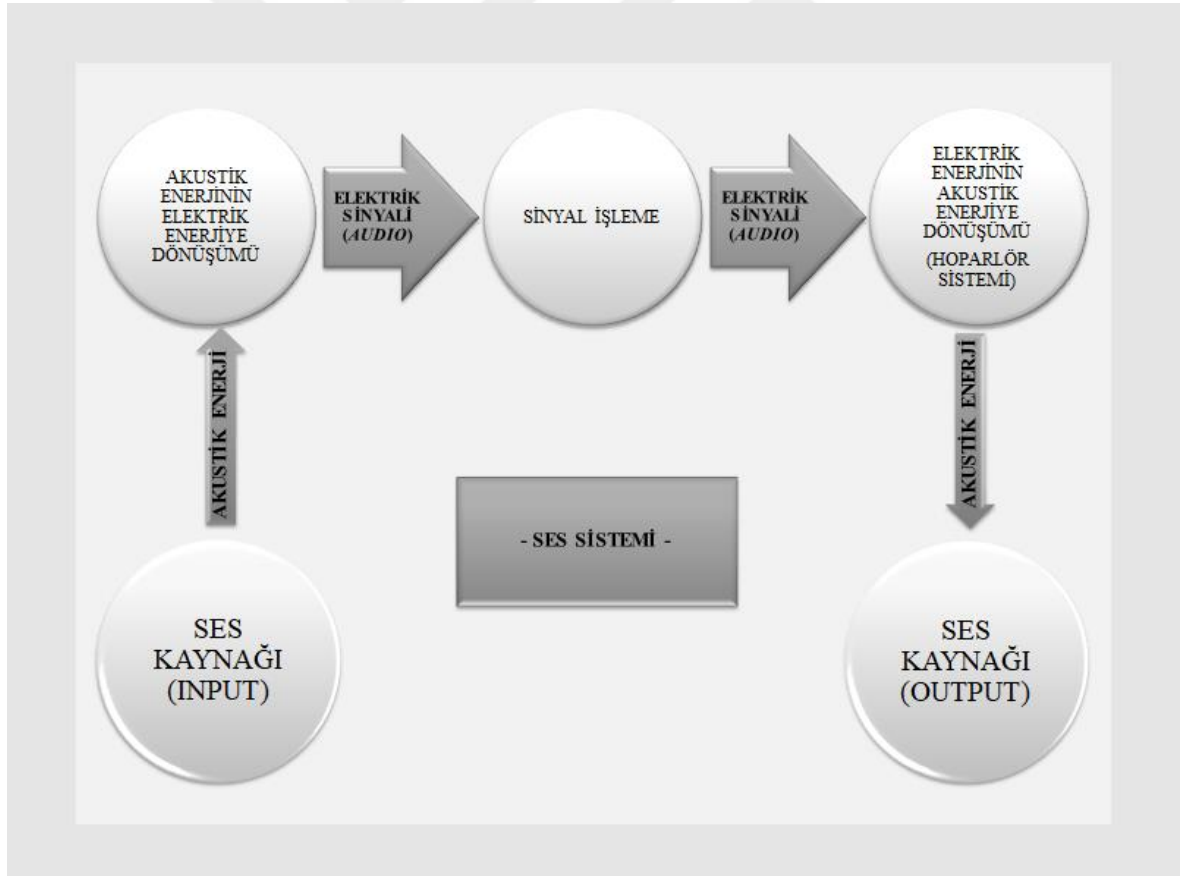
Şekil 6. dB SPL'e karşılık gelen basınç (mPa) değerleriyle Fletcher Munson eğrileri.

1.1.3. İşitilebilir Ses Üreten Konvansiyonel Cihazların Temel Çalışma Prensibi

Bu bölümde tezin konusu olan PA hoparlör geliştirilmesinin neden gerekli olduğunu daha iyi anlamak için konvansiyonel ses iletim cihazlarının (hoparlörlerin ve kulaklıkların) temel çalışma prensipleri hakkında genel bilgi verilecek ve içeriklerindeki manyetik ve/veya elektronik aksamaların varlığı nedeniyle başka elektronik cihazlarla EMI'e girmelerine sebep olan EM bileşenlere odaklanılacaktır.

Hoparlörler

Akustik bir ses kaynağından ilerleyen ses dalgaları mikrofon gibi ekipmanlarla bilgisayarlar aracılığıyla kaydedildikten sonra ses işleme yazılımları yardımı ile ses sinyallerine dönüştürülür. Ses sinyalleri genellikle bu konu üzerinde uzman olan, akustik ortamda oluşan sesleri uygun teknik bilgi ve ekipmanlarla dinleyicilere sunulmasını sağlayan ses mühendislerince istenilen seviyelere getirilerek ve gerekli görülen ses işleme işlemleri yapılarak tekrar akustik ortama iletilmek üzere hoparlörlere verilir. Hoparlörler, dijitalleştirilmiş akustik sesin üzerinde gerekli işlemler yapıldıktan sonra sesin yeniden akustik ortamda duyulmasını sağlayan ses sisteminin bir parçasıdır (Şekil 7) (Davis ve Jones, 1989; Evans, 2011; McCarthy, 2007; Musdal, 2013).

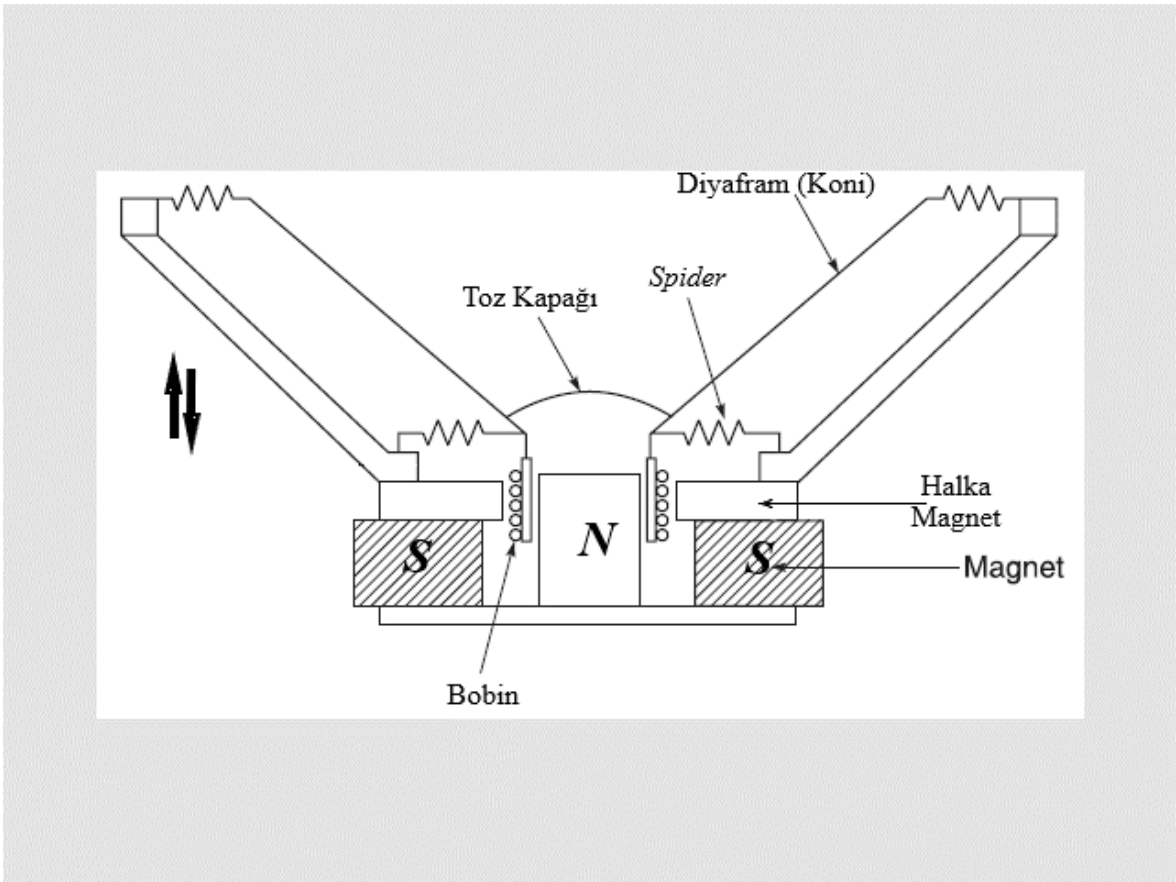


(Davis ve Jones, 1989; McCarthy, 2007)

Şekil 7. Kavramsal ses sistemi temsili.

Alexander Graham Bell (1875) işitme engelli bireylerle iletişim kurmak ve konuşmalarına yardımcı olabilmek için bir dönüştürücü yardımıyla konuşmanın grafiksel olarak gösterimini bulmaya çabalarken telefonun ve ardı sıra gelecek benzeri birçok icadın mucidi olarak tarihe geçmiştir. Şüphesiz, ilk ses iletim cihazı olarak nitelendirilecek telefon ile beraber ortaya çıkmış olan hoparlörler 1875’li yıllardan günümüze kadar uzanan bu zaman diliminde yeni teknolojik gelişmelerle işitilebilir sesin en iyi şekilde iletiminin sağlanması amacıyla belirli standartlar oluşmasına rağmen hala geliştirilmektedir. Hoparlörler; müzik ile alakalı her mecrada ve televizyon, telefon gibi cihazlarda sesin iletimi için kullanılan, gönderilen ses ile ilgili (analog veya dijital) bilgileri mekanik ses dalgalarına dönüştürerek sesi istenilen seviyede işitilebilir hale getirebilen bir elektroakustik (elektromekanik-akustik) ses iletim cihazı olarak tanımlanabilir. Başlıca pasif (harici amplifikatör ile gücünü sağlayan), aktif (dinamik, gücünü kendi sağlayan) ve elektrostatik (gücünü yüksek voltajlı kapasitörlerle sağlayan) olarak üç tip olmak üzere, birçok hoparlör çeşidinden bahsetmek mümkündür. Hoparlörlerin en dışta bulunan genellikle koni şeklindeki farklı materyallerden oluşabilen diyaframın, gelen ses sinyallerine uyumlu olarak hareket etmesiyle havada oluşturduğu titreşim sayesinde ses yeniden üretilmiş olur. Hoparlörlerin ses üretmek için ihtiyacı olan gücü sağlayan motorlarında yer alan hareketli bobin (HB) fikri hoparlörlerden bağımsız olarak ilk kez 1898 yılında Sir Oliver Lodge tarafından ortaya konmuştur. 1925 yılında Rice ve Kellogg tarafından ilk kez ortaya konan ve temelde hala aynı teknolojiyle yani hareketli bobin motoru (HBM, lineer EM motor, EM dönüştürücü, EM aktarıcı, *electromagnetic transducer*) ile çalışan doğrudan sesi üreten dinamik hoparlörler, hoparlörler için dönüm noktası olmuştur. 1930’ların sonuna doğru mıknatıs teknolojisindeki gelişmelerden de faydalandıktan sonra günümüzde çok az değişikliğe uğrayarak güncelliğini koruyan ve o günden bugüne konvansiyonel olarak yaygın şekilde kullanıldığı için tez kapsamında sadece dinamik hoparlörlerin çalışma prensibine daha detaylı bir şekilde bakmak faydalı olacaktır. Düşük maliyetli, genellikle bir kutu şeklindeki hoparlör kabini içerisinde yer alan dinamik hoparlörün HBM’nun tipik bir örneği Şekil 8’de gösterilmektedir. Magnetlerin ürettiği salınımlı (radyal) manyetik alan, bobine dışarıdan verilen akımın kontrol ettiği bir manyetik kuvvet oluşturur. Açısız harekete izin vermeyen sadece düzlemsel hareket edebilmesini sağlayan *spider* tarafından desteklenen elastik yapıdaki diyaframın merkezine bobin tarafından güç sağlanır. Bobinlerin yüksek sıcaklıkta çalışmasının beklendiği durumlarda, bobinin genişlemesine izin vermek için gereken ekstra boşluk dışında, bobinin

hareket edebilmesi için bobin içinde ve dışında hoparlörün kullanım amacına göre 0,15 mm ile 0,4 mm'ye kadar değişebilen boşluklar bırakılır. Diyafram mıknatısa doğru hareket ettiğinde, kubbe şeklindeki, üzerinde havalandırma delikleri bulunan diyafram ile bobini birbirine bağlayan toz kapağı ve *spider* altında kalan hava sıkışıp gevşeyerek bir ses kaynağına dönüşmüş olur. (Brice, 2001; Davis ve Jones, 1989; Dickason, 2006; McCarthy, 2007; Watkinson, 2001; Young ve Freedman, 2012).



(Watkinson, 2001)

Şekil 8. Dinamik, lineer EM motorlu konvansiyonel hoparlörün çalışma prensibi

Gücünü HBM'ndan alan dinamik hoparlörlerin manyetik devre tasarımının başlangıç noktası olarak nitelendirilen Bl çarpımı (Bl product), aslında fizikte elektromotor kuvveti (EMF) olarak tanımlanan kuvvetten kaynaklanan *Tesla*.metre (T.m) cinsinden motoru süren gücün bir ölçüsüdür. Bu tip hoparlörler fizikte, akım taşıyan bir tel veya iletken bir döngü üzerine uygulanan manyetik kuvvetlerin yaygın bir uygulaması olarak

değerlendirilmektedir. I (Amper), boşlukta bulunan bobin üzerindeki akım, l (metre), bobini oluşturan telin gerçek uzunluğu ve B (Tesla), magnetlerin oluşturduğu manyetik alan olmak üzere; F_M (Newton), bobin üzerindeki manyetik kuvvet;

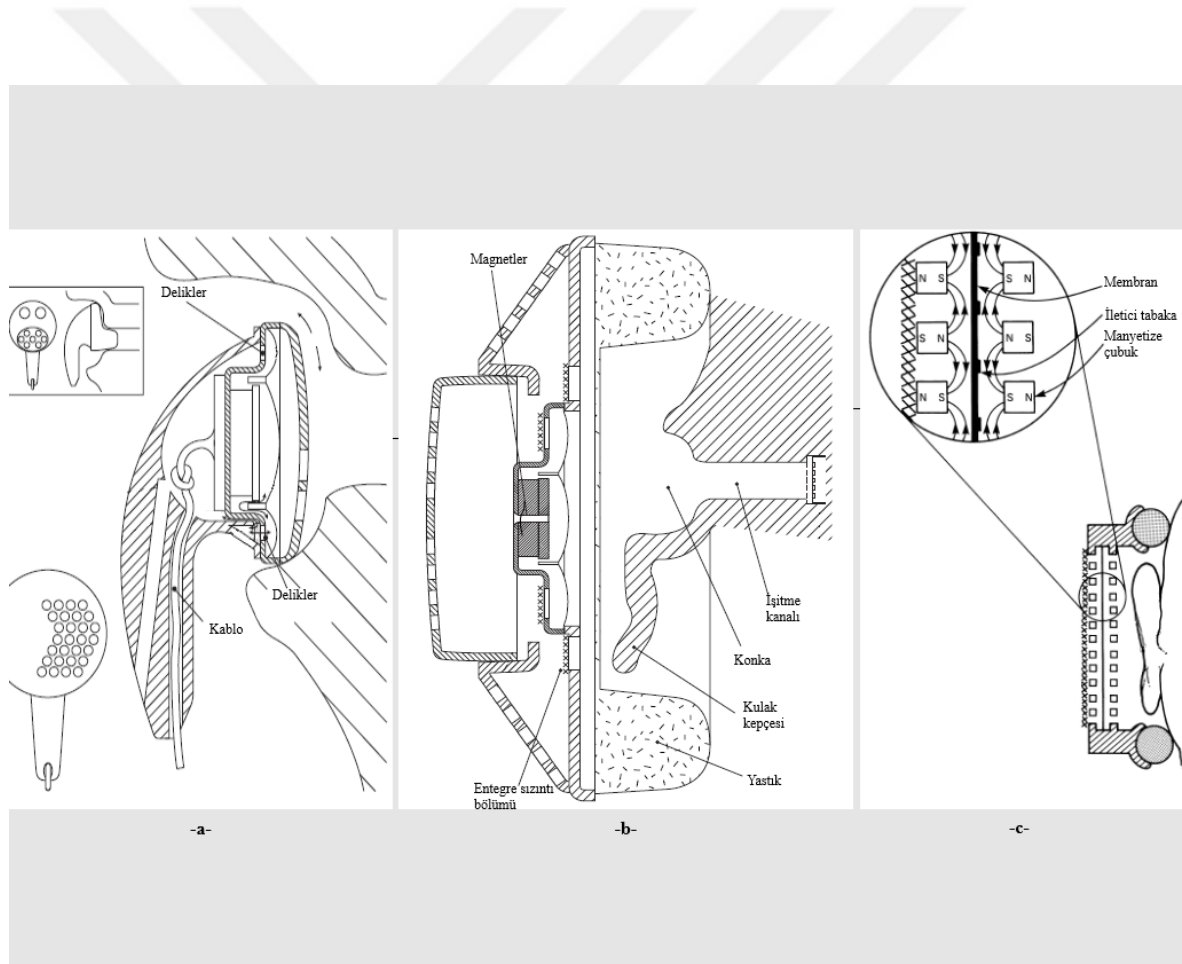
$$\vec{F}_M = I(\vec{l} \times \vec{B}) \quad (1.8)$$

şeklinde ifade edilir. Mekanik empedansın bir fonksiyonu olarak hesaplanan elektriksel empedans, hareketli bir bobin motorun empedans dönüşümünün, bir transformatör olarak ele alınarak simüle edilebileceğini göstermektedir. Empedanslar karşılaştırıldığında ortaya çıkan, Bl çarpımının karesidir. Bl çarpımı, hem bobin üzerindeki manyetik kuvvetten hem de empedansların oranlamasında ortaya çıkmasından dolayı, HBM ile çalışan hoparlörlerin önemli bir özelliğidir. Akımdan bağımsız tutularak yalnızca Bl çarpımı olarak bilinmektedir. B ve l parametrelerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi oldukça nadirdir. Bl çarpımının birimi Tesla.metre (veya Newton/Amper)'dir. Toz kapağı ile birbirine bağlı diyafram ve HB'in tamamı olan toplam hareketli kütle, piston olarak düşünüldüğünde etkidiği alanın bilinmesi ses basıncının hesaplanmasını sağlayacaktır. Hoparlörün verimliliği ve hassasiyeti, toplam hareketli kütle ve Bl çarpımına bağlıdır. Diyaframın etkidiği belirli bir alan için Bl çarpımının artırılması sürücünün hassasiyeti olarak belirtilen çıktıyı (*output*) arttırırken, hareketli kütle arttırılması çıktıyı azaltır (Şekil 7. ve Şekil 8.) (Dickason, 2006; McCarthy, 2007; Watkinson, 2001; Young ve Freedman, 2012).

Kulaklıklar

Dünya çapında milyonlarca insan tarafından yaygın olarak kullanılan kulaklıklar (*headphones, earphones*), işitilebilir ses basıncına eş değer basınç sızdırabilen yapıda kapsüllere sahip, taşınabilir olması sebebiyle hareket halinde kullanılabilen, dinlenen sesin duyulması açısından kişiye özgü mahremiyet sağlayan ve herkes tarafından erişilebilir küçük hoparlörler olarak tanımlanabilir. Kulaklıklar genellikle müzik dinlemek, telefon veya video görüşmesi yapmak için kullanılmasının yanı sıra ses mühendislerinin

çalışma alanlarında, işitsel nöro-algısal çalışmalar veya odyometrik testler gibi işitmenin yer aldığı tüm alanlarda kullanılabilir. Kulaklıkların kulağa nasıl yerleştirildiğine bağlı olarak tasarımları açısından, frekans cevaplarına ve kullanım yerlerine göre değişen kulak içi (*in-ear*, *insert*, *intra-aural*), kulak üstü (*supra-aural*), dairesel (*circumaural*), kapalı (*closed*) ve açık (*open*) olmak üzere farklı çeşitleri bulunmaktadır. Çalışma prensipleri hoparlörlerle benzer yapıdadır. Hoparlörlerde olduğu gibi konvansiyonel olarak en sık karşılaşılan düşük maliyetli HBM’lu kulaklıklar (Şekil 9.a-b) ile piyasada yeni yeni yerini almasına rağmen oldukça maliyetli olan, içeriğinde çoklu manyetize çubuk sistemi barındıran izodinamik (*isodynamic*) kulaklıkların (Şekil 9.c) örneklerine Şekil 9’da sırasıyla yer verilmiştir. Bu iki çalışma prensibine sahip kulaklıkların temel özelliklerinin



(Poldy, 2001)

Şekil 9. Kulağa uygulanmış halde kulaklık çeşitleri: (a) HBM’lu, kulak içi kullanılabilen mini kulaklık, (b) HBM’lu, kulak üstü dinamik kulaklık, (c) İzodinamik kulaklık.

gerekli olan minimum ortalama parametrelerinin karşılaştırılmasına Tablo 3'te değinilmiştir. Bu çalışma için önemli olan EMI'yi yaratan Bl çarpımı, hoparlörlerle aynı prensiple çalıştığından dolayı kulaklıklar için de önemli bir parametredir. HBM'lu sistemden farklı olarak izodinamik kulaklıklar için tipik değeri 0.08 T olan manyetik alan, tek başına anlamlı olarak değerlendirilmektedir. Fakat pratikte uygulanan (piyasada bulunan) modellerde bu değer çok üstüne çıkıldığı gözlemlenmiştir. Hoparlörler, dıştaki diyaframları vasıtasıyla havada basınç farkı oluşturarak geniş bir hacme etki edebilecek şekilde sesi yeniden üretmelerine karşın; kulaklıklar, ya içerisindeki delikli veya boşluklu yapıdan direk kulak içine doğru işitme kanalına yönlendirilen ya da kendi tasarımı aracılığıyla kulağın hemen önünde yükseltici bir yastıkla (*cushion, pad*) yaratılan ufak hava boşluğuna doğru yönlendirilen, kulaklığın içindeki entegre sızıntı bölümü aracılığı ile kulaklık içerisinde ve kulak öncesi basınç odasında oluşturulan basınç farklılıklarının kulağa sızdırılması veya membran yüzeyinde düşük kütleli bir titreşim sistemi vasıtası ile yaklaşık en fazla 30 cm^3 'lük bir hacimde etki edebilecek şekilde sesi yeniden üretebilmektedir. Ayrıca, bir kulaklığın günümüz teknolojisi ile hangi kriterlere bağlı olarak tasarlanması gerektiği ile ilgili yapılmış çalışmalar ve standartlar literatürde mevcuttur (Hall III, 2015; Møller vd., 1994; Poldy, 2001; Zelechowska vd., 2020; Zwislocki, 1988).

Tablo 3

HBM'lu kulaklıklar ve İzodinamik kulaklıklar için temel parametreler.

		HBM	İzodinamik
Bl	(T.m)	4,5	0,72
Diyafram alanı	(m^2)	$8,8 \times 10^{-4}$	42×10^{-4}
Elektriksel d.c. direnç	(Ω)	124	200
1 V için aktarıcı (<i>transducer</i>) kuvveti	(N)	363×10^{-4}	36×10^{-4}
Aktarıcı için uygun basınç	(Pa)	41	0,86
Kulaklıktaki normal dinleme seviyesi	(Pa)	1	1

(Poldy, 2001)

1.2. Fotonik

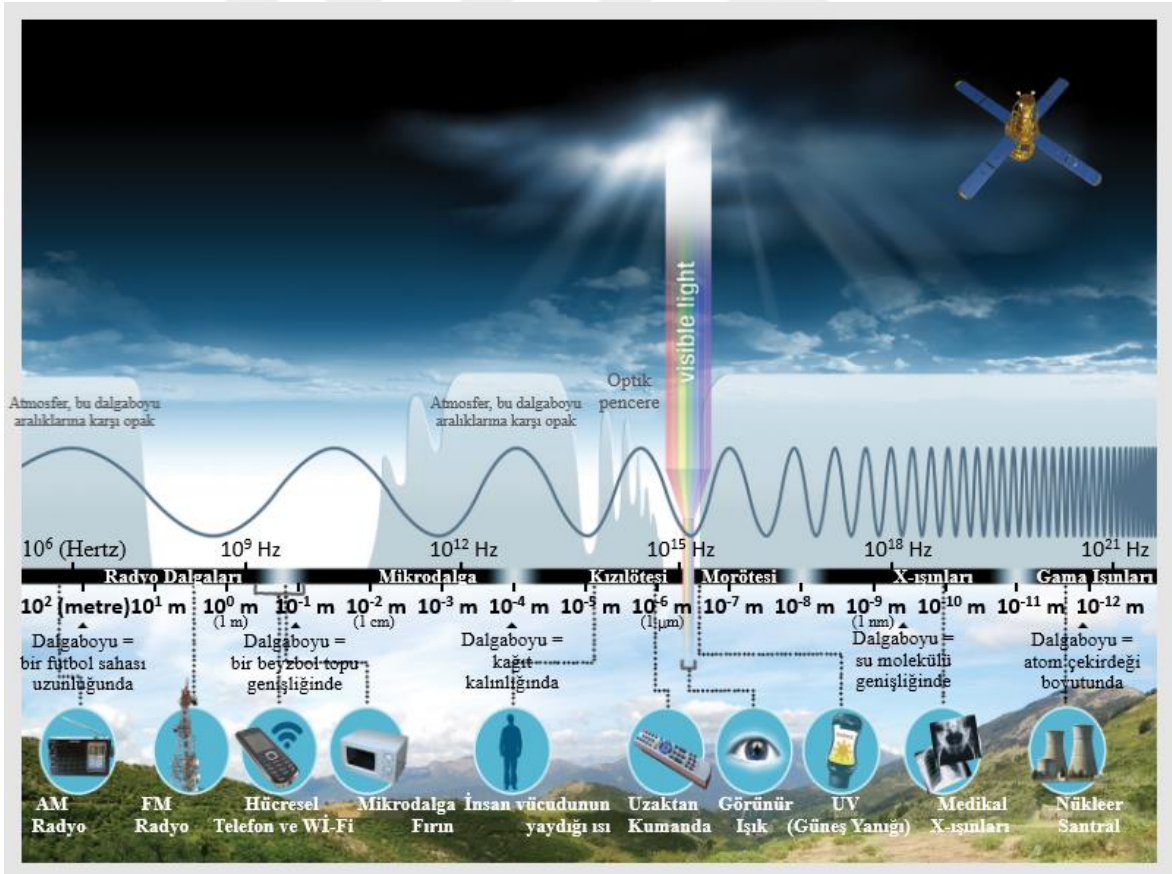
Etimolojik olarak fotonik kelimesi, Yunanca ışık anlamına gelen $\varphi\acute{o}\tau\omicron\varsigma$, $\varphi\omega\tau\acute{o}\varsigma$, $\varphi\acute{o}\varsigma$ (fotos, fos) kelimelerinden türetilmiştir. 1900'lerin başında klasik mekanik, kuantum fiziğiyle sarsılırken; kuantum fiziğinin katkılarıyla optik de yerini modern optiğe bırakmış, birbirini ardarda izleyen buluşlarla çalışılan yeni bir alan olan fotonik, “ışık bilimi” olarak özellikle *LASER* ışımının 1960'ta bulunmasıyla gelişerek ortaya çıkmıştır. Fotonik veya optoelektronik, ışığın üretilmesi, iletilmesi, amplifikasyonu, tespiti, modülasyonu ve manipülasyonu, kısacası ışık ile ilgili herşeyi içeren, kapsamı oldukça geniş bir bilim dalı olarak tanımlanması mümkündür (Beekes, 2010; Girtan, 2018; Quimby, 2006; Smith ve Melluish, 1947). Bu bölümde *laser* hakkında temel bilgilere, ışığın modülasyonu ve ışık-madde etkileşmesi gibi konulara yer verilecektir ve bu çalışmayla ilgili olan kısımlara odaklanılacaktır. Bunun için öncelikle fotonik bilimi ışığında ışığın doğası ile ilgili kısa bir girizgah yapılmasının faydalı olacağı düşünülmüştür.

Işık, maddesel bir ortamda yayılabileceği gibi ışık hızı (c) olarak bilinen sabit bir hızla, sesin aksine maddesel bir ortama ihtiyaç duymadan, boşlukta da yayılabilen elektromanyetik ışıındır. Boşlukta yayılan ışık hızının yaklaşık değeri $c \approx 3 \times 10^8$ m/s olarak hem deneysel hem de Maxwell Denklemleri olarak bilinen eşitlikler sayesinde ortaya konmuştur. Einstein'a 1905 yılında nobel ödülü kazandıran fotoelektrik etki ile ışığın aynı zamanda başka bir madde, elektron veya molekülle etkileşime girdiğinde parçacık gibi davrandığı gösterilmiştir. Bu kütesiz enerji parçacıklarına foton veya ışık kuantası adı verilmektedir. Frekansı ν , dalgaboyu λ olan fotonun enerjisi (E_c); h , *Planck* sabiti ($h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s) olmak üzere;

$$E_c = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.9)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Kısacası ışığın bu dalga-parçacık ikilemi olarak nitelendirilen özelliği açısından ışık, yayılırken elektromanyetik düzlem dalga, bir madde ile etkileşime girdiğinde ise parçacık olarak ele alındığında yapılan işlemler anlamlı olmaktadır. Uygulamada frekans aralıklarına göre nitelendirilen sesin aksine, ışığın niteliği

tanımlanırken dalga boyu aralıkları kullanılarak ifade edilmesinin daha anlamlı olduğu kabul edilmiştir. Elektromanyetik spektrumda, elektromanyetik dalganın dalga boyu aralıklarına göre ayrılan başlıca ışık türleri, bunlara karşılık gelen frekans aralıkları ve enerjilerine göre yaklaşık değerleri radyo dalgaları ($> 1 \text{ mm}$), mikrodalga ($1 \text{ mm} - 25 \mu\text{m}$), kızılötesi ($200 \mu\text{m} - 800 \text{ nm}$, *infra-red*, IR), görünür ışık ($800 \text{ nm} - 400 \text{ nm}$, *visible light*), morötesi ($400 \text{ nm} - 1 \text{ nm}$, *ultraviolet*), x-ışınları ($1 \text{ nm} - 1 \text{ pm}$) ve gama ışınları ($< 1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$) olmak üzere Şekil 10'da gösterilmiştir. IR aralıkta çalışılabilecek optik bölge $20 \mu\text{m}$ 'de son bulmasına karşın, yeni yapılan çalışmalarda uzak kızılötesi (*far-infrared*, $200 - 25 \mu\text{m}$) bölgesi mikrodalganın geniş bir kısmını içerecek şekilde tanımlanmaktadır. Lazer ışınının elektromanyetik spektrumdaki çoğu dalga boyu aralıklarına karşılık gelebilecek şekilde üretilebilmesi mümkündür (Hetch, 2007; Michaelian, 2010; Pearsall, 2003; Pedrotti, S.J. vd., 2007; Quimby, 2006; Siegman, 1986; Smith vd., 2007).



(NASA, 2010)

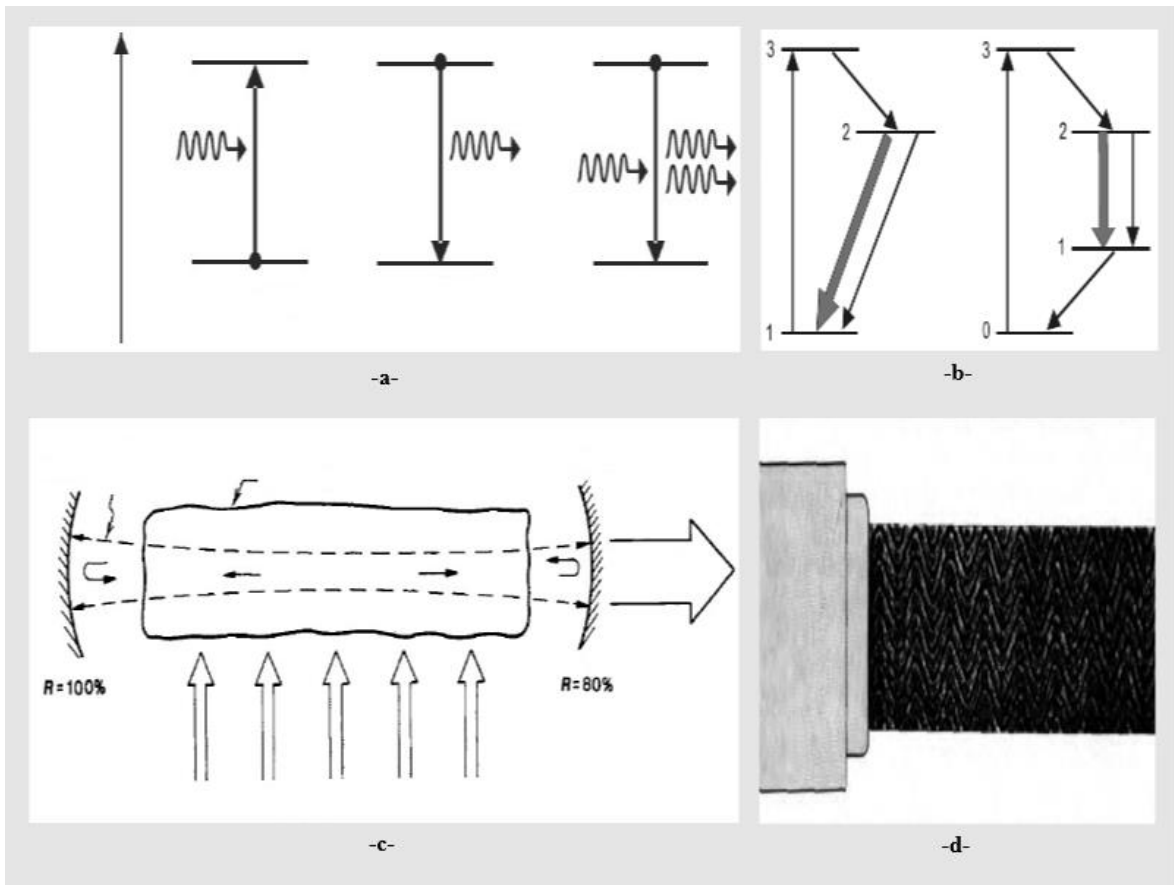
Şekil 10. Elektromanyetik spektrum.

1.2.1. Lazer Işığının Özellikleri ve Yayılımı

Laser, “ışığın uyarılmış radyasyon emisyonu ile amplifike edilmesi” anlamına gelen İngilizce kökenli “*Ligh Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” (*LASER*) sözcüklerinin baş harflerinin akrostij yapılmasıyla elde edilmiş bir sözcüktür ve aslında lazer ışınının işleyişini anlatan kelimelerin de belirttiği üzere, bir uyarılmış emisyon cihazıdır (Ball, 2006; Kasap, 2001; Milonni ve Eberly, 2010). Bu bölümde bu çalışma kapsamında ilgilenilen ışık kaynağı bir diyot *laser* olduğu için, öncelikle lazerin kendine özgü temel çalışma prensibi, genel özellikleri sebebiyle diğer ışık kaynaklarından farklılıkları hakkında bilgi verilerek başlıca *laser* çeşitleri, yarı iletkenler ve diyot lazerler hakkında temel bilgilere bu çalışma ile ilgili önemli olduğu düşünülen kısımlar çerçevesince değinilecektir. Uyarılmış radyasyon emisyonunun (uyarılmış emisyon) ve dolayısıyla lazerin daha iyi anlaşılması için öncelikle, soğurma ve kendiliğinden (spontaneous) emisyon terimlerini ve lazeri oluşturan temel unsurların neler olduğunu anlamak faydalı olacaktır. Sırasıyla soğurma, kendiliğinden emisyon ve uyarılmış emisyon Şekil 11.a’da iki enerji seviyesi için gösterilmiştir.

Optik geri besleme sağlayan yüksek yansıtıcı kavite; kavite içindeki uygun atom, molekül veya kristal barındıran lazer kazanç ortamı; lazer kazanç ortamı içerisindeki aktif maddenin, atomik enerji seviyelerinin uyarılmasını sağlayacak nicelikteki optik veya elektriksel akım ile gerçekleşen pompalama mekanizması, lazer cihazının temel unsurlarını oluşturmaktadır (Şekil 11.b). Pompalama mekanizması, lazer kazanç ortamındaki genellikle aktif halde bulunan maddeyi nispeten daha uzun süre kalabileceği bir ve ya iki üst seviyedeki yüksek enerji seviyesine uyarır, burada yayımlanan foton, yansıtıcı kavite içerisinde tekrar lazer kazanç ortamına geri gönderilir. Optik geri besleme mekanizması sayesinde devam eden bu süreçte artık uyarılmış emisyon ile üretilmiş birbirine eş foton sayısı kısa sürede katlanarak çoğalır, buna nüfus tersinmesi (*population inversion*, tersine çoğalma) denir. Nüfus tersinmesi elde edebilmek için enerji seviyeleri açısından iki seviyeli lazer yapılması mümkün değildir. Lazer kazanç ortamındaki maddenin pompalama mekanizması tarafından daha yüksek enerji seviyesine uyarılması ile üç seviyeli veya dört seviyeli lazer yapılması mümkündür (Şekil 11.c). Nüfus tersinmesi, lazer kazanç ortamındaki maddenin atomlarının en az yarısının pompalanması (yüksek pompalama enerjisi) ile üç seviyeli lazerde elde edilebilirken dört seviyeli lazerde ise daha az sayıda

atom pompalanarak (düşük pompalama enerjisi) daha kolay elde edilebilmektedir. Nüfus tersinmesi sonucunda yayımlanan foton, gelen fotonla aynı fazda ve aynı yönde olmakla beraber aynı polarizasyon ve aynı enerjiye sahiptir. Bu işlem belirli bir eşik seviyesine ve çoğalmanın doyum noktasına gelinceye kadar devam eder. Çoğalma gerçekleştiği için sonunda ortaya çıkan foton ilk uyarılmış foton enerjisinden oldukça güçlü, stabil, çok dar dalga boyu aralığına sahip bir ışık ortaya çıkmış olur. Çıkan ışık, uyarılmış emisyon ile amplifike edilmiştir (*LASER*) (Ball, 2006; Kasap, 2001; Quimby, 2006; Siegman, 1986).



(Quimby, 2006; Siegman, 1986)

Şekil 11. (a) Soğurma - kendiliğinden emisyon - uyarılmış emisyon, (b) Lazeri oluşturan temel unsurlar, (c) Üç seviyeli ve dört seviyeli lazer, (d) İdeal lazer ışınının yayılımı.

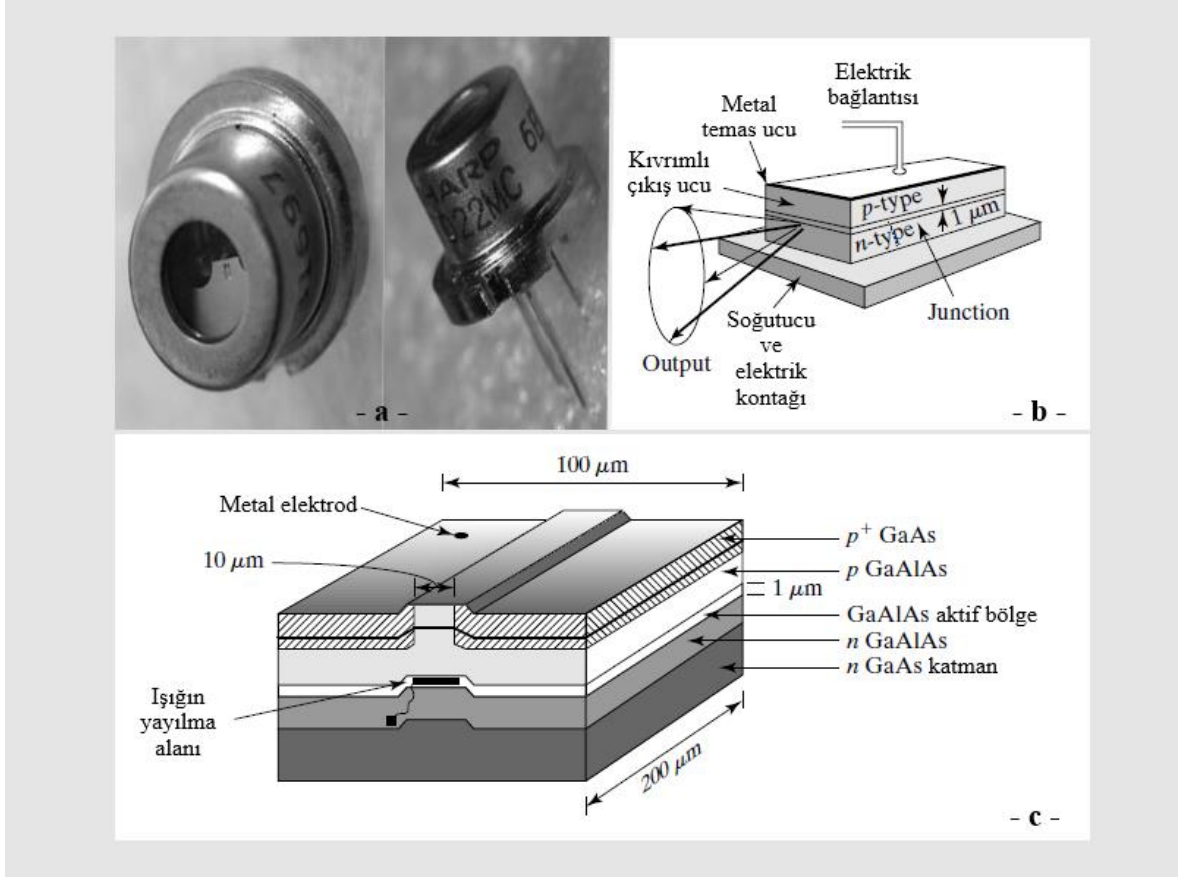
Lazerin çalışma prensibi sebebiyle ortaya çıkan ışık, uzaysal ve zamansal olarak eş fazlı (koherans, uyumlu, tutarlı) olması sebebiyle çok dar dalga boyu aralığına (yönlendirilebilirlik) ve yüksek güç yoğunluğuna (parlaklık, *brightness*) sahip tek renkli

(monokromatik) ışık olma özelliklerini taşımaktadır. Ayrıca, mercek, lens ve benzeri optik sistemler yardımı ile de olsa başka hiç bir ışık kaynağı koherans özelliğinden dolayı ideal bir lazer ışını kadar dar bir yayılma açısına sahip değildir (Şekil 11.d). Aynı zamanda çıkan ışın, düzgün ve sürekli dalga cephelerine sahip çok küçük sapma açısı ile uzun süre ve mesafelerce dağılmadan (ıraksamadan) ilerleyebilmektedir. Sürekli kipte (*continious wave*, CW) yayılan lazer ışınları, nüfus tersinmesini kontrol edecek şekilde lazer kavitesi içerisine yerleştirilecek Q-anahtarlama olarak adlandırılan, açılıp kapanabilen bir anahtarlama sistemi ile femto saniyeler mertebesindeki çok kısa süreli zaman aralıklarıyla atmalara çevrilerek kısa ve yoğun enerjili ışık darbeleri olarak, lazer darbesi (*pulsed-laser*) üretilmesine izin verir. Aynı işlem *mod-locking*, mekanik *chopping*, nonlinear kristaller yardımı ile elektro-optik q-anahtarlama gibi bir çok farklı yöntem ile de gerçekleştirilebilmektedir. Burada, oluşan lazer darbelerinin zaman içindeki değişiminin bir ölçüsü olan optik sinyalin “görev döngüsü” (*duty cycle*, *duty factor*) terimi devreye girmektedir. Lazerin çalıştığı süre içinde ortaya çıkan lazer darbelerinin oranı olduğu için % birimi üzerinden ifade edilmektedir. CW lazerler için çalıştığı süre boyunca bir kesinti veya darbe sözkonusu olmadığı için görev döngüsü %100 olarak kabul edilmektedir. Bunun dışında, kristallerde bulunan iyonlar, çeşitli katkılı yarı iletkenler, gazlar, gaz karışımları, bazı organik boyalar gibi bir çok malzeme lazer kazanç ortamı olarak kullanılabilir. Yarı iletken malzemeler kullanılarak yapılan diyot lazerler dışında, günümüzde yeni bir lazer türü olarak ortaya çıkmış kuantum *cascade* lazerlerle (QCL) da sıkça karşılaşılmaktadır. (Ball, 2006; Milonni ve Eberly, 2010; Pedrotti, S.J. vd., 2007; Quimby, 2006; Svelto, 1998).

Katkılı Yarı İletkenler ve Diyot Lazer

Lazer ortamı olarak katkılı yarı iletkenlerden faydalanıldığında, kullanılan malzemenin atomik bağlarının daha kolay uyarılabilme özelliğinden ve tasarımından kaynaklı olarak ışığı üretmek daha kolay ve verimlidir. Diyot lazerler, katkılı yarı iletken malzemelerden yararlanılarak çeşitli dalga boylarına sahip olacak şekilde tasarlanabilmekte ve diğer lazer türlerine göre boyutsal olarak oldukça küçük, daha az maliyetli ve kullanışlıdır (Şekil 12.a). Yarı iletken bir malzemenin katkılanması elektron sayısını

azaltacak şekilde pozitif yük taşıyıcıları açısından (*holes*) zengin p-tipi ve elektron sayısını artıracak şekilde negatif yük taşıyıcıları açısından zengin n-tipi olmak üzere iki şekilde oluşturulabilir (Meschede, 2004; Pearsall, 2003; Pedrotti, S.J. vd, 2007).



(Pedrotti, S.J. vd, 2007)

Şekil 12. (a) Bir diyot lazerin gerçek görüntüsü, (b) p-n *junction* diyot lazer, (c) GaAs katkı yarı iletken diyot lazer örneği.

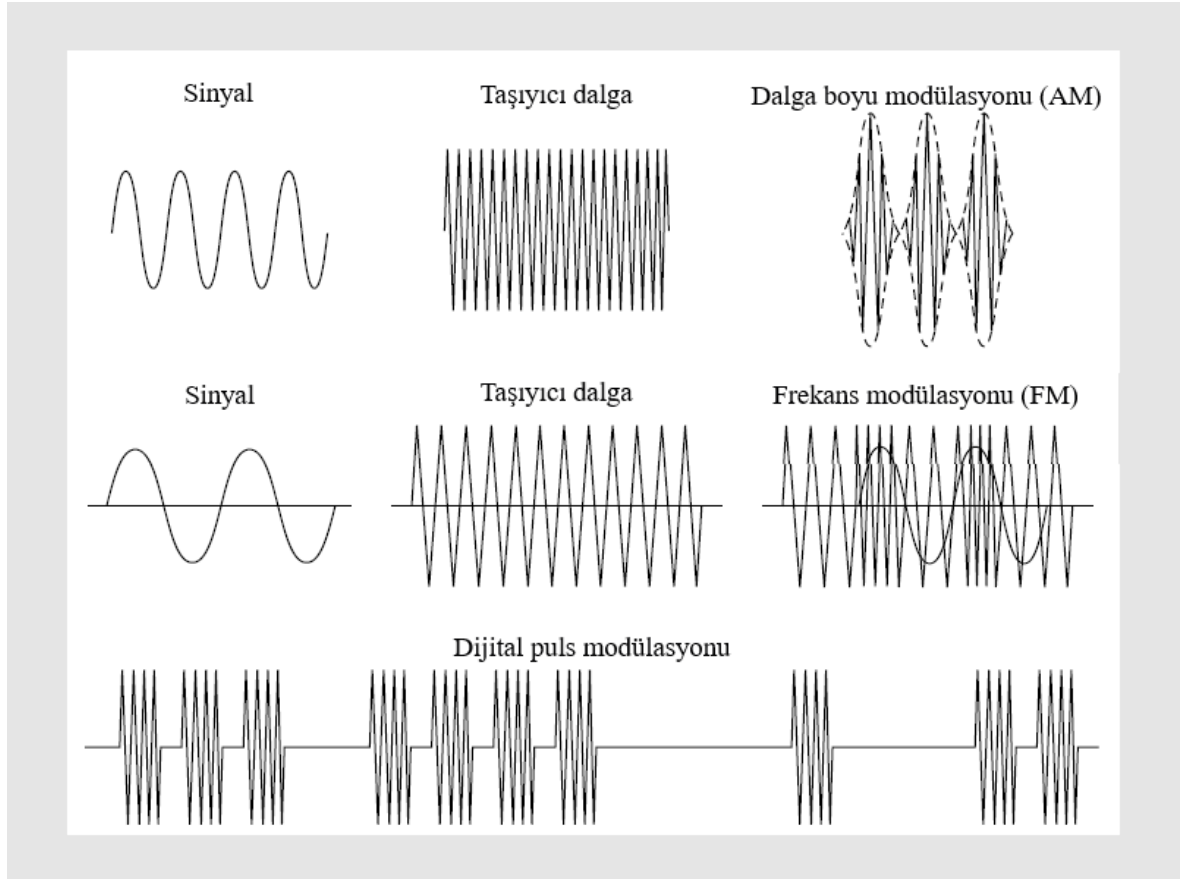
Çeşitli dalga boylarında ışık çıktısı alabilmek için, çeşitli bant aralıklarındaki enerjilere sahip olabilecek şekilde tasarlanabilen yarı iletken malzemeler ve bu malzemelere atomik olarak bağlanmaya uygun nitelikte başka bir maddenin katkılanması ile diyot lazer oluşturulabilmektedir. Lazer kavitesi olarak kullanılan mikrometre boyutlarındaki ince katmanlar halinde bulunan p ve n tipi yarı iletken malzemelerin birleştiği nokta, diyot lazer için standart lazer tasarımındaki yüksek yansıtıcı yüzeylermiş gibi davranış sergileyerek geri besleme mekanizmasını oluşturur. Lazer kazanç ortamı

olarak katkılı yarı iletken katmanları kullanılarak elektronların, elektriksel akım pompalama mekanizması ile nispeten daha kolay uyarılması sağlanmaktadır. Yani pompalama mekanizması bir voltaj kaynağı ile sürülmesi sonucu p-n eklemi (*junction*) sağlanarak elde edilmektedir (Şekil 12.b-c). Diyot lazerlerin dezavantajlı olarak sayılan bir özelliği, diğer lazer türlerine kıyasla çıktı alınan ışının asimetric çıkış açıklığıdır (Şekil 12.b-c). Fakat bu durumun çözümü, diyot lazerin çıkışının doğrudan, sinyali istenilen küçük mesafelerden kilometrelerce öteye neredeyse kayıpsız bir şekilde taşıyabilme özelliğine sahip fiber optik kabloya bağlanması veya kısa odaklı bir lens yardımı ile hizalanmasıdır. Diyot lazerlerin pompalama mekanizması olan elektriksel akım değiştirilerek kolayca modüle edilebilmektedir (Pearsall, 2003; Pedrotti, S.J. vd, 2007). Bu da diyot lazerin bu çalışmada yer almasının en önemli sebeplerinden biridir. Şekil 12’de gerçek boyutlu bir diyot lazer, p-n ekleminin (*junction*) temel gösterimi ile örnek olarak katkılı yarı iletkenlerden oluşturulmuş bir p-n türü diyot lazer temsili olarak gösterilmiştir.

1.2.2. Işığın Modülasyonu

Bu bölümde modülasyon hakkında kısa bir giriş yapıldıktan sonra doğrudan bir diyot lazerin modülasyonunun nasıl gerçekleştiği ile ilgili temel bilgilere yer verilmiştir. En genel anlamıyla, modülasyon, ışığın belli spesifik bir özelliğinde yapılan değişiklik yardımıyla bilgi eklenmesi olarak tanımlanabileceği gibi; ışığın modülasyonu ise, bir bilgi verisinin ışık ile taşınması işlemidir. Görsel, işitsel veya kodlanmış bilgisayar verileri gibi bir bilgi içeren analog veya dijital sinyallerin optik bir ışığa çeşitli yöntemlerle modüle edilmesiyle taşınması yalnızca ışığın modülasyonu ile mümkündür. Modüle edilmiş veriler bir alıcıya yönlendirilerek, tekrar ışık tarafından taşınmadan önceki sinyallere dönüştürülür, yani demodüle edilerler. Işığın modülasyonu, taşıyıcı ışığın dalga boyunun (*amplitude modulation, AM*), frekansının (*frequency modulation, FM*), fazının, polarizasyonunun, kırılma indisinin veya yoğunluğunun modüle edilmesi gibi bir çok yöntemle harici ve dahili olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 13’te temel modülasyon çeşitleri ve modülasyon formları gösterilmiştir. Harici modülasyon yapılabilmesi için modüle edilen sinyal bilgisini ekleyecek şekilde, modülasyon için tasarlanmış, ışığın yayılma yolunun optik yoğunluğunda veya kırılma indisinde değişiklik yapılmasıyla çalışan ve ışığı, mekanik olarak kesintiye uğratan *chopper, shutter* gibi çeşitli

aletlerden veya optik olarak kesintiye uğratan akusto-optik (AOM), elektro-optik, manyeto-optik gibi çeşitli modülatörlerden yararlanılabilmektedir. (Ball, 2006; Pearsall, 2003; Pedrotti, S.J. vd, 2007; Smith vd., 2007).



(Pedrotti, S.J. vd, 2007)

Şekil 13. Başlıca modülasyon çeşitleri.

Günümüzde dijital iletişim, uygulama açısından nispeten daha kolay olması sebebiyle bilgiyi taşıyan kaynağın ışık yayan diyot (*light emitting diode*, LED) ya da diyot lazer (katkılı yarı iletken lazerler) olduğu fiber optik sistemlerle yoğunluk modülasyonu yapılarak gerçekleştirilmektedir. Özellikle diyot lazerler dahili yoğunluk modülasyonu ile modüle edildiğinde yapılan işlemler diğer yöntemlere göre daha kolay ve az maliyetlidir. Dahili yoğunluk modülasyonu, lazere güç sağlayan akımın modüle edilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bir diyot lazerin pompalama mekanizması zaten elektriksel akım olduğu için, lazeri süren devrelere doğrudan bilgi içeren sinyalin uygulanması yani

doğrudan lazeri süren akımda yapılan değişikliklerle gerçekleştirilen modülasyon, uygulamada kolaylık sağlaması, modülasyonun çok yüksek bir hızda olması ve yüksek oranda bilgi aktarımına izin vermesi açısından oldukça avantajlıdır. Akımda gerçekleştirilen değişikliklerle dahili yoğunluk modülasyonu uygulanan lazerin, kapalı durumdan açık duruma geçişi (veya tam tersi) sırasında lazer ışığı ortaya çıkmadan önce oluşan zaman gecikmesinden kaynaklanan *chirping* ve katkılanmış yarı iletkenin katmanları arasındaki yük taşıyıcılarının yoğunluğu ile foton yoğunluğu arasındaki artış/azalış ilişkisinden kaynaklanan *self-pulsations* ışık dalga boyunda oynaklıklara yol açabilen, etkisi geçici, fakat lazerin modülasyon bant aralığına sınır koyan dezavantajları bulunuyor olsa da, her geçen gün gelişen teknoloji ile teorik tahminlerin de ötesinde, modülasyon hızındaki bant aralıkları sınırları aşılarak artmaktadır. Lazeri süren akımda yapılan değişiklik sebebiyle ortaya çıkan bu geçici tepkiler, hata oranını kabul edilebilir sınırların ötesine çıkaracak kadar büyük olabileceği gibi; yarı iletkeni oluşturan malzemenin özelliğine göre genellikle nanosaniyelerden (bazı durumlarda pikosaniyelerden) milisaniyeler mertebesine kadar değişebilen, katkılanmış yarı iletkenin katmanları arasındaki fazla yük taşıyıcılarının gevşeme süresi (*excess carrier lifetime/relaxation*) kadarlık bir süre ile orantılı bir zamanla ortadan kalkmaktadır. Fazla yük taşıyıcılarının gevşeme süresi, optik sinyalin görev döngüsünden daha düşükse modülasyon gerçekleştirilebilmektedir. İletişimi genellikle etkilemediği için yaygın olarak uygulanan dahili modülasyonda, çok uzun mesafelerde yüksek hızda bilgi iletişimi söz konusu olduğunda, modülasyonun harici olarak gerçekleştirilmesi gerekebilmektedir. Modüle edilmiş çıkış gücü, modüle edilen sinyal frekansının bir fonksiyonu olarak ölçüldüğünde anlamlı olmaktadır (Milonni ve Eberly, 2010; Orton, 2004; Pearsall, 2003; Pedrotti, S.J. vd, 2007; Peterman, 1988).

1.2.3. Moleküler Düzeyde Işık - Madde Etkileşmesi ve Moleküler Rezonans

Bu başlık altında, tez kapsamında ışık-madde etkileşiminin başka bir sonucu olan moleküler rezonanstan faydalanılarak işitilebilir düzeyde ses basıncı elde edilmesi amacıyla moleküler IR spektroskopisinden yararlanılarak, IR bant aralığındaki ışığı soğuran moleküler bağlarda oluşan moleküler rezonans ve moleküler titreşim hakkında bilgi verilecektir. Bu bölümde bahsedilen elektromanyetik spektrumun IR (*infra-red*,

kızılötesi, 200 μm - 800 nm, 50 - 12500 cm^{-1}) bölgesinde bulunan ışık, mikrodalga bölgesinin bir kısmını da kapsayan aralıkta olup; yakın kızılötesi (*near-infrared*, NIR, 2500 - 800 nm, 4000 - 12500 cm^{-1}), orta kızılötesi (*mid-infrared*, 25 - 2.5 μm , 400 - 4000 cm^{-1}) ve uzak kızılötesi (*far-infrared*, 200 - 25 μm , 50 - 400 cm^{-1}) olarak değerlendirilerek tez kapsamında ilgilenilen bant aralığı NIR bölgesidir (Michaelian, 2010; Sampath Kumar, 2013). Tezin genel gidişatını etkilemeyeceği için ilgilenilen dalga boyu aralığı NIR olmasına karşın, geniş kapsamlı bir bakış açısıyla yaklaşılarak tezde IR olarak bahsedilecektir.

Moleküler IR spektroskopisi, bir moleküle elektromanyetik spektrumda infrared (IR) bölgede ışınım yapan bir ışık gönderildiğinde molekülün atomları arasındaki bağların ışığı soğurmasıyla oluşur. Üzerine IR ışık gönderilen bir molekülün atomları arasındaki bağlar, ışık ile rezonansa girdiğinde ışığın frekansına bağlı olarak, kendine özgü biçimlerde simetrik veya antisimetrik şekilde esneyerek (*stretching*) veya düzlem içine veya dışına bükülerek (*bending*, düzlem içi –*scissoring*, *rocking*–, düzlem dışı –*wagging*, *twisting*–) titreşim hareketleri yapar. Bağ enerjisine eş IR ışığı soğurarak rezonansa giren moleküler bağlar, esnediğinde bağ uzunluğu değişirken; büküldüğünde ise bağ açısı değişerek moleküler olarak titreşmektedir. Işığı soğuran bağlar IR soğurma bandında, moleküler bağın ne tür bir bağ olduğu, dolayısıyla molekülün hangi türde molekül olduğu ile ilgili bilgiler verir. IR spektroskopisinde her moleküler bağ spesifik ve karakteristik IR soğurma bantları içerir. Böylelikle bilinmeyen bir numunenin içeriğinde ne olduğu IR spektroskopisi ile hızlı bir şekilde tespit edilebilir. IR soğurma bantları, moleküler bağların IR ışığı ile rezonansa girmesi ile temel rezonans bölgesini, üst rezonans bölgeleri (*overtones*) ve Fermi rezonans bölgesini oluşturabilir. *Overtones* temel rezonans bölgesindeki dalga sayısının tam katlarında (*octave*), temel rezonans bölgesine kıyasla çok az hassasiyette (düşük soğurma/titreşim) oluşurken; Fermi rezonansı genellikle ilk overtone ile ana rezonans bölgesi arasında bir yerde temel titreşim modu ile neredeyse aynı hassasiyette (güçlü soğurma/titreşim) oluşur (Harris ve Bertolucci, 1989; Sampath Kumar, 2013).

Molekül içerisindeki atomlar arası bağın titreşmesi bağ boyutunun (d) değişmesi dolayısıyla dipol momentinin değişmesine bağlıdır ($\mu=e.d$). Dipol moment ne kadar büyük olursa IR spektrumdaki soğurma bant yoğunluğu o kadar belirgin bir biçimde gözlemlenir.

Dolayısıyla atomların polariteleri ve atomlar arası elektronegativite farklılıkları ne kadar çok olursa, dipol moment artacak ve aynı şekilde IR spektrumdaki soğurma bantları o kadar çok keskinleşecektir. IR spektrumdaki soğurma bantlarının pozisyonu evrensel bir şekilde dalga sayısı ($\bar{\nu}$) kullanılarak belirlenmektedir. Denklem 1.9 ile uyumlu olarak dalga sayısı ($\bar{\nu}$):

$$\bar{\nu} = \frac{E_c}{hc} = \frac{1}{\lambda} \quad (1.10)$$

denklemini ile tanımlanmaktadır. Işık dalga sayısı, IR spektroskopisinde ışık dalga boyu yerine kullanılmakta olup birimi cm^{-1} cinsindedir;

$$\bar{\nu} (cm^{-1}) = \bar{\nu} (m^{-1}) \cdot 10^{-2} (m \cdot cm^{-1}) = 10^{-2} (m \cdot cm^{-1}) \cdot \frac{E(J)}{h(J \cdot s) \cdot c(m \cdot s^{-1})} \quad (1.11)$$

denklemini ile ifade edilmektedir. Denklem 1.10 ve Denklem 1.11 dikkate alındığında, ışığın nm cinsinden dalga boyuna (λ) karşılık gelen dalga sayısı, yani bir molekülün IR spektrumdaki ışığı soğurduğu bandın pozisyonu:

$$\bar{\nu} (cm^{-1}) = \frac{10^{-2} (m \cdot cm^{-1})}{10^{-9} (m \cdot nm^{-1}) \cdot \lambda (nm)} = \frac{10^7}{\lambda [nm]} [cm^{-1}] \quad (1.12)$$

denklemini ile hesaplanır. Diğer taraftan, moleküler bağları oluşturan atomların ağırlıkları ile IR ışık dalgasayısı arasındaki ilişki Hooke yasasından faydalanılarak k_f , bağ kuvveti; m , atom kütlesi olmak üzere:

$$\bar{\nu} = \frac{1}{2\pi c} \left[\frac{k_f (m_1 + m_2)}{m_1 m_2} \right]^{1/2} \quad (1.13)$$

ile verilir. Buna göre atomlar arası bağ ne kadar kuvvetli ve atomların kütlesi ne kadar hafifse ışık dalga sayısının o kadar yüksek olması gerekir (Barrow, 1962; Harris ve Bertolucci, 1989; Sampath Kumar, 2013; Sandorfy vd., 2007).

IR spektroskopisinde bazı kısıtlamalarla beraber soğurma miktarı ile soğurmayı gerçekleştiren numunenin konsantrasyonu arasındaki ilişki ise Beer Lambert yasası ile belirlenir. Beer Lambert yasası: α , numunenin ışığı soğurma miktarı; I_0 , gelen ışığın güç yoğunluğu; I , yansıyan ışığın güç yoğunluğu; L , üzerinden ışık geçirecek numunenin uzunluğu ; ϵ , numunenin molar soğurma miktarı; C , numunenin konsantrasyonu olmak üzere;

$$\alpha = \log \left(\frac{I_0}{I} \right) = \epsilon LC \quad (1.14)$$

ile hesaplanmakla beraber birimi bulunmamaktadır. Denklem 1.14'teki ışık yoğunlukları oranının tersi, ışığın numune üzerinden geçmesi (*transmittance*, $T = I/I_0$) ile ne kadarlık bir kısmının dışarı çıkacağı yani dolayısıyla ne kadarının molekül tarafından soğurulduğu bilgisini de içermektedir (Barrow, 1962; Harris ve Bertolucci, 1989; Tsuchikawa, 2007). Bu bölümde yer alan denklemler, deneysel olarak gerçekleştirilen IR spektroskopisini teorik olarak destekleyerek, gerekli özellikleri bilinen moleküllerin hangi bölgelerde soğurma yaptığını bulmada yardımcı olmaktadır.

1.3. Fotoakustik

Fotoakustik (PA) ilk kez 1880 yılında Alexander Graham Bell tarafından ortaya konan fotofonik veya radyofonik etki olarak da adlandırılan fotoakustik etki (PAE) sayesinde daha sonra gelişen fotoakustik spektroskopi, fotoakustik görüntüleme ve mikroskopik uygulamaların doğmasına yol açan Optoakustik (OA) veya Fototermal (PT) olarak da bilinen olgular olarak ortaya çıkmıştır. Bu olgular temel olarak ışık-madde etkileşiminin başka bir sonucu olarak meydana gelen, katı, sıvı, gaz gibi herhangi bir haldeki maddenin akustik veri ile modüle edilmiş ışığı soğurmasıyla gerçekleşen atomik veya moleküler rezonans ile maddenin termoelastik özelliklerinin uğradığı değişimler sayesinde (PT), modüle edilen akustik veriyi akustik basınç olarak yeniden oluşturması esasına dayanmaktadır. Fotoakustik olgular birbirini takip eden bir dolu teknolojinin oluşmasına yol açmıştır. Günümüzde fotonik ve *laser* teknolojisiyle beraber gelişmekte

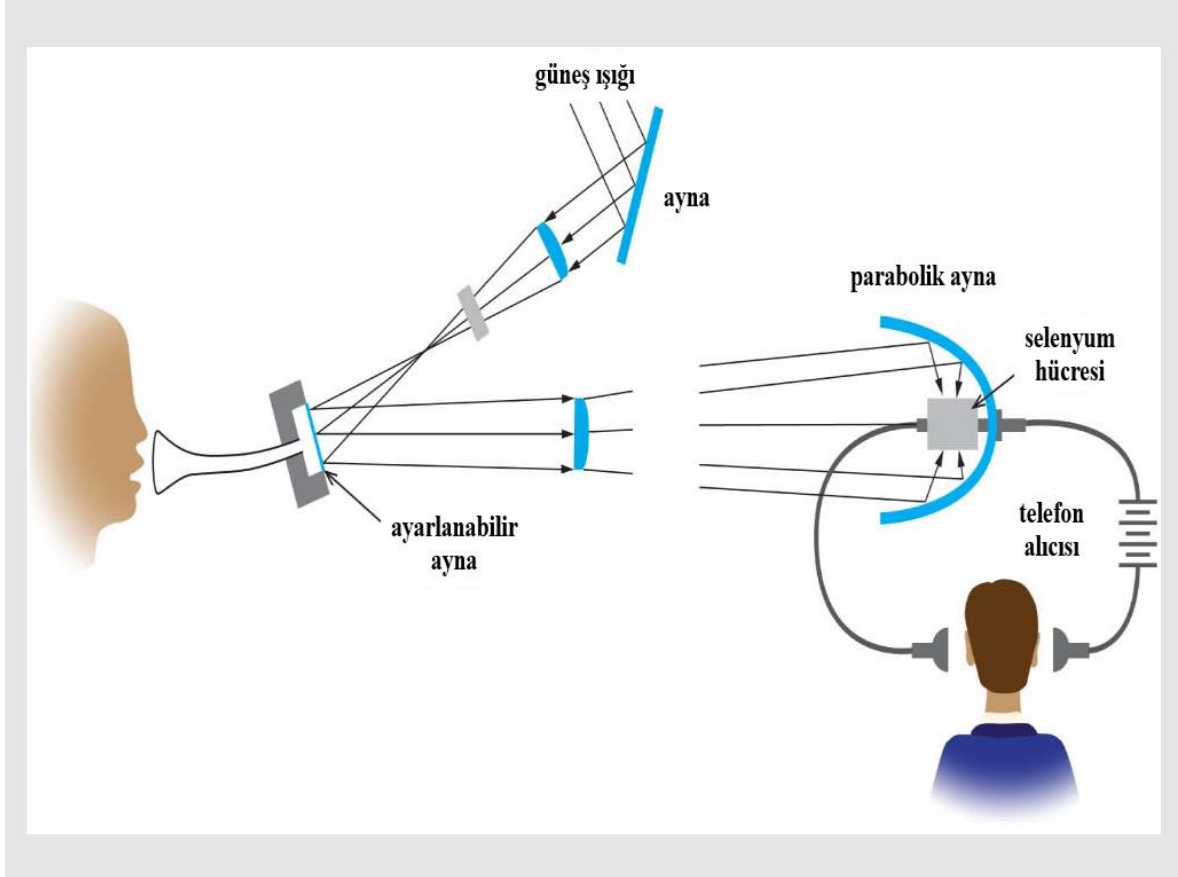
olan PA görüntüleme ve mikroskobik uygulamaların yakın gelecekte adını sıkça duyuracak nitelikte herkes tarafından bilinen, erişilebilen ve geniş uygulama alanına sahip bir teknolojiye dönüşeceği öngörülmektedir (Manohar ve Razansky, 2016; Tam, 1986). Bu çalışma PAE prensibine dayanan bir PA hoparlör geliştirilmesi hakkındadır. Bu bölümde PAE ile ilgili bilgilere yer verilecektir.

1.3.1. Fotoakustik Etki

Modüle edilen ışığı soğuran maddenin modülasyon frekansında akustik basınç ortaya çıkarması PAE olarak bilinmektedir. PAE ilk kez 1880 yılında Alexander Graham Bell ve Charles Sumner Tainter tarafından güneş ışınları ile işitilebilir sesin taşındığı yaygın olarak Fotofon (*Photophone*) adıyla bilinen bir cihaz sayesinde keşfedilmiştir. Bu keşif tarihte gerçekleştirilmiş ilk optik modülasyon, pratik olarak uygulanmış ilk optik ve kablosuz iletişim aracı olarak kabul edilmektedir. Sesin ışık ile taşındığı Fotofon cihazın çalışma prensibini anlamayı kolaylaştırmak için işleyişini ses girişi, ışık modülasyonu, ışık demodülasyonu, elektriksel çıktı ve ses çıkışı şeklinde bölümlere ayırarak ayrı ayrı değerlendirmek faydalı olacaktır (Bell, 1880a; Bell, 1880b; Bell, 1881; Girtan, 2018; Manohar ve Razansky, 2016).

Fotofon cihazının temsili Şekil 14’de gösterilmiştir. Buna göre ağızlıklı hortum şeklinde tasarlanmış verici ile ses girişi, insan sesi kullanılarak sisteme entegre edilmiştir. Işık kaynağı olarak güneş ışınlarından yararlanılarak, odaklanan güneş ışınlarının yoğunluğunda iletilmesi istenen ses dalgalarının havada ilerlemesiyle havadaki partiküllerin titreşim hareketindeki değişikliklere karşılık gelecek şekilde dalgalanmalar elde edilerek, öncelikle mekanik olarak ayarlanabilir bir ayna yardımıyla daha sonra ışığı mekanik olarak kesintiye uğratan ızgara şeklinde bir *chopper* ile modüle edilmiştir. Modüle edilen ışık, bir selenyum hücreye iletilmesi sağlanarak, hücrede ortaya çıkan PAE sayesinde demodüle edilmiştir. Demodüle edilen ses elektriksel çıktı olarak alınarak HBM’a benzer bir şekilde, magnetle çalışan o dönemin telefon alıcısına yönlendirilmiş, sisteme verilen ses o dönem için oldukça etkileyici olan 213 metrelik bir mesafeden ses

çıktısı kablo kullanılmadan alınmıştır. Orjinal halinden zayıf da olsa ses ışıkla yeniden üretilmiş, Bell'in deyimiyile güneş ışığındaki anlaşılır konuşmalar işitilmiştir (Bell, 1880b; Girtan, 2018; Manohar ve Razansky, 2016; MIMS III,1980).



(Manohar ve Razansky, 2016)

Şekil 14. Fotofon cihazının şematik gösterimi.

Referansın kulak, konuşma, şarkı gibi parametrelerle değerlendirilerek en nihayetinde insan odaklı ve değişken olması, ışığın havada yayılması sırasında karşılaştığı birçok engelin sinyal iletimine eklediği gürültü gibi bilginin uzun mesafelerde bu yöntemle taşınmasındaki zorluklar ve dönemin kısıtlı teknolojisi ile bu fikir, her ne kadar heyecan verici bulunsada Bell'in yaptığı çalışmalar dışında çok uzun bir süre boyunca kullanılmamıştır. Bell ve Tainter'ın odaklandıkları asıl amaç selenyum gibi farklı maddelerin 1870'li yıllarda yeni yeni keşfedilen ışıkla etkileşiminden kaynaklanan özelliklerinden yararlanarak aslında telefonun geliştirilmesi olmakla beraber "Fotofon"

modeli için ışık ile sesin iletimini sağlayan sayısı elliyi geçen farklı tasarım yaptıkları bilinmektedir. Bu çalışmalarının önemli başka bir sonucu olarak; farklı maddelerin hızla kesintiye uğratılan ışık ile aydınlatılması, kesinti hızıyla aynı frekansta (modülasyon frekansında) akustik enerji yayılmasına, yani tesadüfi bir biçimde PAE'nin keşfine sebep olmuşlardır (Bell, 1880a; Bell, 1880b; Bell, 1881; Girtan, 2018; Hutt vd.,1993; Manohar ve Razansky, 2016; MIMS III,1980).



İKİNCİ BÖLÜM

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada katkı sunulmak istenen temel problem, HBM prensibi ile çalışan ses iletim cihazlarının diğer elektronik cihazlarla elektromanyetik olarak etkileşime girmesidir. Bu bölümde daha önce yapılmış çalışmalar ortaya konularak yapılan geniş literatür taraması, bu çalışmada katkı sunulmak istenen temel problemin ne olduğu hakkında bilgileri içeren Elektromanyetik Etkileşim (EMI) ve bu problemin çözümü olarak öngörülen yöntemi içeren PAE olmak üzere iki bölümde toplanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında yayımlanan bildiri ve yayınlara tezin EKLER bölümünde yer verilmiştir (EK 1, EK 2, EK 3, EK4).

2.1. Elektromanyetik etkileşim (EMI)

Gücünü hareketli bobin motorundan (HBM) alan dinamik hoparlörlerin manyetik devre tasarımının başlangıç noktası olarak nitelendirilen Bl çarpımı (Bl product), Tesla.metre (T.m) cinsinden ifade edilen, motoru süren gücün bir ölçüsüdür ve Bl çarpımının artırılması, sürücünün hassasiyeti olarak belirtilen çıktıyı (*output*) artırır. Bütün kulaklıklar tasarımlarındaki hareketli bobin motorundan kaynaklanan Bl çarpımının varlığı sebebiyle bir başka elektronik cihazla yakın pozisyonda bulunduğu elektromanyetik etkileşime girmektedir. Şüphesiz hem hoparlörler için hem de kulaklıklar için ulaşılmak istenen öncelikli hedef veya temel kaygı, en iyi kalitede yeniden üretilmek istenen yüksek çözünürlüklü (kayıpsız, high definition, HD) sestir (Dickason, 2006; McCarthy, 2007; Watkinson, 2001). Bu sebeple günümüz teknolojiyle sesin yeniden üretilmesinde ses kalitesine verilen öncelik, geliştirilen yeni modellerin Bl çarpımını yükseltmekte, normal bir tasarımda tek başına anlamlı olmadığı düşünülen magnetlerin oluşturduğu manyetik alanın kimi kulaklıklarda tek başına 1,5 T değerlerinin de üzerine çıktığı görülmektedir (HARMAN - AKG, 2015). Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ, *World Health Organisation, WHO*) ve benzeri otoritelerin belirttiği elektromanyetik maruziyet sınırı ortalama 0,5 mT değerindedir. Ve bu yüksek manyetik alan varlığı durumu, gerek başka elektronik cihazlarla oluşan elektromanyetik etkileşim açısından gerekse elektromanyetik

maruziyetinin giderek artması ve Dünya Sağlık Örgütü gibi otoritelerin belirlediği limitlerin belirtilen sebeplerle uzun süreli kullanımla beraber gün geçtikçe aşılması, insan sağlığına zararı açısından da değerlendirildiğinde kayda değer birçok problem barındırmaktadır (ICNIRP, 1998; WHO, 2007a; WHO, 2007b).

HBM ile çalışan ses dönüştürücüleri gibi harici elektromanyetik (EM) cihazlar, kalp pili, implante edilmiş defibrilatörler, ensefalografi (EEG) elektrotları ve diğer implantlarla elektromanyetik etkileşime (EMI) neden olur (Beinart ve Nazarian, 2013; Boriani ve Steffel, 2018). Etkilenen medikal cihazlar ve bileşenlerinde mıknatıs, bobin vb. bulundurarak EM alan yayan ses ileten cihazlar arasında en az 10 cm'lik bir mesafenin korunması ve diğer başka yollar gibi EMI'den kaçınmak için mevcut geleneksel öneriler işlevsiz olmakla beraber özellikle EEG cihazları söz konusu olduğunda oluşan EMI'yi ortadan kaldırmak için yetersizdir (Beinart ve Nazarian, 2013; Boriani ve Steffel, 2018; Campbell vd., 2012; Hall III, 2015; SENNHEISER, 2019a). Özellikle ticari olarak satılan çok pahalı profesyonel dairesel (kulak üstü) kulaklıklar sadece maruziyet sınırlarını aşan oranlarda çok güçlü manyetik alan üretmekle kalmaz, aynı zamanda kurşun (Pb), cıva (Hg), kadmiyum (Cd), altı değerlikli krom (Cr^{6+}), polibromlu-bifenil (PBB) ve polibromlu-difenil-eter (PBDE) gibi ekolojik olmayan ve maruz kaldığında insan sağlığı açısından oldukça tehlikeli materyaller içerir (CDC, 2017; HARMAN - AKG, 2015; SENNHEISER, 2019b). Profesyonel kulaklık markalarının üreticilerinin ürünlerinin kullanım kılavuzlarında ve web sitelerinde yer alan bilgiler, bu ürünlerin kullanan kişileri sağlıkları için de zararlı olan söz konusu kimyasallara maruz bırakabileceğine işaret etmektedir (CDC, 2017; SENNHEISER, 2019b).

Kulaklıkla gerçekleştirilen işitsel nöro-fizyolojik çalışmalarda İşitsel Beyin Sapı Yanıtı (Auditory Brainstem Response – ABR) kaydı alabilmek için; mevcut odyometrik kulaklıkların EEG (elektroensefalogram) elektrotlarıyla etkileşime girip bazı sapmalar yarattığı yapılan çalışmalarla tespit edilmiştir. Tespit edilen bu sapmaların engellenmesi için elektrotlar ile kulaklık arasına ayırıcı platformlar yerleştirilerek gerekli ölçümlerin yapılması gibi, fiziksel olarak uygulama açısından zorluk yaratacak benzer yöntemler, kulaklıkların yarattığı elektromanyetik etkileşime önlem olarak geliştirilmiştir. Yine aynı çalışmada piyasada hâlihazırda var olan farklı farklı kulaklıklar ile EEG elektrotları arasındaki elektromanyetik etkileşimin farklılıkları da incelenmiştir (Campbell vd., 2012;

De Silva ve Schier 2009). İşitsel n6ro-fizyolojik çalışmalarda kullanılan kulaklıkların yarattığı elektromanyetik etkinin azaltılması ile ilgili alınan başka 6nlemlerden bazıları da: kulaklığın ve kablonun bir kısmının “elektromanyetik kalkan”a sahip kulaklıklar kullanılması, elektromanyetik kalkana sahip olmayan kulaklıkların akustik t6p ile kulağa iletilmesi, piezoelektrik veya elektrostatik kulaklıklar kullanılması olarak sıralanabilir. Akustik t6p ile işitsel sinyal iletilerek yapılan çalışmalarda sesin gecikmesine bağlı beyin cevabının anlamlandırılmasında senkronizasyon açısından zorluk getirir. Elektromanyetik kalkana sahip kulaklıklar, piezoelektrik kulaklıklar ve elektrostatik kulaklıklar ise oldukça maliyetlidir (Campbell vd., 2012; Hall III, 2015). Bir kulaklığın g6n6m6z teknolojisi ile hangi kriterlere bağlı olarak tasarlanması gerektiği ile ilgili yapılmış çalışmalar ve standartlar literat6rde mevcuttur (M6ller vd., 1994).

Ses ileten cihazlar ile diğer EM cihazları arasında oluşan EMI’i ortadan kaldırmaya y6nelik etkili ve uygulanması pratik olarak nitelendirilebilecek bir çalışmaya, yapılan literat6r araştırmasında rastlanmamıştır. Bu alışma kapsamında, ses ileten cihazların HBM prensibi ile çalışması gerekliliği tabusunu dışlayan tamamen farklı bir bakış açısı ile yaklaşıldığında, Fotoakustik (PA) etkiye dayalı EMI’siz ses d6n6řt6r6c6leri geliştirmenin, bahsedilen b6t6n sorunlara kapsamlı bir 6z6m sunabileceği d6ř6n6lmektedir (Musdal ve Kurt, 2021).

2.2. Fotoakustik

PAE ve PA spektroskopisi, ışık-madde etkileşiminin bir sonucu olarak, ilk kez 1880 yılında Alexander Graham Bell tarafından, g6neş ışığının bir ayna ile selenyum h6cresine odaklanıp klasik bir telefon alıcısına y6nlendirilmesi ile konuşma sesinin iletildiği bir cihaz geliştirilmesi sonucunda; heyecan verici bir teknik ve tarihin ilk kablosuz iletişim aracı olarak, ışığın yol açtığı “ses getirici” (“*sonorous*”) bir etki ortaya çıkmıştır (Bell, 1880a; Manohar ve Razansky, 2016). Bell’in “Fotofon” (“*Photophone*”) olarak adlandırdığı bu cihazın patenti alınarak: Sesin, ışık yoğunluğu mod6lasyonu sayesinde iletiminin m6mk6n olduğunu; katı, sıvı veya gaz haldeki maddelerin 6zerine d6şen ışığı soğurması sonucunda, madde tarafından sesin 6retildiğini ortaya koymuştur (Bell, 1880b; Bell, 1881). Katılardaki PAEnin, ışığın soğurulmasına bağlı olduğu ve akustik sinyalin g6c6n6n, ışığın h6cre

içindeki malzeme tarafından ne kadar güçlü bir şekilde soğurulduğunun bir ölçütü olduğu gösterilmiştir (Bell, 1880a). Teorisi tam olarak 90 yıl sonra Rosencwaig ve Gersho (1976) tarafından yayınlanmıştır. (Bell, 1880a; Bell, 1880b; Manohar ve Razansky, 2016).

Aynı yıllarda ardı ardına, çeşitli maddeler ve bu maddelerin farklı halleriyle (katı, sıvı, gaz) birçok önemli bilim insanı tarafından çalışmalar yapılmış ve yapılan bu çalışmalarla PAE ile işitilebilir sesin iletiminin farklı ışık türleri ile gerçekleştirilebileceği birçok farklı metot ortaya konularak teorik ve deneysel araştırmalar yapılmıştır. Rayleigh (1881) işitilebilir sesin oluşmasının, ışığın hedef aldığı diyaframların veya plakaların kesikli olarak aydınlatılması ile eşit olmayan şekilde ısınmasından kaynaklanan bir titreşim sebebi ile ortaya çıktığı sonucuna varmıştır. Preece (1880) ve Mercadier (1881) de bu etkiyi diyafram şeklinde bir hücre içerisinde çeşitli malzemeler üzerinde inceleyerek ve işitilebilir ses oluşmasının nedeninin ışığın ulaştığı maddenin titreşimi değil, kesikli olarak aydınlatılan ve dolayısıyla ısıtılan madde ile temas eden havanın genişmesi ve daralması olduğunu belirtmişlerdir. Madde ile ısıl temas halindeki periyodik ısıtma ve soğutmanın işitilebilir ses üretimine neden olduğu görüşü Tyndall (1880; 1881) ve Röntgen (1881) tarafından da paylaşılmıştır ve ayrıca yapılan bu çalışmalar ile birlikte PAEnin sadece katı cisimler ile sınırlı olmadığı; gazlar, sıvılar ve buharlardaki soğurma ile de ortaya çıkabileceği sonucuna varılmıştır. Röntgen parlayıcı gaz (kömür gazı) ve amonyak üzerinde çalışmıştır. Tyndall ise her sıvının farklı sıcaklıktaki durumunu 80 farklı sıvı ile incelemiş (1881) ve çok sayıda gaz ve buhar (1880) üzerinde çalışmıştır. PAE'nin madenlerde çok küçük miktarlarda yanıcı gaz miktarını tespit etmek için kullanılabileceği Tyndall tarafından öngörülmüştür (Manohar ve Razansky, 2016).

Sesin ışık ile iletilmesiyle 1880'li yıllardan günümüze kadar olan süreçte yapılan çalışmalarda çeşitli kısıtlamalarla karşılaşmış, "Fotofon" ilk bulunduğu zamanlarda bilim dünyasında heyecan yaratmış olsa da ölçüm referansının insan odaklı olmasının sağlıklı veriler elde etmeye yeterliliğindeki yoksunluk sebebiyle uzun bir süre boyunca PAE ve PA spektroskopi unutulmuş ve pratik olarak uygulamaları yapılamamıştır. 1938 yılında Tyndall ve Röntgen tarafından yapılan çalışmada PAE adı yerine "Optiko-akustik Tyndall-Röntgen Etkisi" adı kullanılarak ışık madde etkileşimi ile küçük konsantrasyonlardaki gazın hangi gaz olduğunun belirlenmesi ile ilgili yaptıkları çalışma sonucunda N₂ içerisindeki CO₂ konsantrasyonunu belirlemişlerdir. 1960'larda LASER'ın

gelişmesi ile PAE başka boyutlara taşınarak çok küçük miktarlardaki gaz tespiti ve analizi bu sayede yapılabilmektedir. *Laser* ile ilk kez, Kerr ve Atwood (1968) darbeli *Ruby-Laser* ve CW (*continuous-wave*) CO₂ *Laser* kullanarak kapasitans bir mikrofon ile akustik olarak algılanan soğurma spektroskopisi gözlemlemişlerdir. Hemen ardından Kreuzer (1971), bir mikrofon bulunan hücrede He-Ne *Laser* kullanarak ppb (*per parts of billion*) seviyelerinde gaz tayini yapmıştır ve ilk kez bu çalışmada “Optoakustik” terimi geçmektedir (Manohar ve Razansky, 2016).

PAE’den faydalanılarak işitilebilir ses üretilmesi ile ilgili çalışmalar yaklaşık yüz yıl sonra yeniden başlamış bu kez ölçüm referansı olarak mikrofonlar kullanılmaya başlanmıştır. Burada sunulan yöntemden oldukça farklı bir şekilde bir PA hoparlörün ve yönteminin nasıl olması gerektiğiyle ilgili *Rush* ve çalışma arkadaşları (1987) tarafından patent alınmak suretiyle; gaz soğurma hücrelerinin zar duvarları ile foto-termik basınç dalgaları oluşturarak ses üreten, bu gazlarla aynı frekansta ve ses dalgalarıyla modüle edilmiş, *Laser* ışını gönderilerek çalışmalar yapılmıştır. Üretilen foto-termik basınç dalgaları sayesinde açığa çıkan foto-akustik sesin, yüksek kalitede ve sese akustik olarak boyut katabilecek nitelikte olacağı yapılan bu çalışmada belirtilmiştir. *Roozen* ve çalışma arkadaşları (2016) güneş ışığı ile sesi ileten PAE ile ses iletimi konusunu “Heliofon” adını verdikleri belirli frekanslarda ses üreten bir korna tasarımı yaparak yeniden gündeme getirmişlerdir.

Sullenberger ve çalışma arkadaşları (2019) tarafından PAE ile sesin taşınması açısından son dönemde yapılmış oldukça önemli bir başka çalışma ise şu şekildedir: Sesin iletildiği hedefte herhangi bir alıcı enstrüman olmaksızın havadaki su moleküllerinin soğurabileceği lazer ışığı (CW 1.9µm *thulium laser*) ile soğurulduğu ve bu sayede sesin belirli bir noktaya (kişiye özel ses, fısıltı, müzik) iletildiği yöntem çığır açıcı niteliktedir. Bu çalışmada insan derisine ve göze zararlı olmayan yakın kızılötesi bir lazer ışığı kullanılmıştır. Çalışmada geliştirilen iki yöntemden ilkinde; ses, bir Akusto Optik Modülatör (AOM) yardımı ile lazere genlik modülasyonu yapılması sonucu havadaki su moleküllerinin lazeri soğurması ile istenilen dinleyici hedefe iletilir. İkincisinde ise dinleyici hedefin bulunduğu bölge ses hızında lazerin yönlendirildiği dönen bir ayna ile taranır. Rezonans hücresine ihtiyaç olmadan uyumlu akustik dalgaların üst üste gelmesi sonucu (*LASER* işleyişine benzer) AOM kullanılmadan amplifikasyon gerçekleştirilmiş bir

şekilde yani ses sinyali çoğaltılarak dinleyici hedefe ulaştırılmış olur. Bu çalışmada hesaplanan ses basıncı 1986 yılında Tam tarafından yapılan çalışmaların bulguları baz alınarak hesaplanmıştır (Sullenberger vd., 2019).

Westervelt ve Larson (1973) tarafından, lazer ışınının eksenine dik yayılan çok yönlü bir akustik dalga üreten bir termoakustik dizi oluşturmak için, yoğunluk modülasyonlu bir lazerin geçişinden kaynaklanan bir soğurucu ortamın genişmeleri ve büzülmelerinin kullanılması ile ilgili hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalar daha sonra Diebold ve Weservelt (1988) tarafından kullanılarak sıvı içerisindeki küresel damlacık şeklindeki başka bir sıvının ürettiği PAE incelenmek üzere kullanılmıştır. Başka bir çalışmada ise silindirik bir hücre içerisindeki sıvının ürettiği PAE teorik ve deneysel olarak incelenmiştir (Atalar, 1980).

Bugüne kadar yapılmış çalışmalar incelendiğinde, bu doktora tez çalışması kapsamında burada sunulan yöntem ve ortaya konulan problemin çözümü olabilecek potansiyelde bir çalışma veya yaklaşımla literatürde karşılaşılmamıştır. Bu doktora tez çalışması da dahil olmak üzere işitilebilir aralıkta bulunan sesin üretilmesi ile ilgili yapılmış çalışmalar oldukça yeni bir alan oluşturma potansiyeline sahip ve bundan sonra yapılacak çalışmalara ışık tutacak niteliktedir.

Bu doktora tez çalışması kapsamında, sesin iletimi ve üretimi aşamasında temel olarak hiçbir elektronik aksam içermeyen dolayısıyla hiçbir elektromanyetik alan üretmeyen, ışık madde etkileşimini temel alarak PAE ile sesi ileten, yeni ve farklı bir yöntem kullanılarak ortaya çıkarılacak bir hoparlör/kulaklık tasarımının gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Bu çalışmada önerilen yöntemin uygulama potansiyeli, kulaklık kullanımına bağlı EM maruziyetin azaltılması hedeflenerek elektronik aksam varlığı sebebiyle oluşan EM alan ile etkilenebilecek farklı platformlarda (çeşitli işitsel nörofizyolojik araştırmalar, EEG, MEG fMRI, ABR vb.) kullanılacak yeni bir optik enstrüman ortaya çıkarmak olacaktır. Böylece bu doktora tez çalışmasında önerilen analitik yaklaşım gerçekleştirildiğinde oldukça işlevsel bir platform ortaya konulacaktır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde bir IR rezonans tabanlı PA hoparlör geliştirilmesi kapsamında ortaya konulan teori ve kavramsal tasarımın gerçekleşmesi için gerekli materyaller ve yöntem şimdiye kadar bahsedilen bütün konularla bağlantı kurularak anlatılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında ortaya konan temel teori literatürdeki ilgili çalışmalar dikkate alındığında Westervelt ve Diebold'un (1988) PA ile ilgili teorik modeli baz alınarak oluşturulmuştur. Öncelikle Westervelt ve Diebold (1988) tarafından yapılan teorik çalışmalar ve bu doktora tezi kapsamında ortaya konmuş olan teorik model sunulmuştur. Bu bölümde ortaya konacak olan teorik formülizasyonlar ve niceliksel veriler kullanılarak çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş hesaplamalara Araştırma Bulguları bölümünde yer verilecektir.

3.1. Teori

Bölüm 1.1.1'de anlatılan dB cinsinden ses basınç seviyesi (dB SPL), fotoakustik olarak üretilmek istenen ses basıncı açısından değerlendirildiğinde molekülün türüne, maruz kalan ortamın geometrik şekline ve lazer ışınının yoğunluğuna ve dalga boyuna bağlıdır (Sullenberger vd., 2019). Bölüm 1.3'te bahsedildiği üzere, PT olgusu genellikle PA üretimine dayanır, ancak Bölüm 1.2'de anlatıldığı gibi elektromanyetik spektrumun IR bölgesinde moleküler titreşim enerjisinin absorpsiyonu gibi bazı başka olgular da kullanılabilir. Bu durumda lazer ışınının enerjisi, içerisinde madde bulunan bir ortama yönlendirildiğinde moleküler bağlar tarafından soğrulur. Moleküler bağların uzunluğu, soğurduğu lazer dalga boyu ile ilişkili Bölüm 1.2.3'te bahsedilen dalga sayısı ile bir eşleşme sağlıyorsa, moleküller rezonans frekansta titreşir. Bu titreşim, moleküllerin hacminde bir genişlemeye neden olur. İzobarik koşullar altında, moleküller tarafından işgal edilen küresel bir bölgenin yüzeyinde artan basınçlar meydana gelebilir. Moleküllerdeki yük taşıyıcılarının gevşeme süresi, optik sinyalin görev döngüsünden daha düşükse, ses spektrumunun işitilebilir bölgesinde istenilen frekansta bir ses dalgası üretilebilir. Bölüm 1.1'de bahsedildiği gibi sesin iletimi sonucunda işitmenin sağlanması: Atmosferik basınçta

gerçekleşen basınç farklılıkları sayesinde elde edilen, işitilebilir ses aralıklarında ve gerekli seviyelerde ses basıncı ile mümkün olmaktadır. Bu sebeple öncelikle üretilmesi gereken ve hedeflenen basınç değerleri mPa cinsinden belirlenmiştir.

3.1.1. Üretilmesi Gereken Ses Basınç Seviyeleri

Akustik, Psikoakustik ve Ses Teknolojileri açısından Bölüm 1.1’de anlatılanlar değerlendirildiğinde, işitilebilir ses seviyesi aralıkları 0 ile 120 dB SPL arasındadır. Bu değerlerin üretilmesi için bir küre yüzeyindeki basınç değişikliklerinin 20 Pa seviyesine ulaşması gerekmektedir. Daha önce değinildiği gibi psikoakustikte işitsel duyum, frekans tepkisi açısından lineer olmadığı gibi, sesin büyüklüğünü tanımlayan psikolojik bir terim olan ses yüksekliğinin (*Loudness*) algılanmasına bağlıdır. Fletcher-Munson eğrileri (veya *equal loudness curves*) olarak da bilinen, aynı algılanan ses yüksekliği eğrileri (eş duyum eğrileri), farklı ses seviyelerindeki farklı frekansların aynı ses yüksekliğinde algılanmasının doğal gerekliliğini tanımlar. Şekil 6’da da gösterilen bu eğrideki phon’un referans seviyesi, 1000 Hz ses frekansında 0 dB SPL için 0 phon olarak kabul edilmektedir (Fletcher ve Munson, 1933). Herhangi bir phon değerindeki ses frekansının dB SPL ve karşılık gelen basınç değerleri eş duyum eğrilerinden yola çıkılarak elde edilebilmektedir.

Aynı ses yüksekliğinde algılanan, farklı frekanslardaki *pure tone*’lara karşılık gelen dB SPL değerleri, Şekil 6.’da gösterilen aynı algılanan ses yüksekliği eğrileri referans alınarak 0-100 phon değerleri arasında belirlenmiştir. Belirlenen SPL değerleri kullanılarak, üretilmesi gereken ses basıncı mPa cinsinden Denklem 1.7 yardımıyla çıkarılan

$$P = P_0 \left(10^{\frac{SPL}{20}} \right) \quad (3.1)$$

ifadesi ile hesaplanmıştır. Denklem 3.1 ile hesaplanan basınç değerlerinin doğrulaması, deneysel olarak ölçülmüş olan eş duyum eğrileri ile karşılaştırılarak yapılmıştır. Eğrilere karşılık gelen temel ve ara frekans değerleri *Origin Pro* yazılımı ile itere edilerek belirlenmiş ve tutarlılığı doğrulanmıştır (rezidü katsayısı=0.9<R²<1). İşitilebilir düzeyde

sesin iletilmesi için üretilmesi gereken ses basıncı değerleri mPa cinsinden yapılan hesaplamalar ve karşılaştırmalar sonucunda Tablo 4'te başlıca frekans değerleri için gösterilmektedir (Fletcher ve Munson, 1933; Musdal ve Kurt, 2021).

Tablo 4

Ses Yüksekliğine (phon) karşılık gelen Ses Basınç Seviyesi (dB SPL) ve Basınç (mPa) ilişkisi.

Ses Yüksekliği (phon)	Frekans (Hz):	100	500	1000	5000	10000
		0	dB (SPL)	38	6	0
	Basınç (mPa)	1.59	0.04	0.02	0.01	0.05
20	dB (SPL)	52	25	20	18	30
	Basınç (mPa)	7.96	0.36	0.2	0.16	0.63
40	dB (SPL)	62	42	40	40	52
	Basınç (mPa)	25.18	2.52	2	2	7.96
60	dB (SPL)	72	61	60	60	73
	Basınç (mPa)	79.62	22.44	20	20	89.34
80	dB (SPL)	83	80	80	78	91
	Basınç (mPa)	282.51	200	200	158,87	709.63
100	dB (SPL)	100	101	100	95	107
	Basınç (mPa)	2000	2244.04	2000	1124,68	4477,44

(Fletcher ve Munson, 1933; Musdal ve Kurt, 2021)

3.1.2. Fotoakustik Ses Basıncı Hesabı

Daha önce yapılan çalışmalarda modüle edilmiş bir lazer ışınına maruz bırakılan damlacık şeklindeki soğurucu bir ortamın veya molekülün genişlemesi hesaplandığında; lazer ışınının yarıçapı damlacık yarıçapından daha küçük olduğunda, termal iletimin ihmal edilebilir olduğu gösterilmiştir (Diebold ve Westervelt, 1988; Westervelt ve Larson, 1973). Bu koşullar altında, ortam içerisindeki ses hızı v_o , logaritmik termal genişleme katsayısı β , birim kütle başına özısı C_p ve birim zamanda birim hacim içinde soğurulan enerji (lazer ışınının enerji kaybı) H olmak üzere; PA basınç $P = P(\vec{r}, t)$ için dalga denklemi şu şekilde tanımlanmaktadır (Diebold ve Westervelt, 1988; Westervelt ve Larson, 1973):

$$\square^2 P = \nabla^2 P - \frac{1}{v_0^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = -\frac{\beta}{C_p} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.2)$$

Modüle edilen lazer ışınının molekül içerisinde soğuruldukça birim mesafe ve zamana göre değişen kaybettiği enerji, ortam içinde bulunan molekülün optik soğurma katsayısı (lazer ışınının zayıflama katsayısı) α , lazer güç yoğunluğu I_0 ve modülasyon frekansı ω olmak üzere;

$$H = \alpha I_0 e^{-\alpha z - i\omega t} \quad (3.3)$$

ile ifade edilmektedir (Westervelt ve Larson, 1973). Denklem 3.2 ve Denklem 3.3 kullanılarak bir küre için PA basınç, gözlem noktasının vektörel pozisyonu \vec{r} ve küre üzerindeki bir noktadan gözlem noktasına olan vektörel mesafe \vec{r}' olmak üzere Westervelt ve Larson (1973) tarafından;

$$p = -\frac{i\alpha\omega\beta I_0}{4\pi C_p} e^{-i\omega t} \int e^{-\alpha z'} \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} d^3 r' \quad (3.4)$$

olarak ifade edilmiştir. Aynı çalışmada $r \gg \omega/v_0\alpha^2$ olarak kabul edildiğinde, lazer etki alanı S_0 ve küresel koordinat için kutupsal açı θ olmak üzere; integraldeki değişimle birlikte PA basınç,

$$p = -\frac{i\alpha\omega\beta S_0 I_0}{4\pi r C_p} e^{ikr - i\omega t} \int_0^\infty e^{-\alpha z' - ikz' \cos \theta} dz' \quad (3.5)$$

ifadesine dönüştürülmüştür. Daha sonra yapılan hesaplamalar; α arttıkça enerjinin lazer ışınından daha hızlı soğurulacağını dolayısıyla termal genişlemenin artarak daha büyük bir güçte akustik dalga üretilebileceğini ve α azaldıkça akustik dalga üreten termo-akustik dizinin uzunluğunun artarak yönlendirilebilirliğinin geliştirilebileceğini göstermiştir (Westervelt ve Larson, 1973).

Bu çıkarımlardan yola çıkılarak, lazer dalga boyunda yüksek soğurma katsayısına sahip bir molekülün termal genişmesi daha yüksek olduğu için küresel alan oluşturacak şekilde, lazer dalga boyunda yüksek soğurma katsayısına sahip bir molekül belirlenmiştir.

Daha sonra Diebold ve Westervelt (1988), birlikte yaptıkları çalışmada küresel damlacık şeklindeki sıvının ürettiği PAE ile ilgili Westervelt ve Larson'un yukarıda bahsedilen çalışmasından elde ettikleri hesaplamaları kullanarak, küre yarıçapından daha küçük bir ışın yarıçapı durumu için bir basınç ifadesi elde etmişlerdir. Buna göre, dış ortamın yoğunluğu ve ses hızı iç ortama eşit ve ortamın optik olarak ışığı geçirebildiği varsayıldığında, kürenin yarıçapı a , kürenin merkezine uzanan mesafe r , merkezden küreye olan boyutsuz mesafe $\hat{r} = r/a$, boyutsuz frekans (dalga vektörü) $q = \omega a / v_0$ ve kürenin merkezinden yayılmaya göre boyutsuz gecikmeli zaman $\hat{t} - 1 = (v_0/a)(t - r/v_0)$ olmak üzere PAE sonucu oluşan basınç ifadesi:

$$P(q) = -\frac{i\alpha\beta I_0 v_0 a}{C_p \hat{r}} \left(\frac{\sin q - q \cos q}{q^2} \right) e^{-iq(\hat{t}-1)} \quad (3.6)$$

olmuştur (Diebold ve Westervelt, 1988).

Bu doktora çalışması kapsamında dikkate alınan Denklem 3.6, çalışma kapsamında yapılan varsayımlarla çalışmaya özgü olarak, işitilebilir frekansta PAE ile ses basıncı üretecek şekilde yeniden düzenlenmiştir. Denklem 3.6'da bulunan q değeri aslında modülasyon frekansı olmakla beraber modüle edilecek frekans aralığı işitilebilir ses frekans aralığında seçildiği için PAE açısından çalışılan ultrasonik frekans aralıklarına göre düşük frekanslar kullanıldığından $q \ll 1$ olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım sayesinde Denklem 3.6'da bulunan sinüs ve kosinüs terimleri 2. dereceden Taylor Serisine açılarak:

$$\sin q = q - \frac{q^3}{6} + \dots \quad (3.7)$$

$$\cos q = 1 - \frac{q^2}{2} + \dots$$

olduğu gösterilmiş, Denklem 3.7’de elde edilen ifadeler Denklem3.6’daki ilgili terimde yerine konularak yapılan işlemler sonucunda:

$$\begin{aligned}
\frac{\sin q - q \cos q}{q^2} &= \frac{q - \frac{q^3}{6} - q \left(1 - \frac{q^2}{2}\right)}{q^2} \\
&= \frac{q - \frac{1}{6}q^3 - q + \frac{1}{2}q^3}{q^2} \\
&= \frac{1}{3}q
\end{aligned} \tag{3.8}$$

elde edilmiştir. PAE ile akustik basınç elde edilecek molekül, tasarımsal olarak bir küre alanını tam dolduracak şekilde seçildiği için $r \approx a$ ve $v_0 = r / t$ dönüşümleri yapılarak Denklem 3.6’daki eksponansiyel kısmın kuvveti gerekli varsayımlarla yeniden düzenlenerek yapılan işlemler sonucunda:

$$\begin{aligned}
-iq(\hat{t} - 1) &= -iq \left(\left(\frac{v_0}{a} \right) \left(t - \frac{r}{v_0} \right) \right) \\
&= -iq \left(\left(\frac{r}{t} \right) \left(t - \frac{r}{t} \right) \right) \\
&= 0
\end{aligned} \tag{3.9}$$

olarak bulunduğu için, $\omega = 2\pi f$ ve $q = \omega a / v_0$ ifadeleri ve Denklem 3.9’da bulunan sonuç Denklem 3.6’da yerine konularak:

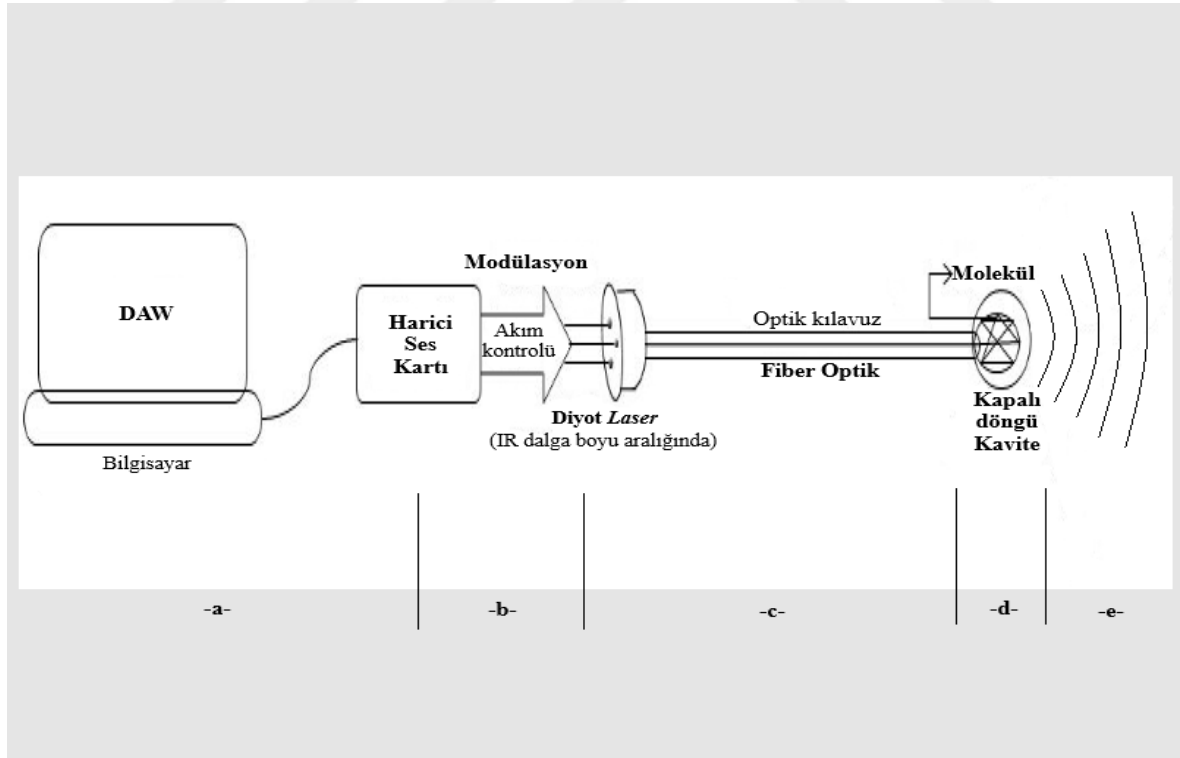
$$P = -i \frac{2\pi}{3C_p} \alpha \beta I_0 a^2 f \tag{3.10}$$

ses frekansına göre değişen PAE ses basıncı bu çalışmaya özgü olarak elde edilmiştir (Musdal ve Kurt, 2021). Buna göre: İşitilebilir ses aralığındaki frekans ile modüle edilen bir *laser*, küre şeklindeki moleküle etkideğinde, *laser* enerjisini soğuran molekül,

moleküler olarak rezonansa girmektedir. Rezonansa giren molekülde meydana gelen termoelastik değişimler molekül çevresinde basınç değişimlerine yol açmaktadır. Denklem 3.10, oluşan basıncın *laser* demetine modüle edilmiş frekansa bağlı olarak değişimini ifade etmektedir. Burada ortaya konan Denklem 3.10 ve Kavramsal Deneysel Düzenek bölümünde belirtilmiş olan niceliksel veriler kullanılarak, çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş hesaplamalara Araştırma Bulguları bölümünde yer verilecektir.

3.2. Kavramsal Deneysel Düzenek

PAE ile işitilebilir ses üretilmesi için bir deneysel düzenek kavramsal olarak tasarlanmıştır. Şekil 15'te gösterilen IR Rezonans tabanlı PA hoparlör için tasarlanmış kavramsal düzeneğin daha iyi anlaşılması için ses işleme mekanizması, fotoakustik ses iletim mekanizması ve ses kalibrasyon mekanizması olmak üzere üç ana bölüme ayrılarak anlatılmıştır. Ek olarak EMI oluşturmayacak şekilde tasarlanmış IR Rezonans tabanlı PA kulaklık için kullanılması öngörülen ekipmanlar niceliksel olarak sunulmuştur.



Şekil 15. (a) Ses verisi, (b) Modülasyon, (c) Dalgı kılavuzu, (d) Demodülasyon ve (e) Ses çıkışı olmak üzere IR Rezonans tabanlı PA hoparlör için tasarlanmış kavramsal deneysel düzenek.

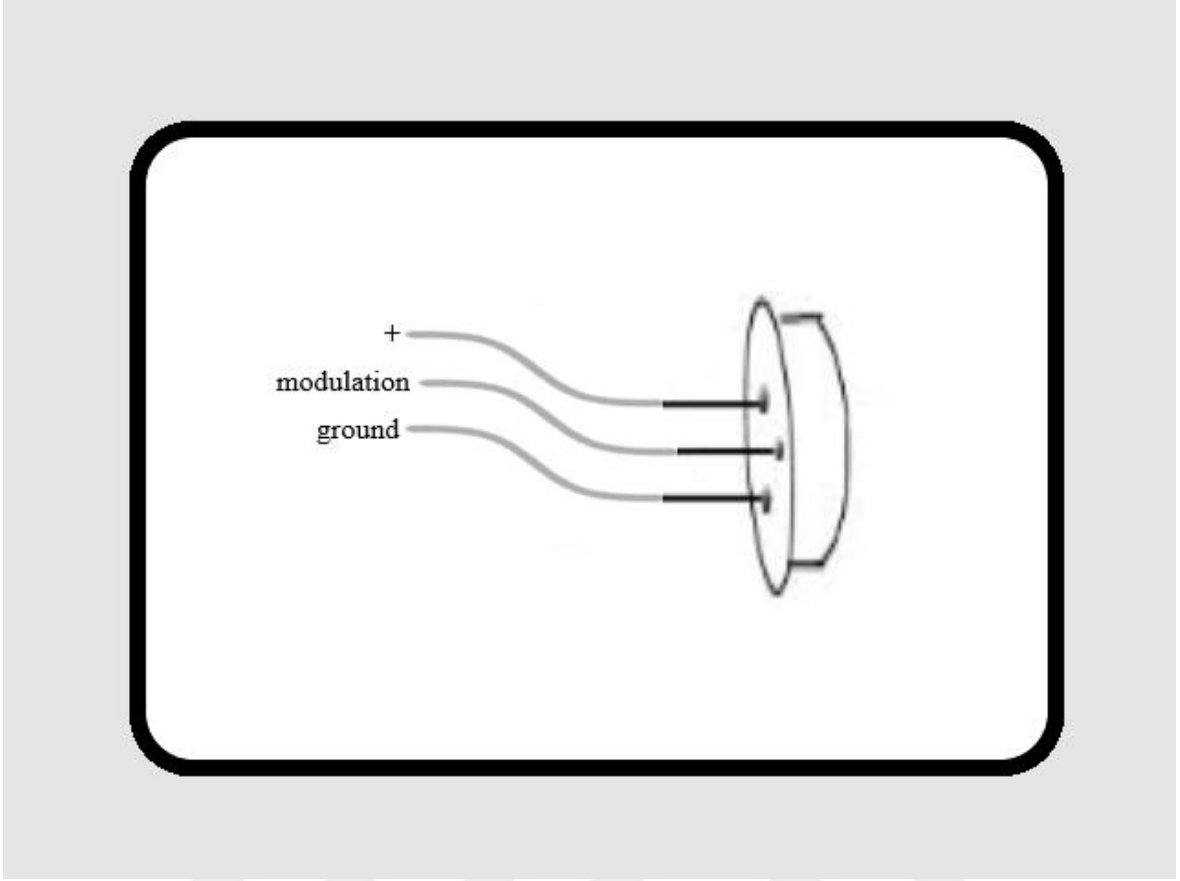
3.2.1. Ses İşleme Mekanizması

Ses işleme mekanizması Şekil 15.a'da gösterildiği gibi bilgisayar, dijital ses işleme programı, ses kartı bağlantı kablosu ve harici ses kartını içermektedir. Ses işleme mekanizması bilgisayar içerisindeki dijital ses işleme yazılımları ile ses çıkışının kontrollü bir şekilde harici ses kartına kablo aracılığıyla iletilmesini sağlamaktadır.

Ses datalarının niceliksel özelliklerinin kontrollü bir şekilde dijital veriler olarak oluşturulabileceği, mevcut verilerin değiştirilebileceği veya kontrolünün sağlanabileceği bir bilgisayar yazılımı olan Ses İşleme İstasyonu olarak dilimize geçmiş bir *Digital Audio Workstation* (DAW) programı yardımı ile ses verileri, test sinyalleri olarak tasarlanmıştır. Sisteme entegre edilmesi öngörülen test sinyalleri: Belirli frekanslarda nicelikleri eş duyum eğrileri ile uyumlu olarak hazırlanacak *pure tone* ve işitilebilir frekans aralığının tamamını doğal duyumla uyumlu olarak içeren *pink noise* bilgisi içermektedir. Veriler bir DAW olan *ProToolsFree* programında bulunan istenilen niceliklerde sinyal oluşturmaya yarayan *signal generator* eklentisi yardımı ile oluşturulan dijital ses örneklerinin harici ses kartına iletilmesi sağlanarak ses iletiminin ilk aşaması gerçekleştirilmiş olur (Şekil 15.a). Ayrıca burada söz konusu ses verileri yerine herhangi bir ses dosyasının da ses verisi olarak kullanılabilmesi ve burada söz konusu ses işleme mekanizması yerine de işitilebilir aralıkta ses üretme kapasitesine ve bir ses çıkışına sahip telefon, tablet gibi başka platformların da kullanılabilmesi öngörülmektedir.

3.2.2. Fotoakustik Ses İletim Mekanizması

Fotoakustik ses iletim mekanizması modülasyon ve demodülasyon işlemlerinin gerçekleştirilmesi ile akustik ortamda ses çıkışı sağlayacak bir platform olarak tasarlanmıştır ve Şekil 15.b-c-d-e'de gösterildiği gibi, harici ses kartının elektronik çıkışından lazerin yoğunluk modülasyonunun sağlandığı akım kontrolü, ses verileri ile modüle edilmiş diyot lazer, dalga kılavuzu olarak kullanılan fiber optik kablo, kapalı döngü kavite hücresi ve gelen lazer dalga boyunu tam olarak soğuran molekülden oluşmaktadır. Şekil 15.b'de gösterilen diyot lazerin doğrudan modülasyonu, Şekil 16'da yakın planda tekrar gösterilmiştir.



Şekil 16. *Bias* sürme modlu diyot *laser*.

Fotoakustik tabanlı hoparlör tasarımının önerilen konfigürasyonunda modülasyonun gerçekleştirilebilmesi için öncelikle ses işleme mekanizmasında oluşturulan dijital ses örnekleri, harici ses kartı çıkışı tarafından diyot lazer girişine iletilir. Harici ses kartının elektronik çıkışı, diyot lazere güç sağlayacak şekilde lazerin girişini sürecektir. Akımın dijital ses verileriyle doğrudan modüle edilebilmesi için kullanılır. Lazerin bias gerilimi değiştirilerek lazer ışınlarının yoğunluğu doğrudan modüle edilebilmektedir (Şekil 16). Fotoakustik ses iletim mekanizması sonucunda oluşması beklenen ve Denklem 3.10 ile uyumlu olacağı öngörülen ses basıncının şiddeti lazerin gücü ile değiştirilebilir.

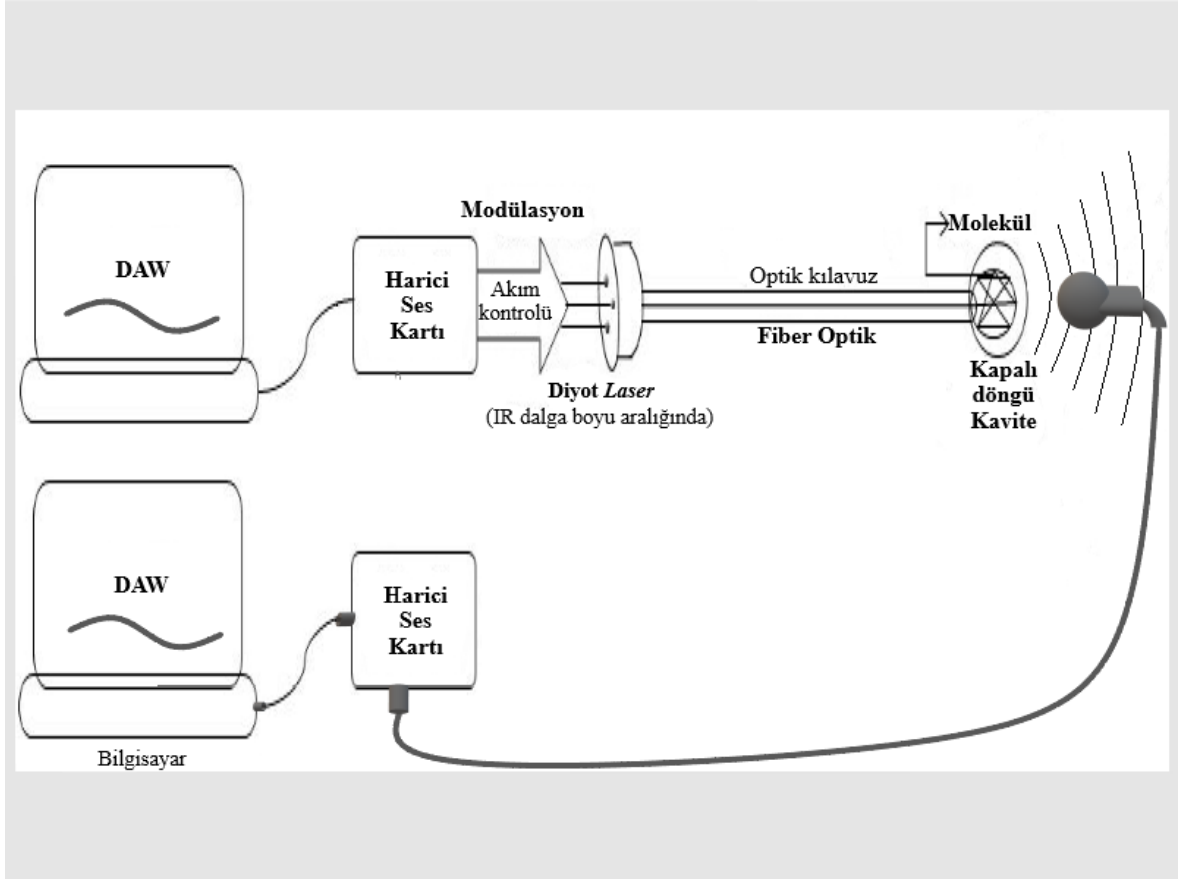
Ses işleme mekanizmasının kontrollü olarak gönderdiği ses verileri, harici ses kartı çıkışındaki gücün diyot lazeri sürmesi ile ışın demetine modüle edilmek üzere akım kontrolü yapılarak modüle edilen diyot lazer ışın demetleri, fiber optik kablo aracılığıyla kapalı döngü küresel kavite hücresi içerisindeki gelen lazer dalga boyunu tam olarak

soğuracak şekilde seçilen moleküle yönlendirilir. Bu sayede lazer dalga boyunu tam olarak soğuran molekül, gönderilen ses verileriyle modüle edilmiş ışığı tamamen emdiği için moleküler rezonansa girerek modüle edilen ses verilerine uygun şekilde genişip büzülerek titreşir ve kavite içerisinde meydana gelen basınç değişimi sayesinde mekanik olarak ses yeniden üretilmiş olur. Burada anlatılmakta olan modüle edilen ışık ile madde etkileşimi sonucu elde edilen ses basıncı, fotoakustik etki olarak bilinmektedir. Dalga kılavuzu olarak kullanılacak fiber optik kablo, EM izolasyon sağlaması, lazer kullanımının güvenliğini ışın çıkar çıkmaz sızıntı açısından engellemesi ve modülasyonda kayıp gerçekleşmemesi amaçlanarak seçilmiştir. Fiber optik kablo, işitilebilir frekans aralığında ses ile modüle edilmiş lazer ışınlarını moleküle yönlendirir. Bu sayede demodülasyon molekül tarafından sağlanır. Kapalı döngü küresel kavite hücresi içerisindeki moleküler yapı, tasarım açısından oldukça kritiktir. Demodülasyonu gerçekleştiren molekülün soğurduğu spektroskopik dalga boyu aralığı ve ses bilgisi ile modüle edilmiş lazer dalga boyu aralığı tam olarak eşleştiğinde ortaya çıkacak ses basınç seviyesinin maksimize edilmesi için gereken parametreler arasındadır. Demodülasyonun gerçekleşmesi için seçilen molekülün yüksek genişleme katsayısı ve düşük bir ısı kapasitesi (öz ısı) gibi bazı termodinamik özelliklere sahip olması gerekmektedir. Kapalı döngü küresel kavite hücresi ise kavite dışına fotoakustik olarak iletilen ses dalgaları dışında herhangi bir ışık çıkışı olmaması amacıyla, lazer kullanımının güvenliğini sağlamak için tercih edilmiştir. Kavitenin iç çeperi malzemenin soğurduğu ışık dalga boyunda yansıtıcı, dış çeperi ise optik geçirgenliği olmayan bir malzeme ile oluşturulacak şekilde düşünülmüştür.

3.2.3. Ses Kalibrasyon Mekanizması

Öncelikle ses izolasyonu iyi şekilde yapılmış bir kontrol odasında dış etkiler elimine edilerek, üretilmesi beklenen sesin varlığı işitsel olarak kontrol edilir. Fotoakustik ses iletim mekanizması ile tekrar üretilerek akustik ortama gönderilen sesin varlığı sözkonusu ise ölçümler yapılarak kalibrasyona geçilir. Kalibrasyon temel olarak, frekans cevap aralığı *flat* olarak tabir edilen yüksek kaliteli *condenser* bir kalibrasyon mikrofonu ile mesafenin kontrollü bir şekilde ayarlanarak kaydedilmesi ve kaydedilen sinyalin gönderilen orjinal sinyalle karşılaştırılması esasına dayanmaktadır. Bunun dışında HBM prensibi ile çalışan hoparlörler için belirlenmiş standartlar çerçevesinde uygulanılan

kalibrasyon yöntemlerinin dikkate alınması gerekliliği ayrıca değerlendirilmelidir. Ses işleme mekanizmasında, işitilebilir frekans aralığının *sweep* edilmesiyle oluşturulacak ses dosyası ile PA hoparlörün frekans cevabına kalibrasyon mekanizması adımıyla ayrıca bakılmalıdır.



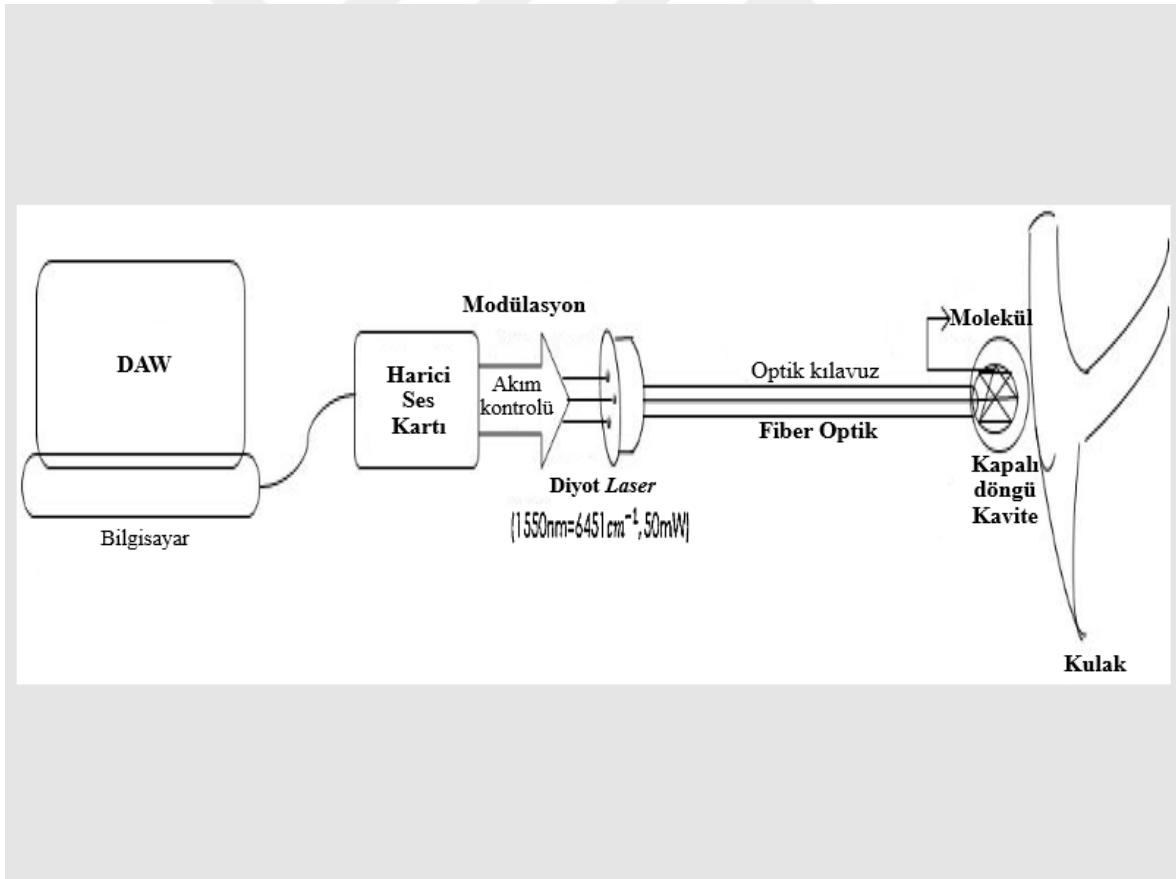
Şekil 17. IR Rezonans tabanlı PA hoparlör için tasarlanmış kavramsal deneysel düzeneğin kalibrasyonu.

IR Rezonans tabanlı PA hoparlör için tasarlanmış kavramsal deneysel düzeneğin kalibrasyonu Şekil 17’de gösterildiği gibi, ses işleme mekanizmasından fotoakustik ses iletim mekanizmasına iletilen sesin, yeniden akustik ortamda üretilmesinin niceliksel olarak ideal bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla ek olarak özdeş bir bilgisayar ve özdeş bir harici ses kartına ihtiyaç duyulmaktadır. PA ses basıncı oluşturularak akustik ortamda açığa çıkmış sesin kaydedilmesi, harici ses kartının mikrofon girişine bağlanmış bir

mikrofon yardımı ile bilgisayar içerisinde bulunan *DAW* üzerinden sinyal alınmasıyla gerçekleştirilmektedir. Kaydedilen sinyal, orjinal sinyalle karşılaştırıldığında birbiriyle aynı veya benzer olması beklenmektedir.

3.2.4. Fotoakustik Kulaklık

IR Rezonans tabanlı PA kulaklık, IR Rezonans tabanlı PA hoparlör ile aynı çalışma mekanizmalarına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. “3.2.3. Ses Kalibrasyon Mekanizması” bölümünde anlatıldığı şekilde gerekli kalibrasyon işlemi uygulandıktan sonra kulağa adapte edilecek şekilde Şekil 18’de gösterilmiştir.



(Musdal ve Kurt, 2021)

Şekil 18. IR Rezonans tabanlı PA kulaklık için tasarlanmış kavramsal deneysel düzenek.

PA hoparlörde olduğu gibi PA kulaklık için de aynı şekilde, ses işleme mekanizmasında bilgisayar üzerinden oluşturulan ses verilerinin, fotoakustik ses iletim mekanizmasıyla yeniden üretilmesi hedeflenmektedir. Modüle edilmiş lazer ışını bir fiber optik kablo ile lazer güvenliğini sağlayan kapalı döngü küresel soğurma hücresine iletilir. Daha önce de belirtildiği gibi, hücre içerisindeki moleküler yapı tasarım açısından çok önemlidir. Küresel absorpsiyon hücresi, ses basınç seviyesini maksimize etmek için lazer dalga boyu ile aynı banttaki ışığı soğurma kabiliyetine sahip molekülü içerir. Yani molekülün tepe absorpsiyon dalga boyu aralığı lazer dalga boyu aralığı ile örtüşmelidir. Molekül aynı zamanda yüksek genleşme katsayısına ve düşük özısıya sahip olmalıdır (Musdal ve Kurt, 2021).

IR Rezonans tabanlı PA kulaklık için diyot lazer 50 mW gücünde ve 1550 nm ($\bar{\nu}=6451 \text{ cm}^{-1}$) dalga boyuna sahip olacak şekilde seçilmiştir. 1550 nm dalga boyunu moleküler olarak soğuran bazı moleküller, literatürde bulunan spektroskopi üzerine yapılmış çalışmalar taranarak tespit edilmiştir (Labonte, 2018; Muik vd., 2004; Padalkar ve Pleshko, 2015). Spektroskopi üzerine yapılan bir çalışmada IR spektrumunda gönderilen 1550 nm dalga boyuna sahip ışınları, R-NH₂ (primer amin grubu) bağı içeren moleküllerin temel rezonans bölgesinde ve diğer N-H bağı içeren moleküllerin ise birinci üst rezonans bölgesinde (first overtone) soğurduğu bildirilmiştir (Labonte, 2018). Bu çalışmalarda tespit edilen 1550 nm ($\bar{\nu}=6451 \text{ cm}^{-1}$) dalga boyunu soğuran moleküller arasında diğer termodinamik özellikleri de gözönüne alındığında zeytin yağı ve zeytin posası öne çıkmaktadır. Fakat, ışığı soğuran bir sıvı ile doldurulan bir hücre tarafından üretilmesi beklenen PA sinyalin zayıf olacağı yapılan çalışmalarla bildirilmiştir (Rosencwaig, 1977). Bunun aksine, ışığı soğuran yumuşak katı (*soiled phase*) bir malzeme ile doldurulmuş bir hücre durumunda güçlü bir PA sinyalinin meydana gelmesi beklenebilir. Seçilen molekül için literatürde bulunan yenilebilir yağların saflığını ve kalitesini saptama; insan tarafından tüketilebilir veya tüketilemez nitelikteki benzeri gıda ürünlerinin biyodizel olarak kullanılabilmesinin kriterlerini belirleme amacını taşıyan spektroskopi üzerine yapılmış çalışmalarda tespit edilen termodinamik özelliklerinden yararlanılmıştır. Bildirilen çalışmalara göre bu çalışmadaki kavramsal kulaklık tasarımı için en uygun molekül zeytin posası olarak tespit edilmiştir. Zeytin posası, zeytinyağı üretiminin bir yan ürünüdür ve doğal yapısında bir katı-sıvı karışımı olan hem zeytin çekirdeği hem de zeytinyağı

içermektedir (Muik vd., 2004; Wierzbicki vd., 2010). Zeytin posasının bazı termofiziksel özelliklerinin zeytinyağına oldukça yakın olduğu yapılmış çalışmalardan tespit edilmiştir (Dupont, vd., 2014; Sajjadi, vd., 2016). Zeytin posasının, temel termofiziksel özelliklerini zeytinyağıninkine eşit olduğu varsayımıyla zayıflama katsayısı α (1550 nm) ≈ 1 , genleşme katsayısı $\beta = 0.00070 \text{ K}^{-1}$ ve ısı kapasitesi $C_p = 1970 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ alınarak hesaplamalarda dikkate alınmıştır (Dupont, vd., 2014; Engineering ToolBox, 2003b; Engineering ToolBox, 2009; Muik vd., 2004; Sajjadi, vd., 2016).

Bunun dışında Bölüm 1.1.2’de de belirtildiği üzere insan kulağının işitme kanalının girişinde bulunan konka çapı yaklaşık 9mm’dir. Tüm bu bilgilerden ve Denklem 3.10’dan yararlanılarak PA kulaklık için üretilebilecek ses basıncı 10 mm çapında zeytin posası ile doldurulmuş bir küre için hesaplanmıştır. Hesaplamalar *Origin Pro* yazılımı yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarla ilgili bulgulara bu çalışmanın Araştırma Bulguları bölümünde yer verilmiştir.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışma kapsamında, ses spektrumunun 20 Hz - 20000 Hz frekans aralığında ve 0.02 mPa - 20000 mPa aralığındaki basınca karşılık gelen 0 dB SPL - 120 dB SPL aralığındaki seviyelerde bulunduğu insan tarafından işitilebilen sesin, PAE ile iletilmesi ve yeniden üretilmesi prensibi ile çalışan bir hoparlör ve bir kulaklığın çalışma mekanizması teorik olarak ortaya konmuş ve kavramsal olarak tasarımı geliştirilmiştir. Ortaya konan modelle ilgili teorik hesaplamalara bu bölümde yer verilmiştir. Teorik hesaplamaların sonuçları, algılanan ses seviyeleri referans alınarak belirlenen farklı frekanslardaki *pure tone*'lara karşılık gelen dB SPL değerlerinin eşit olarak duyulmasını niceliksel olarak belirleyen 0-100 phon değerleri arasında üretilebilecek ses basıncı ve buna karşılık gelen ses basınç seviyeleri açısından ele alınmıştır (Tablo 4). Bunun dışında PAE ile işitilebilir aralıkta ses üretebilecek potansiyele sahip *laser* ve bu lazer dalga boyunu moleküler olarak soğurabilen olası moleküller karşılaştırılarak incelenmiştir.

4.1. Fotoakustik Etki ile İşitilebilir Ses Basıncı Oluşturulması

Bu bölümde yapılan hesaplamalar Bölüm 3.1'de ortaya konulan teoriden yararlanılarak Bölüm 3.2.4'te belirtilen PA kulaklık tasarımı ve tasarım için araştırılmış veriler ışığında teorik olarak Origin programı yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre, yapılan teorik hesaplamalar sonucu üretilmesi gereken ses basınç seviyeleri, farklı ses seviyelerine karşılık gelen aynı ses yüksekliğinde algılanan farklı frekanslar dikkate alınarak incelenmiştir. Bu sebeple frekans değişimine karşılık gelen ses basıncı Denklem 3.10 ile hesaplanmış daha sonra Denklem 1.7 ile hesaplanan ses basıncına karşılık gelen dB SPL değerleri belirlenmiştir. Ortaya konan model çerçevesinde gerçekleştirilen teorik hesaplamalar Bölüm 3.1.1'de de belirtildiği üzere üretilmesi beklenen ses basınç seviyelerini karşılayacak sonuçlar vermektedir. Ayrıca bu çalışma kapsamında ortaya konan teorinin tutarlılığı Diebold ve Westervelt'in öne sürdüğü teori Denklem 3.6 için de hesaplamalar yapılmış olup Denklem 3.10 ile yapılan hesaplamalar karşılaştırılarak kontrol edilmiştir. Bölüm 3.1.2'de belirtilen modülasyon frekansı q değeri için öne sürülen koşulu sağlayıp sağlamadığı niceliksel olarak gösterilmiştir.

Bu bilgiler ve Bölüm 3.2.4'te sunulmuş veriler, yaklaşımlar ve alınan yaklaşıklıklar ışığında, Şekil 18'de gösterilen IR Rezonans tabanlı PA kulaklık için belirlenmiş $p_L = 50$ mW gücündeki diyot lazerin dalga boyu $\lambda = 1550$ nm ($\bar{\nu} = 6451$ cm⁻¹) ve bu dalga boyundaki ışığın enerjisini tam olarak soğuran molekül olan zeytin posasının termofiziksel özellikleri, zeytin yağının termofiziksel özelliklerine oldukça yakın olduğu tespit edilen veriler kullanılarak hesaplamalara dahil edilmiştir.

Buna göre zeytin posasının 20 °C'teki yoğunluğu zeytin yağıyla aynı olduğu varsayılarak $\rho = 911$ kg/m³ alınmıştır. Aynı şekilde zeytin posası için $B = 1.60 \times 10^9$ N/m olarak alınan Bulk modülü Denklem 1.4'te kullanılarak, zeytin posası içerisinde ilerleyen ses hızı yaklaşık olarak $v \approx 1325.3$ m/s olarak hesaplanmıştır. Yine aynı yaklaşım öne sürülerek zeytin posasının 1550 nm dalga boylu ışığı soğurma katsayısı $\alpha(\lambda) = \alpha(1550 \text{ nm}) \approx 1$, genleşme katsayısı $\beta = 0.00070$ K⁻¹ ve ısı kapasitesi $C_p = 1970$ Jkg⁻¹K⁻¹ olarak alınmıştır (Engineering ToolBox, 2003b; Engineering ToolBox, 2009). Bunun dışında fiber optik ile molekülün soğurulması amacıyla yönlendirilen, dalga boyu, $\lambda = 1550$ nm ($\bar{\nu} = 6451$ cm⁻¹) olan diyot *laser*'in, molekül üzerine etkidiği birim alan başına düşen optik güç, yani lazer güç yoğunluğu, r_{fb} lazerin moleküle etkidiği etkin mesafe yarıçapı olmak üzere;

$$I_0 = \frac{p_L}{\pi r_{fb}^2} = \frac{0.05}{\pi (0.00017)^2} = 550709.14565 \text{ W/m}^2$$

olarak hesaplanmıştır. Tüm bu veriler sabit olmakla beraber elde edilmek istenen değişken değerlere ulaşmak için teorik hesaplamalarda kullanılmışlardır. Hesaplamalar, modüle edilecek *pure tone*'lar artırılarak gerçekleştirilmiştir. Frekans artışına göre öncelikle Diebold ve Westervelt'in öne sürdüğü teori bu çalışma açısından yukarıda verilen veriler üzerinden değerlendirilmek üzere açıkça $q \ll 1$ olduğu görülen q değeri ve Denklem 3.6 kullanılarak Bölüm 3.1.2.'de belirtilmiş olan $r \approx a$ yaklaşıklığı ile elde edilen frekans değişimine göre hesaplanmış $P(q)$ basınç değerleri için yapılmış hesaplamalar Tablo 5'te gösterilmiştir. Daha sonra aynı frekans değişimine göre Denklem 3.10 ile hesaplanmış $P(f)$ basınç değerleri Tablo 6'da gösterilmiştir. Frekans değişimine göre her iki yöntemle elde edilen basınç değerleri ve bunlara karşılık gelen ses basınç seviyeleri Denklem 1.7 ile hesaplanılarak Tablo 7'de gösterilmiştir. Tablo 5, 6 ve 7 ile ilgili değerlendirmeler tezin Sonuç ve Öneriler bölümünde Tablo 4 dikkate alınarak yorumlanmıştır.

Tablo 5

Frekans değişimine göre q ve Denklem 3.6 ile hesaplanmış basınç değerleri.

f (Hz)	$q = (2\pi f)a / v_0$ $q \ll 1$	$P(q)$ (mPa)
100	0,00213	0,82992
200	0,00427	1,65984
300	0,0064	2,48976
500	0,01067	4,14957
700	0,01494	5,80933
1000	0,02134	8,29885
2000	0,04268	16,59543
3000	0,06402	24,88748
4000	0,08536	33,17274
5000	0,1067	41,44892
7500	0,16004	62,08493
10000	0,21339	82,61499
12000	0,25607	98,93924
15000	0,32009	123,21764
17000	0,36277	139,23891
20000	0,42678	162,98088

Tablo 6

Frekans değişimine göre Denklem 3.10 ile hesaplanmış basınç değerleri.

f (Hz)	$P(f) = -i \frac{2\pi}{3C_p} \alpha \beta I_0 a^2 f$ (mPa)
100	0,82992
200	1,65985
300	2,48977
500	4,14961
700	5,80946
1000	8,29923
2000	16,59846
3000	24,89769
4000	33,19692
5000	41,49614
7500	62,24422
10000	82,99229
12000	99,59075
15000	124,48843
17000	141,08689
20000	165,98458

Tablo 7

Frekans değişimine göre Denklem 3.6 ($P(q)$) ve Denklem 3.10 ($P(f)$) ile hesaplanmış basınç değerlerine karşılık gelen ses basınç seviyeleri karşılaştırması.

f (Hz)	$P(q)$		$P(f)$	
	(mPa)	dB SPL	(mPa)	dB SPL
100	0,82992	32,36015	0,82992	32,36015
200	1,65984	38,38074	1,65985	38,38075
300	2,48976	41,90254	2,48977	41,90258
500	4,14957	46,33946	4,14961	46,33956
700	5,80933	49,26192	5,80946	49,26212
1000	8,29885	52,35976	8,29923	52,36015
2000	16,59543	58,37917	16,59846	58,38075
3000	24,88748	61,89902	24,89769	61,90258
4000	33,17274	64,39503	33,19692	64,40135
5000	41,44892	66,32967	41,49614	66,33956
7500	62,08493	69,83912	62,24422	69,86138
10000	82,61499	72,32058	82,99229	72,36015
12000	98,93924	73,88677	99,59075	73,94378
15000	123,21764	75,79286	124,48843	75,88198
17000	139,23891	76,85461	141,08689	76,96913
20000	162,98088	78,22213	165,98458	78,38075

4.2. Fotoakustik Etki ile İşitilebilir Ses Basıncı Oluşturabilecek Diğer Laser-Moleköl Eşleşmeleri

Çalışma kapsamında belirtilen veriler ve bu verilere ilişkin yapılan hesaplamalar haricinde PA ses iletim mekanizmasında kullanılma potansiyeli taşıyan *laser* türleri ve bu *laser* dalga boylarını soğurabilen moleküller literatürdeki spektroskopi çalışmaları incelenerek belirlenmiştir. Belirlenen *laser*-moleköl eşleşmeleri Tablo 8’de *laser* türü, *laser* dalga boyu, *laser* dalga boyunu soğurabilen moleküler bağ, dalga sayısı cinsinden moleküler bağların soğurabildiği yaklaşık bant genişliği ve moleküler bağların ait olduğu fonksiyonel gruplar açasından listelenmiştir.

Tablo 8

PA ses iletim mekanizmasında kullanılabilir diğer *laser*-moleköl eşleşmeleri.

<i>Laser</i> Türü	Dalga Boyu	Moleküler Bağ	Bant Genişliği ($\approx\text{cm}^{-1}$)	Moleküler Bağ için Fonksiyonel Gruplar
Diyot	808 nm	RNH ₂	13000-12000	Aminler
		RNHR	12400-11800	
Diyot	915nm	CH ₃	11500-11000	Alkiller
		CH ₂	11600-11000	Metilen
NdYAG	1 μm	H ₂ O	10850-10200	Su
		RNH ₂		Aminler
ErYAG	1.7 μm	CH ₃	6200-5900	Alkiller
		CH ₂	6100-5800	Metilen
		CH	6000-5700	Hidrokarbon
<i>Thulium</i>	2.1 μm	CONH ₂ (R)	4920-4720	Amidler

(Musdal ve Kurt, 2019b-c)

Bu çalışmada IR rezonans tabanlı PA hoparlör geliştirilmesi amaçlandığı için IR dalga boyunda ışınım yapan ve bu dalga boyunu soğurma kapasitesine sahip moleküller dikkate alınmıştır.

BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu doktora tez çalışması sonucunda elde edilen bulgular çalışma kapsamında sunulan araştırma yöntemi çerçevesinde değerlendirilerek IR rezonans tabanlı PA hoparlör ve kulaklık geliştirilmesi amacıyla *Diebold-Westervelt* modeli baz alınarak ortaya konan teori ve teorik hesaplamalar sonucu insan kulağının duyarlı olduğu aralıkta ses basıncı elde edilmiştir. Bu bölümde, çalışma kapsamında elde edilen veriler ortaya konulan modelin sunduğu avantajlar, çalışma sırasında karşılaşılan dezavantajlar ve modelin barındırdığı olası potansiyeller açısından “Araştırma Bulgularının Değerlendirilmesi” ve “Gelecek Deneysel Çalışmalar ve Yüksek Çözünürlüklü PA Ses İletimi” başlıkları altında özetlenerek yorumlanmıştır.

5.1. Araştırma Bulgularının Değerlendirilmesi

IR rezonans tabanlı PA hoparlör ve kulaklık geliştirilmesi için Bölüm 3.1 ve Bölüm 3.2 de ortaya konmuş olan teori ve yöntem Bölüm 4.1’de sunulan bulgular ile beraber değerlendirilmiştir. Özet olarak gönderilen *pure tone*’ların PA ses iletim mekanizması yardımı ile iletilip işitilebilir aralıklarda yeniden üretilmesi hedeflenmiş, hedeflenen sonuçlar teorik olarak sağlanmıştır. Ortaya konan modelin geliştirilmesi için uygun bileşenler tespit edilmiş, bu bileşenler dahil edildiğinde sadece sadeleştirilmiş test sinyalleri değil, karmaşık müzik sinyallerinin de bu yöntem ile iletilip yeniden üretilmesinin mümkün olabileceği saptanmıştır.

Bu çalışma kapsamında ortaya konan teori, Diebold ve Westervelt’in küresel damlacık şeklindeki bir sıvının ürettiği boyutsuz frekans (dalga vektörü) olarak tanımladıkları q değerine bağımlı olarak değişen PA basınç ($P(q)$) ifadesi üzerinden yapılan hesaplamalara dayanmaktadır. Denklem 3.6’da belirtilen q değeri, Bölüm 4.1’deki veriler kullanılarak hesaplanmış; yapılan hesaplamalar Tablo 5’te gösterilmiştir. Hem ses

spektrumu açısından işitilebilir frekans değerleri (20 Hz - 20 kHz) dikkate alınarak değerlendirildiğinde $q \gg 1$ olduğu varsayımı ortaya çıkmış, hem de 20 Hz - 20 kHz aralığındaki frekanslar için q değerleri hesaplandığında $q \gg 1$ olduğu gözlenmiştir (Tablo 5).

Bunun sonucunda Bölüm 3.2’de ortaya konan kavramsal deneysel düzeneğin gerçekleşmesi için Bölüm 3.1.2’de ortaya konan teorik varsayımlar ve yaklaşıklıklar yardımıyla Denklem 3.10’da belirtildiği üzere, modüle edilen frekansa bağımlı olarak değişen PA basınç ($P(f)$) ifadesi elde edilmiştir.

Ortaya konan teorinin tutarlı olup olmadığı araştırılmak amacıyla Bölüm 3.2.4’te belirlenen IR rezonans tabanlı PA kulaklık için PA ses iletim mekanizmasını oluşturan bileşenler dalga boyu 1550 nm olan bir diyot laser ve bu dalga boyunu soğurabilme kapasitesine sahip molekül olan zeytin posası olarak tespit edilmiştir. Bu verilere ait Denklem 3.6’ya göre yapılmış basınç ($P(q)$) hesaplamaları, modüle edilen frekans değerlerine göre ayrıca hesaplanarak Tablo 5’te listelenmiştir. Aynı verilerle Denklem 3.10’a göre yapılmış basınç ($P(f)$) hesaplamaları, modüle edilen frekans değerlerine göre Tablo 6’da gösterilmiştir. Ortaya konan teorinin tutarlı olduğu, hesaplanmış $P(q)$ ve $P(f)$ değerleri Tablo 5 ve Tablo 6’dan alınmış; karşılaştırılmak üzere Tablo 7’de gösterilmiştir. Hesaplanan $P(q)$ ve $P(f)$ basınç değerleri, Tablo 5’te listelenmiş olan q değerinin 1’e yaklaşması ile, başka bir deyişle yüksek frekanslara çıkıldığında, beklenildiği gibi çok ufak sapmalar ($\pm 0,006\%$ - 2%) göstermektedir. Teorik olarak insan işitme frekans aralığı 20 Hz - 20 kHz aralığında olduğu bilinmekle beraber çoğu yetişkin bireyin 15kHz – 17 kHz ve üzerini işitemediği gerçeği, bu ufak sapmaların önemsiz olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında sunulan kavramsal deneysel düzeneğin gerçekleşmesi durumunda yapılan teorik hesaplamaların deneysel doğrulaması ve verimlilik açısından değerlendirmeleri yapılabilecektir.

Hesaplanan $P(q)$ ve $P(f)$ değerlerine karşılık gelen ses basınç seviyeleri hesaplanarak Tablo 7’de ayrıca gösterilmiştir. Frekansa göre artan oranda dB SPL artışı gözlenmekle birlikte, burada söz konusu değerler üretilebilecek ses seviyelerini temsil etmektedir. Üretilen ses seviyelerinin 100 Hz - 20000 Hz için yaklaşık olarak 32 dB SPL - 78 dB SPL değerlerine kadar çıkabildiği gözlenmiş olsa da, bu üretilen seviyelerin

anlamlandırılması işitme olayının gerçekleştirilmesiyle olacaktır. Dolayısıyla Tablo 7'deki üretilen ses seviyelerini tek başına değerlendirmek anlamlı olmayacaktır. Sonuç itibarıyla üretilen sesler, insan kulağı tarafından işitme mekanizmasının bir sonucu olarak insan beyni tarafından algılanacaktır. Burada üretilen sesin hangi seviyede algılanacağını önemli olacağı düşünülerek, Bölüm 1.1.2 ve Bölüm 3.1.1'de daha önce detaylı olarak değinilerek Şekil 6 ve Tablo 4 belirtilen, eşit algılanan ses seviyeleri açısından değerlendirmek gerekmektedir. Buna göre 100 Hz – 20 kHz aralığında yeniden üretilen sesin 1000 Hz referans alınarak *phon* değeri üzerinden yapılan değerlendirme anlamlı olacaktır.

Sonuç olarak, ses ile modüle edilmiş 1550 nm diyot lazerin etkilediği zeytin posası ile doldurulmuş bir küre için 1000 Hz'de 8,3 mPa ve 20000 Hz'de 165,98 mPa olacaktır. Bu basınç seviyeleri, eş duyum eğrileriyle bağıntılı olarak, sırasıyla yaklaşık olarak 50 dB SPL ve 60 dB SPL'ye karşılık gelmektedir. Lazer gücü artırıldığında 80 dB SPL'ye ulaşmak mümkün olmaktadır.

Bu çalışma ile ilk defa bir fotoakustik ses iletim mekanizmasına sahip ses iletim cihazının tasarımının nasıl olabileceği detaylı olarak ortaya konmuştur.

Bu çalışma sırasında karşılaşılan kısıtlamalar, bulunan mevcut koşullardaki eksiklikler sebebiyle, çalışmanın fiziksel olarak gerçekleştirilmesindeki bazı zorluklardan kaynaklanmaktadır. Bu çalışmanın başlangıcında fotoakustik etkiyi temel alan teorik hesaplamaların yapılması ve deneysel olarak doğrulanması hedeflenmiştir. Ancak deneysel düzeneğin uygun biçimde oluşturulması için gerekli altyapının doktora süresince kurulamamasından dolayı burada sunulan çalışma teorik boyutta kalmıştır. Çalışma için belirlenmesi gereken molekül seçimi, literatürdeki mevcut çalışmaların sonuçlarıyla kısıtlanmıştır. IR Spektroskopisi çalışmalarının yaygın olarak sadece yakın kızılötesi (NIR) bölgede daha az maliyetli olarak gerçekleştirilebiliyor olması, bu çalışma açısından olası başka potansiyel moleküllerin belirlenmesinin sadece literatürde bulunan spesifik başka amaçlarla yapılmış çalışmalara bağlılık doğurmaktadır. İleri teknolojik spektroskopi cihazlarının ve *LASER*'lerin ülkemizdeki her laboratuvarında halihazırda bulunmaması sonucu ulaşılabilir olmaması ise deneysel gerçekleştirilmesinin önüne geçmiştir.

5.2. Gelecek Deneysel Çalışmalar ve Yüksek Çözünürlüklü PA Ses İletimi

Çalışma kapsamında sunulan IR rezonans tabanlı PA hoparlör veya kulaklık geliştirilmesi amacıyla oluşturulacak PA ses iletim mekanizması için kullanılması öngörülen *laser*-molekül eşleşmelerinin varyasyonları açısından değerlendirildiğinde Tablo 8’de listelenen moleküler bağları içeren moleküllerin varlığı oldukça fazladır. Bölüm 3.2.2’de sunulan PA ses iletim mekanizması için Bölüm 4.2’de bulunan Tablo 8 incelendiğinde uygulanabilecek olası *laser*-molekül eşleşmeleri şu şekildedir: Dalga boyu 808nm olan bir diyot *laser* ile Aminler, dalga boyu 915 nm olan bir diyot *laser* ile alkinler veya metilen. *Laser* türü değiştiğinde ise doğrudan modülasyon yönteminin yeterli gelmeme olasılığı ve diğer modülasyon yöntemlerinin de denenmesi gerektiği gözönünde bulundurulmalıdır: Dalga boyu 1 µm olan bir NdYAG *laser* ile su veya aminler, dalga boyu 1.7 µm olan bir ErYAG *laser* ile alkinler metilen veya hidrokarbon, dalga boyu 2.1 µm olan bir *Thulium laser* ile amidler kullanılabilir. Burada bahsedilen molekül gruplarına ait moleküllerin de bulunduğu başka moleküllerle gerçekleşen karışımlar da kullanılabilir. Böyle bir seçenek söz konusu olduğunda ve karıştırılan diğer moleküllerin gönderilen ışığı soğurucu nitelikte olmaması durumunda PA sinyalin iletiminde kayıplar olacağı düşünülmektedir. Fakat ışık kaynağını tam olarak soğuracak kapasitede oluşturulacak molekül karışımları kullanıldığında bu çalışma kapsamında sunulan tasarım açısından yüksek çözünürlükte ses ortaya çıkarması öngörülmektedir.

Silindirik bir hücre içinde bulunan bir sıvı için PAE sinyalinin yüksek frekansta (1 MHz) CW ve darbe modülasyonu ile sürülerek elde edildiği gösterilen başka bir çalışmada ise CW modülasyonundaki sinyal iletim kaybının 10 dB olduğu bildirilmiştir (Atalar, 1980). Bu sebeple PA kulaklık tasarımı için PAE ile elde edilmesi beklenen sinyal işitilebilir frekans aralığında olduğu için sinyal iletim kaybının ve ana sinyal ile küre hücre duvarından yansıyan sinyal arasında oluşacak girişimin oldukça düşük olması beklenmektedir. Ses şiddeti lazer gücü ile ayarlanabilmekle beraber Bölüm 3.2.4’te sunulan IR Rezonans tabanlı PA kulaklık için tasarlanmış kavramsal deneysel düzenekteki gibi bir çalışma prensibine sahip PA ses iletim cihazının yüksek çözünürlüklü kalitede ses iletimi gerçekleştirilmesi beklenmektedir. Bunun dışında, IR Rezonans tabanlı PA kulaklık için tasarlanmış kavramsal deneysel düzenekte belirtilen çalışma prensibine sahip olacak şekilde oluşturulacak PA ses iletim cihazı içerisinde bulunan demodülasyon hücresi sıvı bir

madde olarak seçilmiş olsaydı PA sinyal iletimi zayıf olması beklenirdi. PA ses iletiminin zayıf olmaması amacıyla seçilen molekül yarı katı - yarı sıvı formda, yumuşak katı (*soiled phase*) bir malzeme olan zeytin posası olarak seçilmiş, oluşturulacak PA sinyalin güçlü olması beklenmektedir.

Bu çalışmada sonuç olarak, modüle edilmiş bir lazer ışınının bir optik fiber vasıtasıyla zeytin posasıyla doldurulmuş bir küreye yönlendirildiği, başka elektronik cihazlarla EMI oluşturmayan IR rezonans tabanlı PA hoparlör ve kulaklık tasarımı geliştirilmiştir. Geleneksel hoparlör ve kulaklıklarda bulunan elektrik kablosunun yerini fiber optik kablo olarak ses iletim mekanizması bobin veya mıknatıs içermemektedir. Tez kapsamında sunulan PA kulaklık tasarımı, PA ses iletim mekanizmasına sahip olması nedeniyle başka elektronik cihazlarla EMI oluşturmayacağı için, özellikle EEG uygulamaları başta olmak üzere nöro işitsel çalışmalarda kullanılan diğer cihazlarla (EEG, MEG, fMRI, ABR, vb.) eşzamanlı kullanılması açısından yüksek potansiyele sahiptir. Önerilen tasarımda PA ses iletim mekanizması ile insan kulağının duyarlı olduğu aralıktaki sesin iletilmesinin ve yeniden üretilmesinin, uygun bileşenler dahil edildiğinde mümkün olduğu teorik olarak gösterilmiştir. Burada bahsedilen ses aralığı, ses spektrumunun 20 Hz - 20000 Hz frekans aralığında ve 0.02 mPa - 20000 mPa aralığındaki basınca karşılık gelen 0 dB SPL - 120 dB SPL aralığındaki seviyelerde bulunduğu insan tarafından işitilebilen sestir. Çalışma kapsamında sunulan yeni tip IR rezonans tabanlı PA hoparlör ve kulaklığın kavramsal tasarımları gerçekleştirildiğinde, EMI barındırmadığı gerçeği ile sadece nöro-ışitsel/algısal çalışmalarla adapte edilmesi değil, aynı zamanda yüksek çözünürlükte müzik dinlenebileceği de öngörülmektedir.

Kavramsal deneysel düzenekte belirtilen kontrol aşaması olan ses kalibrasyon mekanizmasına ek olarak, aynı ses verileri harici ses kartı çıkışına frekans cevap aralığı *flat* olan yüksek kaliteli bir HBM prensibi ile çalışan dinamik bir hoparlör ile deney tekrarlanarak olası farklılıklar işitsel olarak kontrol edilebilir. Bu sayede üretilmesi gereken sesin işitsel kontrolü, konvansiyonel hoparlörler ile karşılaştırılması açısından gerçekleştirilmiş olacaktır. Bu adım ileride tasarlanması öngörülen algısal farklılıkların ölçülmesi için oluşturulacak yöntemlerin hazırlanmasına yardımcı olacaktır. Bunun dışında, bilgisayar yardımı ile gerçekleştirilen kalibrasyon adımı yeterli olsa da, ek kontrol

sağlanması için harici bir dB SPL ölçer ile sadece ses seviyeleri kontrol edilebilir. Fotoakustik iletim mekanizması ile sesin üretimi sırasında ortaya çıkmayacağı düşünülen EM dalganın, EMI dikkate alınarak ayrıca bir ölçüm yapılmasının anlamlı olacağı düşünülmektedir.

Sonuç olarak, bu doktora tez çalışmasında hedeflenen EMI yaratmayan IR rezonans tabanlı PA hoparlör ve kulaklık geliştirilmesi için gereken yöntem, teorik ve kavramsal olarak ortaya konmuştur. Yapılan hesaplamalarla işitilebilir sesin PA ses iletim mekanizması ile iletilmesi ve üretilmesi için gerekli PA basınç seviyelerine ulaşılabileceği teorik hesaplamalarla gösterilmiştir. IR rezonans tabanlı bir PA hoparlör ve kulaklık tasarımının gerçekleşmesi için gerekli deneysel düzenek kavramsal olarak belirlenerek ortaya konmuş, ancak söz konusu kısıtlamalardan dolayı deneysel olarak doğrulaması bu doktora tez çalışması kapsamında yapılamamıştır.

KAYNAKÇA

- Atalar, A. (1980). "Photoacoustic effects as a liquid absorbance detector". *Appl. Opt.*, 19 (18), pp. 3204-3210. doi: 10.1364/AO.19003204.
- Ball, D. W. (2006). *Field Guide to Spectroscopy*. SPIE Press: Bellingham, WA
- Barrow, G. M. (1962). *Introduction to Molecular Spectroscopy* (International Student ed.). McGRAW-HILL: Tokyo.
- Beekes R. S. P. (2010). "Etymological Dictionary of Greek; with the assistance of Lucien van Beek". A. Lubotsky (ed.). in: *Leiden Indo-European etymological dictionary series; Volume. 10/1-2*. Brill: Boston.
- Beinart, R., & Nazarian, S. (2013). "Effects of external electrical and magnetic fields on pacemakers and defibrillators: from engineering principles to clinical practice". *Circulation*, 128(25), 2799–2809. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.113.005697
- Bell, A. G. (1880a). "On the Production and Reproduction of Sound By Light". *American Journal of Science*, S3-20 (118), 305-324.
- Bell, A. G. and Tainter, S. (1880b). "Photophone Transmitter", *United States Patent Application Publication*, US 235,496.
- Bell, A. G. (1881). "The Production of Sound by Radiant Energy". *Science*, OS-2 (49), 242-253.
- Benward, B. and Saker, M. (2009). *Music in Theory and Practice Volume I* (8th ed.). The McGraw-Hill: US.
- Boriani, G., & Steffel, J. (2018). "Electromagnetic interference in pacemaker patients". in: *ESC CardioMed*. Oxford University Press: Oxford, UK. Available at: <https://oxfordmedicine.com/view/10.1093/med/9780198784906.001.0001/med-9780198784906-chapter-466>
- Brice, R. (Ed.). (2001). "Shout – Loudspeakers". *Music Engineering* (2nd ed.). (pp. 416-434) Oxford: Newnes. doi:10.1016/b978-075065040-3/50034-8

- Campbell, T., Kerlin, J. R., Bishop, C. W., Miller, L. M. (2012). “Methods to eliminate stimulus transduction artifact from insert earphones during electroencephalography”. *Ear and Hearing*, 33 (1), 144-150. doi: 10.1097/AUD.0b013e3182280353
- CDC - Centers for Disease Control and Prevention, (2017). National Biomonitoring Program: Chemical Factsheets. Retrieved April, 2021, from https://www.cdc.gov/biomonitoring/chemical_factsheets.html
- Davis, G. and Jones, R. (1989). *The Sound Reinforcement Handbook* (2nd ed.). USA: Hal Leonard Publishing Corporation.
- De Silva, A. and Schier, M. (2009). “A Feasibility Study of Commercially Available Audio Transducers in ABR Studies”, *13th International Conference on Biomedical Engineering*, 156-160.
- Dickason, V. (2006). *The Loudspeaker Design Cookbook* (7th ed.). New Hampshire: Audio Amateur Press.
- Diebold, G.J. and Westervelt, P.J. (1988). “The photoacoustic effect generated by a spherical droplet in a fluid”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 84 (6) 2245–2251. <https://doi.org/10.1121/1.397017>.
- Dupont, C., Chiriac, R., Gauthier, G. and Toche, F. (2014). “Heat capacity measurements of various biomass types and pyrolysis residues”. *Fuel*, 115, pp. 644-651. doi: 10.1016/j.fuel.2013.07.086.
- Engineering ToolBox, (2003a). Air - Speed of Sound. Engineering ToolBox. Retrieved October, 2021, from https://www.engineeringtoolbox.com/air-speed-sound-d_603.html
- Engineering ToolBox, (2003b). Specific Heat of some Liquids and Fluids. Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-fluids-d_151.html
- Engineering ToolBox, (2009). Volumetric or Cubical Expansion Coefficients of Liquids. Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/cubical-expansion-coefficients-d_1262.html
- Everest, F. A. (2007). *Critical Listening Skills for Audio Professionals*. Thomson: Boston.

- Everest, F. A. and Pohlmann, K. C. (2009). *Master Handbook of Acoustics* (5th ed.). The McGraw-Hill: US.
- Fletcher, H. And Munson, W. A. (1933). “Loudness, Its Definition, Measurement and Calculation”. *Jour. Acous. Soc. Amer.*, Volume V, 82-108.
- Girtan M. (2018). “Trends in Photonics. In: Future Solar Energy Devices”. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. *Springer, Cham*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67337-0_4
- Hall III, J. W. (2015). *E-handbook of Auditory Evoked Responses: Principles, Procedures & Protocols*. Kindle Edition, pp. 47-52.
- Halliday, D., Resnick, R. and Walker, J. (1993). *Fundamentals of Physics* (4th ed.). Wiley: New York.
- HARMAN International Industries (2015). Cutsheet: AKG Acoustics GmbH, K812 Superior Reference Headphones. Retrieved April, 2021, from https://www.ake.com/on/demandware.static/-/Sites-masterCatalog_Harman/default/dwa576160a/pdfs/AKG_K812_Cutsheet.pdf
- Harris, D. C. and Bertolucci, M. D. (1989). *Symmetry and Spectroscopy: An Introduction to Vibrational and Electronic Spectroscopy*. Dover Publications: New York.
- Hartmann, W. M. (1995). “The Physical Description of Signals”. Brian C.J. Moore (ed.). in: *Hearing*. (pp. 1-40). Academic Press, Inc: Cambridge.
- Hartmann, W.M. (2013). Principles of Musical Acoustics, Undergraduate Lecture Notes in: *Physics*. Springer Science Business Media: New York.
- Hetch, E. (2017). *Optics* (5th ed.). Pearson Education: England.
- Hoad, T. F. (Ed.). (1996). *The Concise Oxford Dictionary of English Etymology*. Oxford University Press: Oxford.
- Holland, K. R. (2001). “Principles of sound radiation” J. Borwick (ed.). in: *Loudspeaker and Headphone Handbook*. (pp. 1-42). Focal Press: Oxford.
- Howard, D. M., Angus, J. A. S. (2009). *Acoustics and Psychoacoustics* (4th ed.). Focal Press: Oxford.

- Hutt, D. L., Snell, K. J. and Bélanger, P. A. (1993). "Alexander Graham Bell's Photophone", *Optics & Photonics News*, 4(6), 20-25.
- ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, (1998). ICNIRP GUIDELINES: For Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (Up to 300 GHz), *Health Physics*, 74 (4), 494-522.
- Kasap, S. O. (2001). *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*. Prentice Hall: New Jersey.
- Kerr, E. L. and Atwood, J. G. (1968). "The Laser Illuminated Absorptivity Spectrophone: A Method for Measurement of Weak Absorptivity in Gases at Laser Wavelengths". *Applied Optics*, 7 (5), 915-921.
- Kreuzer, L. B. (1971). "Ultralow Gas Concentration Infrared Absorption Spectroscopy", *Journal of Applied Physics*, 42 (7), 2934–2943.
- Labonte, N. (2018). Chart of NIR Absorption Bands Poster, Retrieved November, 2019, <https://galaxy-scientific.com/news/chart-of-nir-absorption-bands-poster/>
- Lüscher, E., Korpiun, P., Coufal, H.J., Tilnger, R. (1984). "Photoacoustic Effect Principles and Applications", *Proceedings of the First International Conference on the Photoacoustic Effect in Germany*, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Braunschweig, Germany, 422.
- Manohar, S. and Razansky, D. (2016). "Photoacoustics: A Historical Review". *Advances in Optics and Photonics*, 8 (4), 586-617.
- McCarthy, B. (2007). *Sound Systems: Design and Optimization: Modern techniques and tools for sound system design and alignment*. Focal Press, Elsevier: UK
- Mercadier, M. E. 1881. "On Radiophony", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 11 (65), 78-80.
- Meschede, D. (2004). *Optics, Light and Lasers: Practical Approach to Modern Aspects of Photonics and Laser Physics*. Wiley-Vch: Germany.
- Michaelian, K. H. (2010). *Photoacoustic IR Spectroscopy: Instrumentation, Applications and Data Analysis* (2nd ed.). WILEY-VCH: Germany.

- MIMS, III, F. M. (1980). “Alexander Graham Bell and the Photophone: The Centennial of the Invention of Light-Wave Communications, 1880–1980”, *Optics News*, 6 (1), 8. doi:10.1364/on.6.1.000008
- Milonni, P. W. and Eberly, J. H. (2010). *Laser Physics*. John Wiley & Sons, Inc.: New Jersey.
- Møller, H., Jensen, C. B., Hammershøj, D. ve Sørensen, M. F. (1994). “Design Criteria for Headphones”, *In Proceedings of Nordic Acoustical Meeting (Nam'94)*, Aarhus, 127-132.
- Muik, B., Lendl, B., Molina-Díaz, A., Pérez-Villarejo, L. and Ayora-Cañada M.J. (2004). “Determination of oil and water content in olive pomace using near infrared and Raman spectrometry. A comparative study”. *Anal Bioanal. Chem.*, 379 (1), pp. 35-41. doi: 10.1007/s00216-004-2493-5.
- Muşdal, B. D. (2013). Ses Örneklemelerindeki Zaman Gecikmelerinin Algısal Farklılığı Üzerine Bir İnceleme. Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Muşdal, B. D. ve Kurt, M. (2019a). “Investigation of Em-Free Audible Sound Producing Based on Photoacoustic Effect”, Proceeding, Abstract Book, *The 20th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena (IcPPP-20)*, 07 - 12 Temmuz 2019, 221 - 221. ISBN: 978-5-6041187-1-9
- Muşdal, B. D. ve Kurt, M. (2019b). “Fotoakustik Etki ile İşitilebilir Aralıkta Ses Üretebilecek Potansiyele Sahip Moleküllerin İncelenmesi”, Tam Metin Bildiri, *International Congress of Science Culture and Education 2019 (Inces 2019)*, 29 Ekim - 02 Kasım 2019, 179 - 184. ISBN: 978-605-196-392-1
- Muşdal, B. D. ve Kurt, M. (2019c). “The Investigation of Potential Molecules Which Can Produce Audible Range by Photoacoustic Effect”, Proceeding, Abstract Book, *International Congress of Science Culture and Education 2019 (Inces 2019)*, 29 Ekim - 02 Kasım 2019, 91. ISBN: 978-605-196-393-8
- Musdal, B. D. & Kurt, M. (2021). “Design of EM-artifact-free earphone based on the photoacoustic effect”. *Photoacoustics*, 21, 100214. doi: 10.1016/j.pacs.2020.100214

- Nave, C. R. (2017). Sound Waves in Air. *HyperPhysics*. Retrieved October, 2021, from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>.
- NASA - National Aeronautics and Space Administration (2010). Science Mission Directorate. Introduction to the Electromagnetic Spectrum. Retrieved March, 2022, from NASA Science website: http://science.nasa.gov/ems/01_intro.
- Orton, J. (2004). *The story of semiconductors*. Oxford University Press: Oxford.
- Önen, U. (2012). *Ses kayıt ve müzik teknolojileri* (6. Basım). Çitlembik Yayınları: İstanbul
- Padalkar, M.V. and Pleshko, N. (2015). “Wavelength-dependent penetration depth of near infrared radiation into cartilage”. *Analyst.*, 140 (7), pp. 2093-2100. doi: 10.1039/c4an01987c.
- Pearsall, T. P. (2003). *Photonics Essentials: An Introduction with Experiments*. McGraw - Hill Companies: USA.
- Pedrotti, S.J., F. L., Pedrotti, L. M., Pedrotti, L. S (2007). *Introduction to Optics* (3rd ed.). Addison-Wesley: USA, NJ.
- Peterman, K. (1988). *Laser Diode Modulation and Noise: Advances in optoelectronics (ADOP)*. Kluwer Academic Publishers: The Netherlands.
- Pickles, J. O. (2012). *An introduction to the physiology of hearing*. Emerald Group Publishing: Bingley.
- Preece, W.H. (1881). “On the Conversion of Radiant Energy into Sonorous Vibrations”, *Proc. R.Soc.*, 31, 506-520.
- Poldy, C.A. (2001). “Headphones”. J. Borwick (ed.). in: *Loudspeaker and Headphone Handbook*. (pp. 585-686). Focal Press: Oxford.
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaManta, A.-S., McNamara, J. O., Williams, S. M. (2004). “The Auditory System”. in: *Neuroscience* (3rd ed.). (pp. 283-314) Sinauer Associates, Inc.: Sunderland, MA, USA.
- Quimby, R. S. (2006). *Photonics and Lasers: An Introduction*. Wiley - Interscience: New Jersey.
- Rayleigh (Lord), (1881). “The Photophone”, *Nature*, 23, 274.

- Roozen, N. B., Glorieux, C., Liu, L., Rychtarikova, M., Van Der Donck, T., Jacobs, A., 2016. “Converting Sunlight Into Audible Sound by Means of the Photoacoustic Effect the Heliophone”. *J. Acoust. Soc. Am.*, 140 (3), 1697-1706.
- Rosencwaig, A. and Gersho, A., (1976). “Theory of the Photoacoustic Effect with Solids”. *Journal of Applied Physics*, 47 (1), 64-69.
- Rosencwaig, A. (1977). Solid State Photoacoustic Spectroscopy. Yoh-Han Pao, (Ed.). in: *Optoacoustic Spectroscopy and Detection*. Academic Press: New York, pp. 194-238. ISBN: 0-12-544150-9.
- Röntgen, W.C., 1881. “Über Töne, Welche Durch Intermittierende Bestralung Eines Gases Entstehen”, *Annalen Der Physik Und Chem.*, 1, 155-159.
- Rush, W. F., Huebler, J. E., Lysenko, P., 1987. “Photoacoustic Speaker And Method”. *United States Patent Application Publication*, US 4,641,377.
- Sajjadi, B., Raman, A. A. A. and Arandiyani, H. (2016). “A comprehensive review on properties of edible and non-edible vegetable oil-based biodiesel: Composition, specifications and prediction models”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, pp. 62-92. doi: 10.1016/j.rser.2016.05.035.
- Sampath Kumar, T. S. (2013). “Physical and Chemical Characterization of Biomaterials”. A. Bandyopadhyay and S. Bose (eds.). in: *Characterization of Biomaterials*. (pp. 11–47). Academic Press, Elsevier: USA doi:10.1016/b978-0-12-415800-9.00002-4
- Sandorfy, C., Buchet, R. and Lachenal, G. (2007). “Principles of Molecular Vibrations for Near-Infrared Spectroscopy”. Y. Ozaki, W. F. McClure and A. A. Christy (eds.). in: *Near-infrared spectroscopy in food science and technology*. (pp. 11 - 46). Wiley-Interscience: New Jersey.
- Schnupp, J., Nelken, I. and King, A. (2011). *Auditory Neuroscience: Making Sence of Sound*. The MIT Press: Massachusetts.
- Sennheiser electronic GmbH & Co. KG. (2019a). Safety Instructions: HD 25 Series. Retrieved April, 2021, from https://assets.sennheiser.com/global-downloads/file/6687/HD25_Safety_Guide_10_20119.pdf

- Sennheiser electronic GmbH & Co. KG., (2019b). Support, Warning: HD 25 Series. Retrieved April, 2021, from <https://en-us.sennheiser.com/on-ear-dj-headphone-hd25>
- Siegman, A. E. (1986). *Lasers*. University Science Books: Sausalito, California.
- Smith, F. G., King, T. A., Wilkins, D. (2007). *Optics and Photonics: An Introduction* (2nd ed.). John Wiley & Sons Ltd: England.
- Smith, F. K. and Melliush, T. W. (1947). *Teach Yourself Greek*. English University Press: London.
- Sullenberger R. M., Kaushik S. and Wynn C. M. (2019). “Photoacoustic Communications: Delivering Audible Signals Via Absorption of Light by Atmospheric H₂O”. *Optics Letters*, 44 (3), 622-625.
- Svelto, O. (1998). *Principles of Lasers*. David C. Hanna (4th ed.). Springer Science+Business Media: New York.
- Tam, A. C. (1986). “Applications of Photoacoustic Sensing Techniques”. *Reviews of Modern Physics*, 58 (2), 381-431.
- Tsuchikawa, S. (2007). “Sampling Techniques”. Y. Ozaki, W. F. McClure and A. A. Christy (eds.). in: *Near-infrared spectroscopy in food science and technology*. (pp. 133 - 143). Wiley-Interscience: New Jersey.
- Tyndall, J. (1880). “III.Further Experiments on the Action of an Intermittent Beam of Radiant Heat on Gaseous Matter”. *Thermometric Measurements, Proceedings of the Royal Society of London*, 31 (206-211), 478-479.
- Tyndall, J. (1881). “III.Action of an intermittent beam of radiant heat upon gaseous matter”. *Proceedings of the Royal Society of London*, 31 (206-211), 307-317.
- Ulehlova, L., Voldrich, L. and Janisch, R. (1987). “Correlative study of sensory cell density and cochlear length in humans”. *Hearing Research*, 28 (2-3), 149–151. [https://doi.org/10.1016/0378-5955\(87\)90045-1](https://doi.org/10.1016/0378-5955(87)90045-1)
- Watkinson, J. (2001). “Transducer drive mechanism”. J. Borwick (ed.). in: *Loudspeaker and Headphone Handbook*. (pp. 44-107). Focal Press: Oxford.

- Westervelt, P.J. and Larson, R.S. (1973). "Laser-excited broadside array*". *J. Acoust. Soc. Am.*, 54 (1) 121–122. <https://doi.org/10.1121/1.1913551>.
- WHO - World Health Organization, (June 2007a). Assessment Conclusions and Suggestions of WHO's International EMF Project, Fact Sheet No. 322. ISBN: 9787508367675
- WHO - World Health Organization, Geneva, (2007b). Extremely low frequency fields. Environmental Health Criteria, 238.
- Wierzbicki, M., Kościeszka, R., Tefelski, D. B. and Siegoczyński, R. (2010). "Determination of thermodynamic parameters of oleic acid under high pressure." *High Pressure Research*, 30 (1), pp. 135-141. doi: 10.1080/08957951003666773.
- Yates, G. K. (1995). "Cochlear Structure and Function". Brian C.J. Moore (ed.). in: *Hearing*. (pp. 41-74). Academic Press, Inc: Cambridge.
- Young, H. D. and Freedman R. A. (2012). *Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics* (13th ed.). Pearson Education Inc. Addison-Wesley: San Francisco.
- Zelechowska, A., Gonzalez-Sanchez, V. E., Laeng, B. and Jensenius, A. R. (2020). "Headphones or Speakers? An Exploratory Study of Their Effects on Spontaneous Body Movement to Rhythmic Music". *Frontiers in Psychology*, 11, 698. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00698>
- Zeren, M. A. (2003). *Müzik Fiziği* (6. Basım). Pan Yayıncılık: İstanbul.
- Zwislocki, J., Kruger, B., Miller, J. D., Niemoeller, A. F., Shaw, E. A. and Studebaker, G. (1988). "Earphones in audiometry". *The Journal of the Acoustical Society of America*, 83(4), 1688–1689. doi:10.1121/1.395926

EKLER

EK 1

B. D. Muşdal & M. Kurt, Investigation of Em-Free Audible Sound Producing Based on Photoacoustic Effect, Özet Bildiri, The 20th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena (IcPPP-20), 07 - 12 Temmuz 2019, 221 - 221. ISBN: 978-5-6041187-1-9

Session E5: PA/OA and Imaging III

Investigation of EM-free audible sound producing based on photoacoustic effect

Beygl Derya MUSDAL^{1*}, Mustafa KUET

Department of Physics, Çankaya Onsekiz Mart University,

The ability to transfer audible sound lacking any electronic apparatus which effect to human brain will open up many innovative possibilities: a.g., BEEG (Bioelectroencephalography) sound module. The modulated optical signal can be converted into an audible signal occurs via the absorption of light by the specific molecules. When the specific molecule is irradiated with IR light, the acoustic bond of the molecule is vibrated and occurred a damping signal. If the damping signal is sufficiently high, the photoacoustic sound can be achieved. We design a cell which is filled with the highly IR resonant molecules and illuminate with modulated optical signal. The optical signal is transferred to cell from the source via optical fiber. Conceptually we achieved 50 – 80 dB (SPL) in our design.

EK 2

B. D. Muşdal & M. Kurt, The Investigation of Potential Molecules Which Can Produce Audible Range by Photoacoustic Effect, Özet Bildiri, International Congress of Science Culture and Education 2019 (Inces 2019), 29 Ekim - 02 Kasım 2019, 91. ISBN: 978-605-196-393-8

INTERNATIONAL CONGRESS of SCIENCE CULTURE and EDUCATION

FOTOAKUSTİK ETKİ İLE İŞİTİLEBİLİR ARALIKTA SES ÜRETEBİLECEK POTANSİYEL SAHİP MOLEKÜLLERİN İNCELENMESİ

¹ Sivilci BENGİ DERYA MUŞDAL - Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi - Fizik

² Assoc. Prof. Dr MUSTAFA KURT - Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi - Fizik

Fotoakustik etki, ışık-madde etkileşiminin bir sonucu olarak, ilk kez 1896 yılında Alexander Graham Bell tarafından, güneş ışığının bir aynayla selenyum hücrelerine odaklanıp klasik bir telefon alıcısına yönlendirilmesi ile konuşma sesinin iletildiği bir cihaz geliştirilmesi sonucunda ortaya çıkmıştır. Akustik sinyallerin ışık - madde etkileşimi sonucu üretilmesi fotoakustik etki ile mümkündür. Fotoakustik etki katı, sıvı, gaz ve yoğunlaşmış plazmada bulunan moleküllerin, ışık - madde etkileşimi sonucunda ortaya çıkan akustik bir etkidir. Kızılötesi (IR) moleküller spektroskopisi, bir moleküle elektromanyetik spektrumunda IR bölgesinde uyumu yapan bir ışık gönderildiğinde moleküllerin atomları arasındaki bağların ışık soğurmasıyla oluşur. Bir molekül, IR ışık ile etkileşime girdiğinde moleküllerin iperem atomlar arası bağlar gönderilen ışığın frekansına bağlı olarak mekanik bir biçimde titreşir. Moleküller bağ frekansının, gönderilen IR ışık frekansıyla rezonansa girmesi sonucu açığa çıkan akustik ses sıvıdaki moleküllerin titreşimi ile üretilir. Bu çalışmada, IR bölgesindeki bir lazer kullanıldığında fotoakustik ses üretebilecek potansiyel moleküller ve modüle lazer ışığı maruziyetinde üretililecek akustik sesin değeri incelenmiştir. Fotoakustik etki üretebilecek moleküllerin potansiyelce uygulamalarda kullanılabileceği bağlamında çalışılmaktadır.

Keywords: Fotonik, Fotoakustik, Fotofon
Corresponding Author: FEED Sivilci BENGİ DERYA MUŞDAL
Abstract Id: 20191372

İNCE
Sİ

www.incescongress.com

B. D. Muşdal & M. Kurt, Fotoakustik Etki ile İşitilebilir Aralıkta Ses Üretebilecek Potansiyele Sahip Moleküllerin İncelenmesi, Tam Metin Bildiri, International Congress of Science Culture and Education 2019 (Inces 2019), 29 Ekim - 02 Kasım 2019, 179 - 184. ISBN: 978-605-196-392-1

FOTOAKUSTİK ETKİ İLE İŞİTİLEBİLİR ARALIKTA SES ÜRETEBİLECEK POTANSİYELE SAHİP MOLEKÜLLERİN İNCELENMESİ

THE INVESTIGATION OF POTENTIAL MOLECULES WHICH CAN PRODUCE AUDIBLE RANGE BY PHOTOACOUSTIC EFFECT

Bengi Derya MUŞDAL

Fizik Bölümü, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, [REDACTED]

Mustafa KURT

Fizik Bölümü, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, [REDACTED]

ÖZET: Foto-akustik etki, ışık-madde etkileşiminin bir sonucu olarak, ilk kez 1880 yılında Alexander Graham Bell tarafından, güneş ışığının bir aynaya ile selonyum hücrelerine odaklanıp klasik bir telefon alıcısına yönlendirilmesi ile konuşma sesine iletildiği bir cihaz geliştirilmesinde sonucunda ortaya çıkmıştır. Akustik sinyallerin ışık - madde etkileşimini sonucu gerçekleştirilen foto-akustik etki ile niteliklidir. Foto-akustik etki katı, sıvı, gaz ve yoğunlaşmış fazlarda bulunan moleküllerde, ışık - madde etkileşimini sonucunda ortaya çıkan akustik bir etkidir. Kuvvetli (IR) moleküler spektroskopisi, bir molekülün elektromanyetik spektrumunda IR bölgede ışınım yapma bir ışık gücünün etkisinde moleküllerin atomları arasındaki bağların ışık soğutmasıyla oluşur. Bir molekül, IR ışık ile etkileşime girildiğinde moleküllerin içeren atomlar arası bağlar güçlendirilen ışınım frekansına bağlı olarak mekanik bir biçimde titreşir. Moleküller bağ frekansının, güçlendirilen IR ışık frekansıyla rezonansa girerse sonucu ortaya çıkan akustik ses sinyali moleküllerin bağ titreşimi ile titreşebilir. Bu çalışmada, IR bölgesindeki bir lazer kullanıldığında foto-akustik sinyal üretebilecek potansiyel moleküller ve modüle lazer ışık maruziyetinde üretilen akustik basınç değerleri incelenmiştir. Foto-akustik etki üretebilecek moleküllerin potansiyelleri uygulamalarda kullanılabilirliği bağlamında çalışılmıştır.

Anahtar kelimeler: İyonik, foto-akustik, fotoakustik, işitilebilir ses.

ABSTRACT: The photoacoustic effect was first developed in 1880 by Alexander Graham Bell whose device that transmits speech by chopping sunlight through a mirror to the selenium cell and directing it to a conventional telephone receiver as a result of the light-matter interaction. The producing of audible sound by light is possible with a photoacoustic effect which is an acoustic effect of light-matter interaction of molecules in solid, liquid, gas and condensed phases. Molecular infrared (IR) spectroscopy occurs when the atomic bonds of molecule is absorbed by the light which is emitted an irradiating in the IR region of the electromagnetic spectrum. Whereas a molecule and IR laser beam interact with each other, the atomic bonds of molecule vibrate, depends on incident light. When between the atomic bonds frequency of the molecule is resonated with the frequency of the incident light, the acoustic sound can re-produced by the molecule. In the study, the potential molecules that can produce photoacoustic signals when using a laser in the IR region and the acoustic pressure values that can be produced by the modulated laser light exposure are investigated. The molecules that can produce photoacoustic effects have been studied in the context of the potential applications.

Key words: photonics, photoacoustics, photophysics, audible sound.

GİRİŞ

Foto-akustik (PA) veya Opto-akustik terimleri genellikle, modüle edilmiş optik ışınım ile akustik dalgaların oluşması olarak ifade edilir. Tarihin ilk kâbulüne değinin amacı olarak, *Alexander Graham Bell* tarafından 1880 yılında güneş ışığının modülasyonu ile konuşma sesinin iletilmesi, ışınım yoluyla "ses getirme" ("transmission") bir etki ortaya çıkmış, PA etki olarak adlandırılmıştır (Bell, A.G., 1880a). Kutulardaki PA etkisi, ışınım soğutulmasına bağlı olduğu ve akustik sinyaldir. Işınımın, ışınım hücresi içindeki malzeme tarafından ne kadar güçlü bir şekilde soğutulduğunun bir ölçüsü olduğu düşünülmüştür (Bell, A.G., 1880b) (Şekil 1). Tarihi tam olarak 90 yıl sonra çeşitli bilim insanları tarafından ortaya konuşmaya bağlanmıştır (Rosencweig, A. ve Gerber, A., 1976; Pass, A. C., 1986). Bell 1881 yılında "Photophone" ("Photophone") olarak bilenen bu cihazın potansiyel olarak Sesin, ışık yoğunluğu modülasyonu sayesinde iletilmesinin niteliğini bildirmiş; katı, sıvı veya gaz halindeki maddelerin iletme özelliği ışık soğutması sonucunda, madde tarafından sesin üretilmesini ortaya koymuştur.

B. D. Muşdal & M. Kurt, Design of Em-Artifact-Free Earphone Based on The Photoacoustic Effect, *Photoacoustics*, 2021, 2213-5979, 21, 100214. doi: 10.1016/J.Pacs.2020.100214

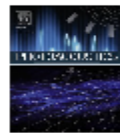
Photoacoustics 21 (2021) 100214



Contents lists available at ScienceDirect

Photoacoustics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/pacs



Design of EM-artifact-free earphone based on the photoacoustic effect

Bengi Derya Musdal^{a,*}, Mustafa Kurt^b

^a Department of Physics, Çoruhkale Onaziç Mart University,

^b Department of Electronic Engineering, Çoruhkale Onaziç Mart University,

ARTICLE INFO

Keywords:
Photoacoustic effect
Molecular infrared modes
Audible sound
Photonics

ABSTRACT

Electromagnetic interactions between conventional earphones and the electroencephalography (EEG) electrodes used for analyzing brain waves give rise to efficiency problems in neurophysiological studies of auditory perception. Currently used speakers and headphones are electromagnetic devices based on strong magnets. In spite of intensive use of such systems, there has been no effective way to eliminate the electromagnetic artifacts produced by such audio transmitting devices to date. The ability for transferring audible sounds without the use of electromagnetic devices that can affect the EEG signal would open up many innovative possibilities in Audio Technologies. Audible sound transfer over long distances is possible by the photoacoustic effect. In such studies, the modulated optical signal can be converted into an audible signal arising from the absorption of the light energy of relevant molecules. In this study, we propose an earphone based on the photoacoustic effect, and calculated the dB SPL (Sound Pressure Level) values for a spherical cell filled with olive pomace. By the use of the method of Diebold and Westervelt, we theoretically calculated the sound pressure levels for our cell and determined a 60 dB SPL at a sound frequency of 1000 Hz for our preliminary earphone design.

1. Introduction

Almost all of the commercially available audio transducers, such as earphones or headphones, are based on the working principle of moving coils to produce magnetic fields up to 4.5 Tm (BI product) [1]. In auditory-neuro perceptual experiments, electroencephalography (EEG) is used for measuring the electro-activity of the human brain. One can thus see what happens in the brain when people (for example musicians or sound engineers) hear and perceive different musical sounds. When earphones and EEG are used simultaneously, earphones cause electromagnetic (EM) artifacts on the EEG electrodes corresponding the EEG signals, and such artifacts are often misinterpreted by the neurophysiologist. The main working principle of EEG is to sense EM waves produced by currents between neurons. EM waves emerging from neurons are very weak, so that they can be missing in the EM noise coming from external devices (e.g. from earphones or cables) [2–4]. Some types of earphones (e.g. piezoelectric earphones, electrostatic earphones, electromagnetic shelled earphones or normal earphones used with acoustic tubes) interact less with EEG electrodes, but can be very expensive or not efficient enough for EEG applications [3,4]. One example of such inefficient earphones in EEG applications are normal earphones used in conjunction with acoustic tubes. In this case there is a time delay

between the sound signal and the brain response because of the path difference in the tube [5]. This time delay often leads to a misinterpretation of the EEG signal.

In contrast to the availability of EM interaction-free earphones with high fidelity, no headphones based on the photoacoustic (PA) working principle have been reported. EM-artifact free earphones can be constructed from the principles of the PA effect and “PA communications” [6]. The motivation of this work is to develop an audio system that does not interfere with EEG electrodes, and to develop earphones adaptable to EEG and at the same time avoid interaction with its electrodes. Such a development should be applicable to other platforms such as Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI). In this manuscript we present theoretical calculations and a preliminary conceptual design of a PA earphone in this context.

2. Theory

The generation of acoustic waves by modulated optical radiation is usually referred to as PA or optoacoustics (OA) [6]. Alexander Graham Bell’s Photophone was the starting point of PA and photothermal (PT) phenomena [7]. Bell transmitted sound waves by collimating sunlight, but his achievement was too limited owing to insufficient technical

* Corresponding author.

E-mail addresses: [redacted] (B.D. Musdal), [redacted] (M. Kurt).

<https://doi.org/10.1016/j.pacs.2020.100214>

Received 11 November 2019; Received in revised form 9 July 2020; Accepted 11 October 2020

Available online 9 December 2020

2213-5979/© 2020 The Authors. Published by Elsevier GmbH. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).