



**ENDÜSTRİYEL ORTAMLARDA ULTRASONİK
SIZINTILARIN KONUM TESPİTİ**

Ergün YİĞİT



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİYEL ORTAMLARDA ULTRASONİK SIZINTILARIN KONUM
TESPİTİ**

Ergün YİĞİT
ORCID ID: 0000-0003-3288-3963

Doç. Dr. Figen ERTAŞ
ORCID ID: 0000-0003-4868-8425
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ENDÜSTRİYEL ORTAMLARDA ULTRASONİK SIZINTILARIN KONUM TESPİTİ

Ergün YİĞİT

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Figen ERTAŞ

Enerji verimliliği diğer alanlarda olduğu gibi enerji tüketiminin olduğu endüstriyel tesislerde de yüksek önem teşkil etmektedir. Enerji verimliliğinin artırılması üretim maliyetinin düşmesi ve çevre kirliliğinin azalmasına fayda sağlar. Endüstriyel tesislerde yoğunlukla tercih edilen basınçlı hava sistemlerinde oluşan kaçakların sistem verimine etkisi göz ardı edilemeyecek kadar yüksektir. Basınçlı hava sistemlerindeki kaçaklar ultrasonik frekanslarda akustik sızıntılar oluşturmaktadır. Günümüzde ultrasonik sızıntılar basit taşınabilir cihazlar veya akustik kameralarla yapılan periyodik bakım ile yerinde tespit edilmektedir. Bu tez çalışmasında basınçlı hava sistemlerinde oluşan sızıntıların hızlıca tespit edilmesi ve sorunun giderilmesiyle bakım maliyetleri, enerji ve iş gücü kaybının düşürülmesine yardımcı olacak bir sistemin tasarımına odaklanılmıştır.

Tez çalışmasında merkezinde bir kamera bulunan farklı geometrilerde dörtlü mikrofon dizileri tasarlanarak üretilmiştir. Mikrofonlardan algılanan ses sinyalleri, tasarlanan harici ses kartı ile USB portu üzerinden bilgisayara aktarılarak veri seti oluşturulmuştur. Böylece kameradan görüntülenen sızıntı kaynağının konumu ile kullanılan algorithmada hesaplanan sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çalışmada, benzetimi yapılan ultrasonik sızıntının konum tespiti ve görüntü üzerinde işaretlenmesinde MATLAB 2023b programı ve kütüphaneleri kullanılmıştır. Oluşturulan sistemin gerçek endüstriyel ortamlarda veya daha farklı ortamlarda ne gibi geliştirmelerle daha başarılı sonuç verebileceği çalışmanın tartışma konusudur.

Anahtar Kelimeler: Ultrasonik ses kaçağı, Ses kaynağı konumlama, akustik kamera, akustik görüntüleme, sinyal dizisi işleme, MEMS, mikrofon dizisi

2024, ix + 42 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

LOCALISATION OF ULTRASONIC LEAKAGE IN INDUSTRIAL ENVIRONMENTS

Ergün YİĞİT

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronics Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Figen ERTAŞ

Energy efficiency is of great importance in industrial facilities where energy consumption occurs, as in other areas. Increasing energy efficiency helps reduce production costs and environmental pollution. The impact of leaks on the system efficiency in compressed air systems, which are mostly preferred in industrial facilities, is too high to be ignored. Leaks in compressed air systems create acoustic leaks at ultrasonic frequencies. Nowadays, ultrasonic leaks are detected on-site with periodic maintenance using simple portable devices or acoustic cameras. This thesis study focuses on the design of a system that will help quickly detect and eliminate leaks in compressed air systems and reduce maintenance costs, energy and labor loss.

In the thesis study, quadruple microphone arrays with different geometries with a camera in the center were designed and produced. The data set was created by transferring the sound signals detected from the microphones to the computer via the USB port with the designed external sound card. Thus, the location of the leak source viewed from the camera was compared with the results calculated in the algorithm used.

In the study, MATLAB 2023b program and libraries were used to locate the simulated ultrasonic leak and mark it on the image. The subject of discussion of the study is what kind of improvements can make the created system more successful in real industrial environments or in different environments.

Key words: Ultrasonic sound leakage, Sound Source localization, Acoustic Camera, Acoustic imaging, Array signal processing, MEMS, Microphones array

2024, ix + 42 pages.

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu tezin fikir aşamasında ve çalışma süresi boyunca karşılaştığım her sorunda bana bilgileriyle yol gösteren ve çalışmamda büyük emeği bulunan, danışmanım Sayın Doç. Dr. Figen ERTAŞ'a, Prof. Dr. Tuncay ERTAŞ'a ve değerli hocam Sayın Y. Müh. Bayezit DİRİM'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde malzeme ve donanım temini ile ilgili sorunlarının çözülmesine yardımcı olan TARGE Endüstriyel sistemler ve NEKA Elektronik'e destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Mühendislik ve yükseköğrenim kararımın en başından beri sevgileri ve manevi desteği ile her zaman yanımda hissettiğim büyüğüm Rahim UYSAL'a ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ergün YİĞİT
.../.../2024

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Akustik kameralar ve kullanım alanları.....	4
2.2. Akustik görüntülemedeki göz önünde bulundurulacak etkenler.....	5
2.2.1. Dış ortam gürültüleri.....	5
2.2.2. Filtreleme.....	6
2.2.3. Doppler etkisi.....	7
2.2.3. Sesin harici yüzeylerle etkileşimi.....	7
2.2.3. Alıcı ve hedef ses kaynağı düzlemlerinde kamera lensinin etkileri.....	8
2.3. Karşılıklı iki düzlemin uzayı.....	9
2.4. Ses kaynağı konum tespitinde kullanılan başlıca algoritmalar.....	10
2.4.1. Varış zamanı TOA ve Varış Zamanı Farkı TDOA.....	10
2.4.2. MUSIC algoritması (Çoklu sinyal sınıflandırması).....	11
2.4.3. GCC ve PHAT (Genelleştirilmiş çapraz korelasyon - Faz dönüşümü).....	12
2.4.4. Beamforming (Hüzmeleme).....	12
2.4.5. Kalman Filtreleme.....	13
2.4.6. SRP (Yönlendirilmiş Güç Cevabı) yöntemleri.....	13
2.4.7. Triangulation (Üçgenleme).....	14
2.5. Akustik algılayıcıların (mikrofon) türleri.....	14
2.5.1. Dinamik mikrofonlar.....	15
2.5.2. Ribbon mikrofonlar.....	15
2.5.3. Kristal (Piezo) mikrofonlar.....	15
2.5.4. Karbon mikrofonlar.....	16
2.5.5. Kapasitif mikrofonlar.....	16
2.6. Alıcıların (mikrofon) yerleşimi.....	16
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	18
3. 1. Mikrofon seçimi.....	18
3. 2. Analog – sayısal çevirici seçimi.....	20
3.3. Mikrokontrolcü (MCU) ve USB Ara yüzü.....	22
3.3. Kullanılan mikrofon dizisi için baskılı devre tasarımı.....	23
3.5. Ses kaynağının benzetiminin oluşturulması.....	26
3.6. Kamera açılarının bulunması.....	28
3.7. Kamera odak ve lens kalibrasyonunun yapılması.....	29
3.8. Deney düzeneğinde kullanılan mekanik aparatlar.....	30
3.9. Veri setinin oluşturulması.....	31
3.10. Matlab Uygulaması ile farklı mikrofon dizilerinden alınan verilerin işlenmesi.....	34
4. BULGULAR.....	36
4.1. Farklı Mikrofon diziliminin ve Algoritmaların doğruluk oranına etkisi.....	36
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	37
KAYNAKLAR.....	39

ÖZGEÇMİŞ	42
----------------	----



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
dB	Desibel
θ	Akustik seslerin havada yayılım hızı
γ	Isı oranı
R	Mol başına gaz sabiti
T_0	Ortam sıcaklığı
M	Mol kütesini
P_{sinyal}	Sinyal sinyali gücü
$P_{gürültü}$	Gürültü sinyali gücü
F	Kaynağın gerçek frekansı
V'	Kaynak ile alıcının göreceli hızı
V_{ortam}	Dalgaların ortamda yayılma hızı
V_d	Doppler hızı
Δt	İki mikrofon sinyali arasındaki zaman farkı
d	Mikrofonlar arasındaki mesafe
θ	Sinyalin varış açısı
N_p	Pencere örnek sayısı
f_s	Örnekleme frekansı
T_p	Pencere uzunluğu

Kısaltmalar	Açıklama
2D	Two Dimensional
3D	Three Dimensional
ADC	Analog-Digital converter
ASL	Acoustic Source Localization
CC	Cross-Correlation
DFT	Discrete Fourier Transform
DMIPS	Dhrystone Million Instruction Per Second
DOA	Direction Of Arrival
DS	Delay & Sum
ESPRIT	Estimation of Signal Parameters
FPGA	Field Programmable Gate Arrays
FPS	Frame per second
GCC	Generalized Cross-Correlation
HP	High Pass (yüksek geçiren)
I2S	Inter-IC Sound
IC	Integrated Circuit
L	Length
LP	Low Pass (alçak geçiren)
MCU	Micro Controller Unit
MEMS	Mikro Elektro Mekanik Sistemler
MUSIC	Multiple Signal Classification

OTG	On The Go
PHAT	Phase Transform
PLA	Polilaktik Asit
PLL	Phase Locked Loop
PSD	Power Spectral Density
Px	Pixel
RC	Resistor Capacitor (Direnç Kondansatör)
RF	Radyo frekansı
RMS	Root Mean Square
SNR	Signal to Noise Ratio
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
SRP	Steered Response Power
Tan	Tanjant fonksiyonu
TDE	Time Delay Estimation
TDOA	Time Difference Of Arrival
TWh	Terawatt hour
USB	Universal Serial Bus

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Farklı sızıntı tipi ve açılara göre gürültünün frekansa domeninde spektral güç yoğunluğu (PSD) (sol: D=0,25 mm, L=12,7 mm; sağ: D=0,58 mm, L =38,1 mm) (Moeck, 2016).....	3
Şekil 2.2. Akustik kamera çeşitleri A- Fluke ii910 (Anonim, 2023b) ,B-Flir SI124(Anonim, 2023c), C- SoundCam-2.0 (Anonim, 2023d) D-SONASCREEN® (Anonim, 2023e)	4
Şekil 2.3. Kamera lensinde oluşan görüntü bozulmaları A- Bozulma olmayan görüntü,B- Varil bozulması (Barrel distortion), C- iğne yastığı bozulması (Pincushion distortion) (OPSAHL, 2000).....	8
Şekil 2.4. Alıcı ve kaynak düzleminin hesaplanması (Meyer & Döbler, 2006)	9
Şekil 2.5. 2D ve 3D konumlama geometrileri (Kunin vd., 2011).....	17
Şekil 3.1. IMP23ABSU ve Steval-mic007v1 görünümü ve mikrofon bağlantı yapısı (STMicroelectronics, 2020a, 2020b)	19
Şekil 3.2. 1 kHz e göre normalize edilmiş hassasiyet eğrisi (STMicroelectronics, 2020a).....	19
Şekil 3.3. AD1974 fonksiyonel blok yapısı (Analog Devices inc., 2013).....	21
Şekil 3.4. X-NUCLEO-AMICAM1 devre kartı ve blok yapısı (STMicroelectronics, 2020c).....	22
Şekil 3.5. Düzenli dağılımlı mikrofon dizisi	23
Şekil 3.6. Düzensiz dağılımlı mikrofon dizisi	24
Şekil 3.7. Lineer düzensiz dağılımlı mikrofon dizisi.....	25
Şekil 3.8. Deneylerde kullanılan Kamera ve mikrofon düzeneği	26
Şekil 3.9. Hava kaçağı benzetim düzeneği	26
Şekil 3.10. Basıncılı hava kaçağından alınan ölçümler	27
Şekil 3.11. Sızıntı kaynağı benzetim ölçümleri	27
Şekil 3.12. Kameranın karşı düzlem ölçümü ve bölgelerin numaralandırılması	28
Şekil 3.13. Kamera açısının hesaplanması.....	29
Şekil 3.14. Kamera kalibrasyonunun yapılması	30
Şekil 3.15. 3D yazıcı ile baskısı yapılan mekanik aparatlar	31
Şekil 3.16. Ölçekli kamera görüş alanı üzerinde test noktalarının görünüşü	32
Şekil 3.17. Dört kanallı ses sinyalinin kaydedilmesi.	33
Şekil 3.18. Kullanılan sistemin genel blok diyagramı	34

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1.	Gürültülerin renk adlarına göre frekans karakteristiği	22
Çizelge 3.1.	Veri seti isimlendirme ve görüntü alanı merkez koordinatları	49
Çizelge 4.1.	Düzenli dağılımlı mikrofon dizisi ile elde edilen deney sonuçları...	53
Çizelge 4.2.	Düzensiz dağılımlı mikrofon dizisi ile elde edilen deney sonuçları.	53



1. GİRİŞ

Endüstriyel sistemlerde ve daha birçok alanda sıkıştırılmış hava enerjisinin kullanımı oldukça yaygındır. Basınçlı hava enerjisi üretim ve kontrol kolaylığı, saklanabilir olması, taşınabilir ve basit şekilde aktarılabilir olması gibi nedenlerle yoğunlukla tercih sebebi olsa da bir kısım dezavantajları bulunmaktadır. Avrupa Birliği'nde basınçlı hava sistemlerinde harcanan enerji, endüstride kullanılmakta olan elektrik enerjisinin yaklaşık %10 seviyesinde olmasına rağmen bu değer yılda 80 TWh'den fazladır. Birçok avantajına rağmen basınçlı hava sistemlerinin enerji verimliliği düşüktür (Radgen & Blaustein, 2001).

Endüstride kullanılan basınçlı hava sistemlerinin (pnömatik otomasyon sistemleri, kompresörler, hava tankları, pnömatik eyleyiciler) verimliliğinin artırılmasına yönelik sistemsel birçok çalışma bulunmaktadır. Kullanımda veya bekletilen sistemlerde oluşan küçük hava sızıntıların zor tespit edilebilir olması işgücü ve zaman kaybının yanı sıra çok yüksek enerji ve bakım maliyetlerine sebep olur. Sızıntılar nedeniyle bazen kompresör çıkışının %20-30'u boşa harcanır. Periyodik kontrol ve bakımı bulunmayan bir fabrikada toplam basınçlı hava üretim kapasitesinin yaklaşık %20'sine eşit bir sızıntı oranı olacaktır. Sızıntı tespiti ve onarımı, sızıntıları kompresör çıkışının %10'undan daha aza indirebilir (Marshall vd., 1998).

Endüstriyel kullanımda tercih edilen basınç seviyelerinde oluşan sızıntılar insan kulağının duyma aralığında ve üzerinde akustik seslere neden olur. Oluşan ses sızıntısının olduğu delik genişliği derinliği, geometrisine bağlı ve kırınım, yansıma, iletim ve girişimden etkilenir. Akustik kaçak bulma cihazları bu sızıntıların yerini tespit edebilir. Bununla birlikte, boyutlarının ölçülmesi (enerji kaybı ve onarımın önceliği açısından) hayati bir görev olmaya devam etmektedir. Akustik teori açısından bakıldığında, akışkan parametrelerinin niceliği yalnızca geniş bir frekans bandının (20 kHz ila 100 kHz) değerlendirilmesiyle elde edilebilir (Holstein vd., 2016).

Bu çalışma, endüstriyel ortamlarda kullanılmak üzere herhangi bir bilgisayarda çalışabilen basit bir USB kamera ve etrafında oluşturulan dört adet (piyasadaki

benzerlerinden daha az) mikrofon kullanılarak özel bir harici ses kartı oluşturulmuştur. Basınçlı hava tankı ile 8 bar basınçta oluşturulan sızıntılar incelenmiş yakın frekanslarda akustik sinyal üretilerek sızıntı kaynağının benzetimi yapılmıştır. Kurulan donanım kullanılarak deneysel çalışma sonucu benzetimi yapılan akustik kaçak kaynağından bilinen konumlardan veriler toplanmış ve bir veri seti oluşturulmuştur. Kaydedilen veri seti MATLAB R2023b programı kullanılarak seçilen metotlar ve oluşturulan farklı geometrilerdeki mikrofon dizilerinden hangilerinin daha başarılı olduğu incelenmiştir.

Basınçlı hava sistemlerinin bulunduğu ortamların periyodik veya sürekli izlenmesine olanak sağlayacak düşük maliyetli, sabit veya taşınabilir sistemlerin ne şekilde mümkün olabileceği tezin tartışma konularındandır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

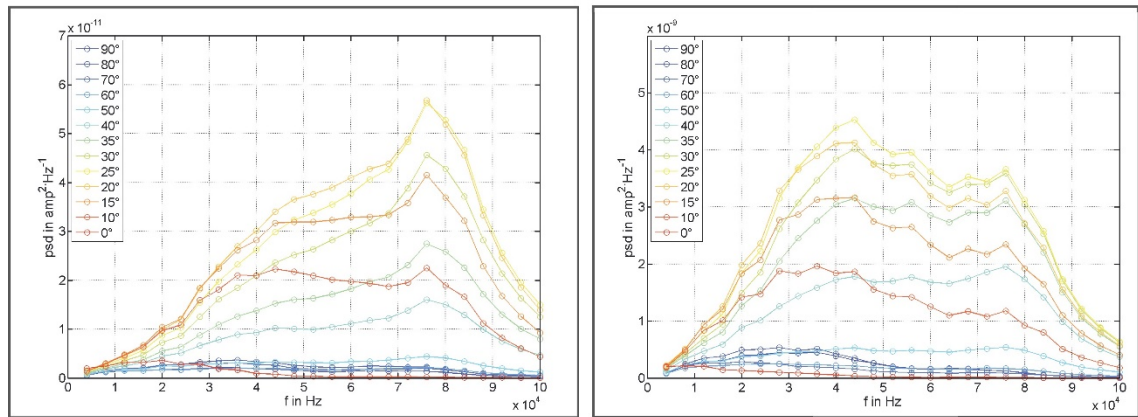
Akustik dalgaların kaynaktan alıcının bulunduğu noktaya ulaşması bir gecikme ile gerçekleşecektir. Çalışmanın temelinde bu gecikmenin farklı noktalarda bulunan birden çok alıcıya ulaşmasında oluşacak gecikmeye dayanmaktadır. Akustik seslerin havada yayılım hızı formülü ve değeri denklem 2.1 de verilmiştir;

$$\vartheta = \sqrt{\gamma RT_0 / M}$$

$$\gamma = 1.4, \quad R = 8.3 \times 10^3 \frac{\text{erg}}{^\circ\text{K}}, \quad M = 29 \text{ g}, \quad T_0 = 273 \text{ } ^\circ\text{K} \quad (2.1)$$

$$\Rightarrow \vartheta = 330.7 \text{ m/s}$$

Olarak hesaplanmaktadır. Burada γ ısı oranı, R Mol başına gaz sabiti, T_0 ortam sıcaklığı ve M Mol kütesini belirlemektedir. Akustik dalgaların yayılım hızı denklemde görüldüğü gibi sinyalin frekansından bağımsız olmasına rağmen mikrofonların çalışma frekansı ve örnekleme frekansının belirlenmesi için algılanması hedeflenen sızıntının oluşturduğu ses sinyalinin frekans karakterinin bilinmesi gerekmektedir. Son yıllarda kullanılmakta olan ultrasonik sızıntı test cihazları yaklaşık 40kHz civarında dar bir frekans bandında çalışmaktadır. Şekil 2.1’de iki farklı dairesel sızıntının verileri ve bunların farklı ölçüm açıları ve çaplarındaki değişimleri verilmiştir.



Şekil 2.1. Farklı sızıntı tipi ve açılara göre gürültünün frekansa domeninde spektral güç yoğunluğu (PSD) (sol: D=0,25 mm, L=12,7 mm; sağ: D=0,58 mm, L=38,1 mm) (Moeck, 2016)

2.1. Akustik kameralar ve kullanım alanları

Günümüzde birbirinden farklı amaçlara çözüm sağlamak için ve çoklu algılayıcılar kullanılan sistemler kullanılmaktadır. Geometrik, boyut ve yapı olarak birbirinden farklı olsa da algılayıcılardan oluşan diziler, bazen doğal bazen yapay yapay oluşturulmuş dalga alanını uzaysal haritalamaktadır. Petrol endüstrisinde yeraltı kaynaklarının tespit edilmesi için büyük alanlara yerleştirilen jeofon dizileri zemine uygulanan darbe ile tetiklenerek yansıyan dalgaları kaydetmekte kullanıyor. Benzer şekilde sonar uygulamaları hidrofon dizilerini kullanır. Radar antenleri, elektromanyetik dalgaları hem ileten hem de alan birçok yayılan elemandan oluşur. Akustik uygulamalarda ise mikrofon dizileri kullanılır (D H. Johnson & D.E. Dudgeon, 1993). Son yıllarda araç ve cep telefonlarında aktif gürültü sönümleme, konuşma tanıma, konuşmacı tanıma, dil tanıma gibi ses sinyali işleme konularında da mikrofon dizileri ile yapılan çalışmalar sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Akustik uygulamalar içinde ses kaynağının konum tespiti bunlardan biridir.

Akustik kameralar çok yaygınlaşmış sistemlerden olmasa bile basınçlı sistemlerde sızıntı kaynaklı oluşan ultrasonik seslerin tespit edilmesinde yoğunlukla kullanılmaktadır. Şekil 2.2’de bunlardan bazılarının görselleri verilmiştir.



Şekil 2.2. Akustik kamera çeşitleri A- Fluke ii910 (Anonim, 2023b) ,B-Flir SI124(Anonim, 2023c), C- SoundCam-2.0 (Anonim, 2023d) D-SONASCREEN® (Anonim, 2023e)

2.2. Akustik görüntülemelemedeki göz önünde bulundurulacak etkenler

Bu bölümde yapılmak istenen akustik kamera çalışmasının sonucuna etki etmesi öngörülen konular incelenmiş ve bu etkilerin azaltılması veya tamamen ortadan kaldırılması için gerekli çözümler önerilmiştir.

2.2.1. Dış ortam gürültüleri

Gürültü bir sistemdeki istenmeyen işaretlerdir. Gürültü dikkat edilmesi gereken önemli bir faktördür. Çünkü sistemin performansını sınırlayan en önemli faktördür. Shot gürültü, ısı gürültü, kontak gürültü, burst gürültü ve avalans gürültü vb. olmak üzere gürültü çeşitleri vardır. Çok sayıda gürültü çeşidi olmakla birlikte elektronik devrelerde genellikle toplam gürültüden bahsedilir. Toplam gürültüyü tanımlamak için genellikle renkler kullanılır. Renkler gürültünün frekansla değişimini gösterir. Çizelge 2.1’de frekansa bağlı olarak renklerle adlandırılması gösterilmiştir. Gürültüleri bu şekilde kodlamak bazı ihmaller yaparak oluşturulur. Örneğin beyaz gürültü frekanstan bağımsız olmakla birlikte yüksek frekanslarda pembemsi renk alır.

Çizelge 2.1. Gürültülerin renk adlarına göre frekans karakteristiği

Renk	Frekans ile Değişimi
Mor	f^2
Mavi	f
Beyaz	1
Pembe	$1/f$
Kırmızı/ Kahve	$1/f^2$

Beyaz gürültü frekanstan bağımsızdır. Tüm frekanslarda aynı şiddette vardır. Shot gürültü ve ısı gürültünün frekansa bağımlılığı hemen hemen yoktur. Dolayısıyla bu gürültüler beyaz gürültü olarak adlandırılabilirler. Pembe gürültüde, gürültünün şiddeti frekansla ters orantılıdır. Frekans arttıkça şiddeti logaritmik olarak azalır. Kontak gürültüsü pembe gürültüye bir örnektir.

Bazı sistemlerde gürültüyü tamamen yok etmek zor ve maliyetli olabilir. Bu durumda dikkat edilmesi gereken gürültünün sistemin sinyaline göre büyüklüğüdür. Denklem 2.2’de verilen bu orana “Sinyal Gürültü Oranı (Signal Noise Ratio – SNR)” denir. Başka bir ifade ile sinyal gürültü oranı, belirlenen bant genişliği içinde dB cinsinden işaret seviyesinin gürültü seviyesinden farkıdır.

$$SNR = \left(\frac{P_{sinyal}}{P_{gürültü}} \right)_{dB} \quad (2.2)$$

2.2.2. Filtreleme

Filtreleme, sistemdeki bir sinyalin frekans bileşenlerinin genliklerini değiştirmek veya frekans bileşenlerinin bazılarını tamamen yok etmek istenildiğinde kullanılır. Frekans bileşenlerinin genliklerini değiştirme durumu ses uygulamalarında kullanılır. Dinleyicinin alçak frekans enerjisini (bas) ve yüksek frekans enerjisini (tiz) istenilen miktarda değiştirmesine olanak sağlar. Frekans seçici filtreleme, bir frekans bandını yaklaşık olarak veya tam olarak seçmek ve diğer frekansları yok etmek üzere tasarlanmış filtreleme durumudur. Eğer bir ses kaydındaki gürültü kayıttaki ses veya müzikten daha yüksek bir frekans bandında ise, frekans seçici filtre ile yok edilebilir (OPPENHEIM vd., 1996).

Filtre devreleri işaretin genliğine verdiği cevaplara göre alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren ve bant durduran olmak üzere dört gruba ayrılır. Bu dört filtre en temel yöntemlerdir. Alçak geçiren filtre, kesim frekansının altındaki frekansları geçiren filtre türüdür. Yüksek geçiren filtre ise alçak geçiren filtrenin tam tersidir. Kesim frekansının altındaki frekansları zayıflatırken, üstündeki frekansları aynı seviyede iletir. Bant geçiren filtre ise belirli bir frekans aralığını aynı seviyede iletirken bunların dışındaki frekanslarda zayıflatır.

2.2.3. Doppler etkisi

Christian Johann Doppler'in soyadı verilen bir göreceli algılama etkisidir. Kaynak veya algılayıcı hareket halinde olduğu durumda, algılayıcıda ölçülecek kaynaktan yayılan dalganın frekansı, kaynak tarafından üretilenden farklıdır. Bu fenomen, hem akustik hem de ışık dalgaları için on dokuzuncu yüzyılın başlarından beri bilinmektedir. Doppler etkisi akustik ve elektromanyetik dalgalarda farklılık gösterir: Akustikte, yayılma hızı hareketli referans çerçevelerinde farklılık gösterirken elektromanyetikte yayılma hızı sabit kalır (D H. Johnson & D.E. Dudgeon, 1993).

Doppler etkisi denklem 2.3de gösterildiği gibi;

$$V_d = F \left(1 \pm \frac{V'}{V_{ortam}} \right) \quad (2.3)$$

Olarak tanımlanır. Burada F kaynağın gerçek frekansı, V' kaynak ile alıcının göreceli hızı, V_{ortam} dalgaların ortamda yayılma hızını gösterir.

Doppler etkisi kaynak ile alıcı arasındaki hareket yönüne göre değişebilir. Burada üç farklı şekilde senaryo düşünülebilir. Kaynak sabit iken alıcının hareketli olması, alıcı sabit iken kaynağın hareketli olması ve her ikisinin aynı hızlarda olması şartıyla hareketli olması durumlarıdır. Kaynak ile alıcının hızları da bir etmendir. Kaynak ile alıcı arası mesafe azaldığında kaynaktan çıkan ses sinyali daha kısa sürede alıcıya ulaşacağı için periyot ve dalga boyu daha düşük olacaktır. Periyotun düşük olması frekansın yüksek olması demektir. Bu sebeple kaynak ile alıcı yaklaşırken ses tiz duyulurken, uzaklaşıyorken pes duyulacaktır. Yapılan tez çalışmasında kaynak veya algılayıcı hareket halinde olmayacağı için bu etki göz ardı edilebilir fakat taşınabilir bir sistem geliştirilmesi durumunda veya hareketli bir bant üzerinde ilerleyen basınçlı hava tanklarının sızıntı tespiti gibi uygulamalarda bu etki göz önünde bulundurulmalıdır.

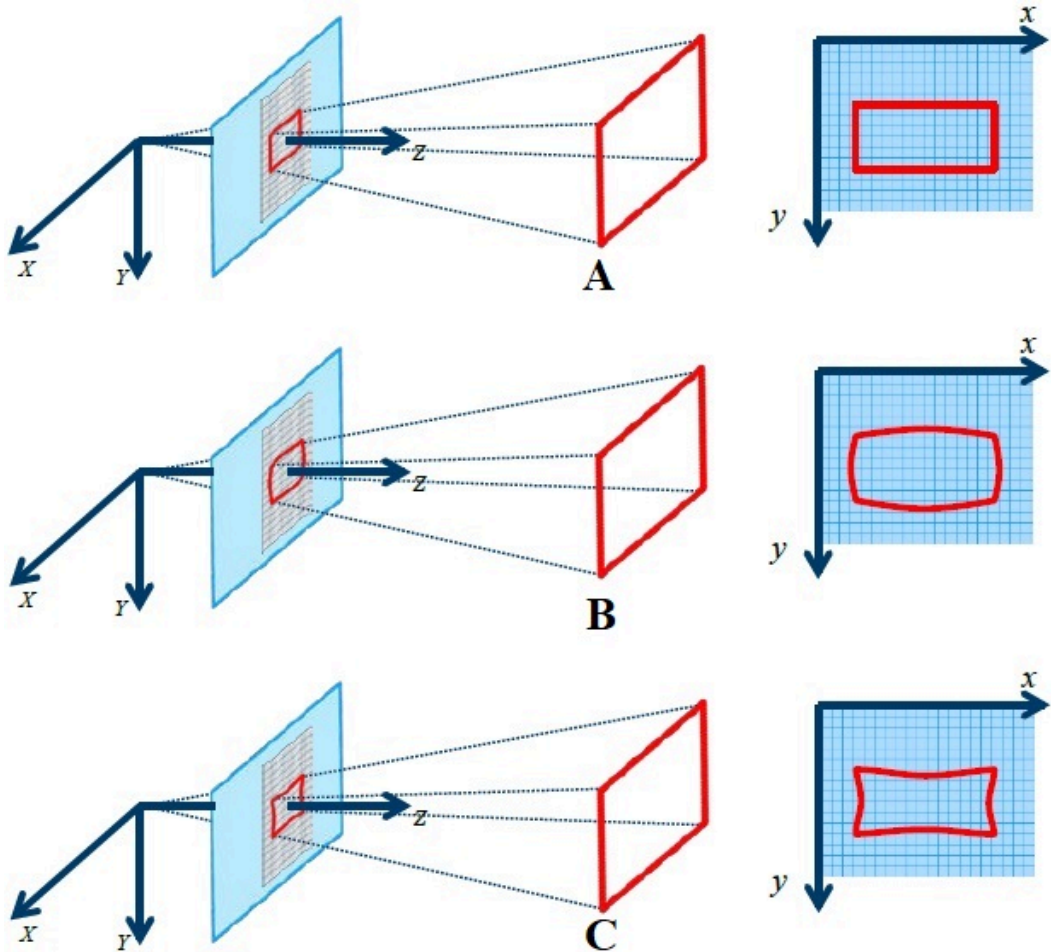
2.2.3. Sesin harici yüzeylerle etkileşimi

Yankı veya eko akustik bir ses kaynağından çıkan sinyalin belirli bir süre sonra tekrardan duyulması, yansımasıdır. Kapalı ortamdaki veya yankı oluşturan ortamın uzunluğu, ses sinyalinin hızı ve sesin kaynaktan çıktıktan sonra tekrar duyulması arasında geçen sürenin çarpımının yarısıdır. Reverb ise kapalı ortamda ses kaynağının kapatıldıktan sonra çoklu yansılardan dolayı sesin bir süre daha duyulmasıdır.

2.2.3. Alıcı ve hedef ses kaynağı düzlemlerinde kamera lensinin etkileri

Çalışmada kullanılacak USB kameranın lens açısının karşı düzlemde görebildiği alan ile mikrofonların algılayabileceği alan birbirinden farklıdır. Bunun için kamera hedeflenen kaynak uzaklığına(1.5metre) konumlandırılarak ayarlandıktan sonra karşıt bir düzlem ile ölçülerek tespit edilmesi gerekmektedir. Görüntü alanının dışında kalan ses kaynaklarının tespit edilmesi için kullanıcı uyarılarak kameranın ses kaynağı yönüne hareket ettirilmesi gerekmektedir.

Bir diğer konu ise görsel konumlandırma hatalarıdır. Kamera lensine yansıyan görüntü kamera içindeki dikdörtgen şeklindeki alıcılara aktarırken bir bazı geometrik bozulmalar oluşmaktadır. Bu bozulma üretilmiş kameranın lensine göre değişkenlik göstermektedir. Şekil(2.3)'te bu bozulma türleri verilmiştir.

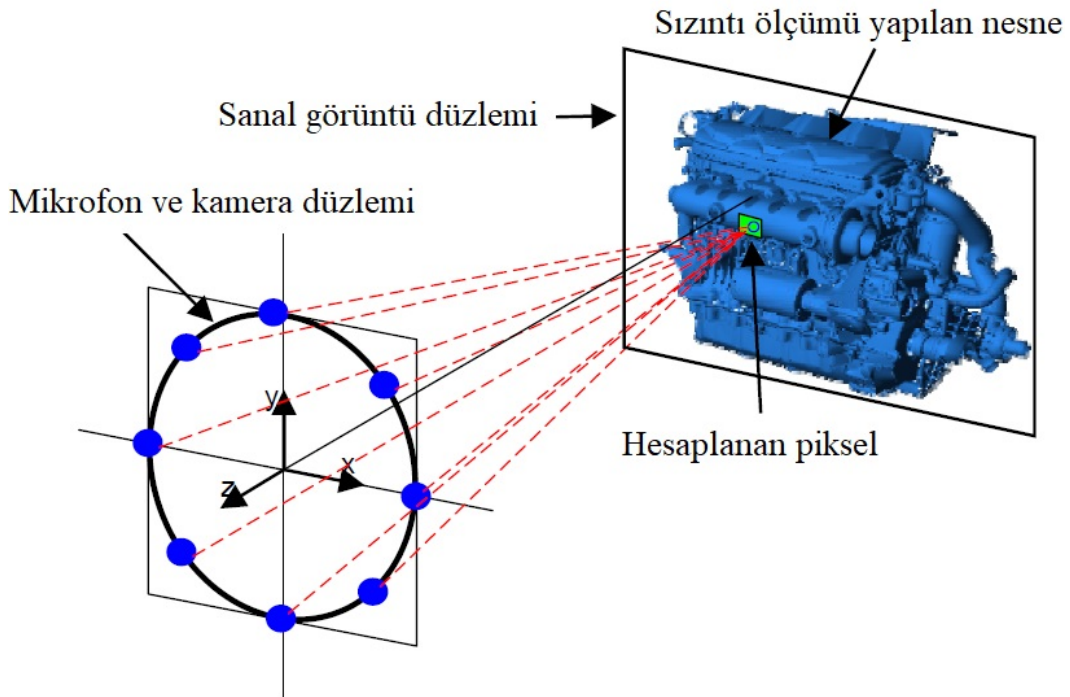


Şekil 2.3. Kamera lensinde oluşan görüntü bozulmaları A- Bozulma olmayan görüntü, B- Varil bozulması (Barrel distortion), C- iğne yastığı bozulması (Pincushion distortion) (OPSAHL, 2000)

Şekil 2.3'te gösterilen bu bozulmalar dış kısımlarında oluşan bu bozulmaların göz önünde bulundurulmaması hata payını büyük ölçüde arttıracaktır. Bu nedenle görüntüde nesne konumun önemli olduğu çalışmalarda kamera lensi bir yazılım algoritması kullanılarak düzeltilmeli ve işaretlemeler bu düzeltilmeye göre hesaplanmalıdır.

2.3. Karşılıklı iki düzlemin uzayı

Çalışmada kameradan aktarılan görüntü, ses kaynağının üzerinde bulunduğu bir düzlem olarak kabullenildiğinde (sızıntı kaynağı düzlemi), bu düzleme paralel kameranın merkezde ve çevresinde konumlanmış mikrofonların bulunduğu (alıcı düzlem) ikinci bir düzlem oluşur. Alıcı düzlem ile sızıntı kaynağı arasındaki dikey mesafe her ne kadar konum tespiti hesaplamaları için gerekli olsa da görüntünün aktarıldığı ekranda kaynağın görüntüsü üzerine işaretlenecek bölge piksel türünden iki boyutlu Kartezyen koordinatlar ile tanımlanmak zorundadır. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi mikrofonlardan alınan ses ölçümlerinin sonucu görüntü panelinde hangi piksel grubuna karşılık geldiği hesaplanmalıdır.



Şekil 2.4. Alıcı ve kaynak düzleminin hesaplanması (Meyer & Döbler, 2006)

Bu işlemin sonucunda elde edilen koordinatlar ardışık yapılacak birden çok hesaplama ile bir piksel bulutu oluşturulup görüntü panelinde grup halinde gösterilebilir veya sızıntının boyutunu belli etmek amaçlı belirli bir eşik aralığında renklendirilebilir.

2.4. Ses kaynağı konum tespitinde kullanılan başlıca algoritmalar

Literatürde ses kaynağı konumun tespitinde kullanılan temel algoritmalar alt başlıklar halinde gruplanarak açıklanmıştır. Uygulamaya göre bu algoritmaların bazıları tek başına yeterli olacağı gibi daha yüksek doğrulukla sonuçlar elde edebilmek için bazı algoritmaların başka algoritmalarla birlikte kullanma ihtiyacı gerekmektedir.

2.4.1. Varış zamanı TOA ve Varış Zamanı Farkı TDOA

Varış zamanı TOA (Time Of Arrival) ve Varış Zamanı Farkı (TDOA) neredeyse diğer tüm algoritmaların temelini oluşturur. Teorik temelleri de bir o kadar basittir. Belirli bir “L” uzaklıktaki kaynaktan çıkan akustik dalgaları, aralarında “L” ye göre çok küçük mesafe bulunan algılayıcılara ulaştığını düşünürsek, algılayıcılara ulaşan dalgaların düzlemsel kabul edilerek, ses dalgalarının algılayıcılara ulaşma süresi ve algılayıcılar arasındaki varış zamanı, farkının ve açıların hesaplanması prensibine dayanır. Denklem 2.4’te ilgili hesaplamalar verilmiştir.

$$\begin{aligned} a) \Delta d &= \vartheta * \Delta t \quad ve \\ b) \theta &= \sin^{-1}(\Delta d/d_{12}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

TDOA (Δt) İki mikrofon sinyali arasındaki zaman farkını, (ϑ) ses hızı, (d) mikrofonlar arasındaki mesafe ve (θ) sinyalin varış açısı olarak tanımlanır. Denklem 2.4 a’da 2D koordinatları bilinen işaretler doğrusal olmayan regresyon ile b’deki verilen hiperbolik formdaki dönüşür, hiperbollerin hesaplanmasından sonra yakınsama noktaları tahmin edilerek kaynağın konumu belirlenebilir (Bhavana vd., 2020).

Varış Zamanı Farkı (TDOA), birçok ses kaynağı konumlama yöntemlerinde merkezi bir rol oynar, mesafeye dayalı Triangulation algoritmasının temelini oluşturur. Gelişmiş bir algoritma olan Beamforming (Hüzmeleme) ve spektral analiz teknikleri GCC-PHAT

(Genelleştirilmiş çapraz korelasyon - Faz dönüşümü), MUSIC (Çoklu sinyal sınıflandırması) gibi algoritmalar tarafından kullanılan konumsal bilgiye katkıda bulunur.

TDOA sonuçlarında ölçülen ikili zaman farkları bazı durumlarda birden çok kaynak konumuna denk gelebilir. TOA ve TDOA yöntemleri, ses kaynağı lokalizasyonu alanında temel nitelikte olup, genellikle gürültülü veya yankılı ortamlarda doğruluğu artırmak için diğer tekniklerle birleştirilir (Menon vd., 2017). Bu seçim uygulama ve ortam gereksinimlerine ve kısıtlamalarına bağlıdır.

2.4.2. MUSIC algoritması (Çoklu sinyal sınıflandırması)

MUSIC (Multiple Signal Classification) algoritması algılayıcı dizisinden gelen sinyallerin uzamsal spektrumunu kullanarak sinyal sınıflandırmada kullanılabilen MUSIC algoritması 1979'da Schmidt ve meslektaşları tarafından önerilmiştir (Stoica & Moses, 2008). Alınan sinyal kovaryans matrisinin öz değer ayrıştırması bu algoritma tarafından gereklidir. Algoritma ilişkisiz gürültüyü varsaydığından, oluşturulan kovaryans matrisi doğası gereği köşegendir. Sinyal ve gürültü alt uzayları matris hesaplamasıyla birbirlerine dik oldukları bulunur. Sonuç olarak bu algoritma, sinyal ve gürültü alt uzaylarını izole etmek için diklik özelliğinden yararlanır (Damoulakis, 2018).

MUSIC algoritma temelde dört adımdan oluşur. İlk olarak Algoritma, mikrofonlardan alınan ses sinyallerinin kovaryans matrisini oluşturur. Bu matris, sinyaller arasındaki ilişkiyi gösterir. Sonra, kovaryans matrisinin özdeğer ayrışımını yaparak sinyallerin temel özelliklerini tespit edilir. Ardından gürültüyle ilgili olan özvektörleri kullanarak uzamsal spektrumu hesaplanır. Son olarak, hesaplanan uzamsal spektrumda tepe noktaları belirlenir. Bu tepe noktaları, ses kaynaklarının geliş yönlerine karşılık gelir.

Hesaplamanın karmaşık olduğu düşünülse de daha basit ve pratik uygulamalarda kullanılması önerilen root-MUSIC isimli ve döngüsel değişmezliği tekniği (Rotational Invariance Technique) kullanılan Sinyal Parametrelerinin Tahmini (Estimation of Signal Parameters) ESPRIT adlı biraz farklı türleri literatürde mevcuttur (Yılmaz, 2016).

2.4.3. GCC ve PHAT (Genelleştirilmiş çapraz korelasyon - Faz dönüşümü)

Çapraz-korelasyon, (Cross correlation) birden çok sinyal arasındaki ilişki ve benzerliğin bulunmasında kullanılan sinyal işleme metodudur. Mikrofonlardan alınan ses sinyalleri üzerinde çapraz-korelasyon kullanarak, farklı mikrofonlardan alınan ses dalgalarının arasındaki zaman farklarını belirlemek mümkündür. Bu, ses kaynağının konumunun hesaplanması amacıyla kullanılabilir. Denklem 2.5 te gösterilen fonksiyonda;

$$(f \star g)(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t + \tau)dt \quad (2.5)$$

$f \star g$ çapraz-korelasyon fonksiyonunu, f * kompleks konjügesi olan f sinyali ile g sinyalinin τ zamanında kaydırılmış versiyonunu göstermektedir. Çapraz-korelasyon, alınan ses sinyalleri arasındaki zaman farklarını belirlemede kullanılır. Doğru τ değerinde denklem 2.5'in sonucu maksimuma ulaşacaktır.

Genelleştirilmiş çapraz korelasyon denklemdeki f sinyali ile g sinyalinin optimal bir filtre ile çarpılması ile alıcılardan gelen sinyaldeki yankılanmayı (reverberation) minimize edilmesiyle elde edilir (Claeson vd., 2015).

Genelleştirilmiş çapraz korelasyon GCC- PHAT(Generalized cross correlation- Phase transform), özellikle mikrofon dizileriyle çalışan ses kaynağı lokalizasyonu uygulamalarında birlikte kullanılan bir tekniktir. PHAT faz dönüşünü, genelleştirilmiş çapraz-korelasyonun frekans bileşenlerini dengeleyerek enerji spektrumunun dengeli olmasını sağlar. Böylece daha doğru ve hassas ses kaynağı konum tahminleri elde edilebilir.

2.4.4. Beamforming (Hüzmeleme)

Beamforming (Hüzmeleme veya hüzme şekillendirme), sinyallerin yönlü işlenmesi için kullanılan bir sinyal işleme tekniğidir ve ses kaynağı lokalizasyonu ve farklı uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Beamforming amacı mikrofonlardan gelen sinyallere uygulanan ağırlıkların ayarlanmasıyla belirli bir yönden gelen sinyali güçlendirirken diğer yönlerden gelen sinyalleri bastırmaktır. Beamforming yöntemleri

temelde, gecikme ve toplam hüzme şekillendirme (delay and sum Beamforming) ve uyarlanabilir hüzme şekillendirme (Adaptive Beamforming) olarak iki türe ayrılabilir.

Gecikme ve toplam Hüzmeleme, Bu yöntemlerden zaman domeninde çalışan en basit ve en yaygın algoritmasıdır. Mikrofon dizisi neredeyse ölçüm düzleminin her noktasına ve göreceli olarak odaklanarak. Mikrofonlar arasındaki sinyal zaman gecikmeleri hesaplanır (Eret & Meskeel, 2012).

2.4.5. Kalman Filtreleme

Kalman filtreleri, değişken sinyaller için Wiener filtresinin doğal bir genellemesidir. Kalman filtresi aynı zamanda sinyalin bir durum modeliyle karakterize edildiği, bir dizi gürültülü ölçümden dinamik bir sistemin durumunu tahmin etmek için kullanılan tekrarlı, matematiksel tahmin algoritmalarıdır (Benesty vd., 2008). Ses kaynağının konumunun zamanda değişimini sürekli olarak izlemek ve tahmin etmek için genelde hareketli ses kaynaklarının konum tespiti için kullanılırlar.

Teorik olarak ses kaynağı ve alıcı sistem dinamiğinin ve ölçümlemenin doğrusal olduğu varsayımına dayanmaktadır. Ses kaynağı lokalizasyonunda, özellikle farklı kaynaklar bulunan akustik ortamlarda, kaynak konumu ile algılayıcıdan alınan ölçümler arasındaki ilişkiler doğrusal olmayabilir. Bu durum tahminlerde yanlışlıklara neden olabilir.

Algoritmanın modelleme zorluğu ve hesaplamaların karışıklığı nedeniyle sisteme aşırı işlem yükü oluşturdukları için diğer algoritmalara göre daha özel uygulamalarda tercih edilmektedir.

2.4.6. SRP (Yönlendirilmiş Güç Cevabı) yöntemleri

SRP (Steered response power) algoritmasının temel prensibi, algılayıcı dizisinin yönlendirilmiş tepki gücünü hesaplamaktır. Algılayıcı dizisinin farklı yönlerdeki cevaplarını değerlendirerek belirli bir yönde gelen sesin gücünü belirler. Her bir mikrofonun konumu ve algılanan ses sinyallerinin zaman gecikmeleri dikkate alınarak

her bir olası geliş yönü için bir güç değeri hesaplanır. Böylece oluşturulan güç spektrumu üzerindeki tepe noktalar ses kaynağının geliş yönlerini tahmin edilir.

Kapalı mekânlar gibi yankı oluşabilen ortamlarda GCC ile birlikte PHAT faz dönüşümü kullanılarak SRP-PHAT (Yönlendirilmiş Güç Cevabı - Faz Dönüşümü) algoritmasının başarılı sonuçlar elde edildiği önerilmektedir. SRP-PHAT ultrasonik sızıntı kaynağı tespiti bazı mevcut çalışmalarda (Claeson vd., 2015) denenmiş bir algoritmadır.

2.4.7. Triangulation (Üçgenleme)

TDOA gibi algoritmalarla elde edilen ses kaynağının konum hesaplamasında kullanılan trigonometrik bir hesaplama yöntemidir. Üçgenleme algoritması basit trigonometrik formüllere dayanmaktadır. Algılayıcı dizilerinin iki boyutlu koordinatlarda (0,0) ve (L,0) bulunduğunu ve bilinmeyen kaynak konumunun (x, y) olduğu varsayılırsa. Algılayıcı dizilerinin konumları ve dizilere θ_1 ve θ_2 'deki iki varış yönü bilgisinden yola çıkarak (x, y) koordinatlarını denklem 2.6'daki gibi hesaplanabilir (Damoulakis, 2018).

$$\begin{aligned} L &= y \tan \theta_1 + y \tan \theta_2 \\ y &= L/(\tan \theta_1 + \tan \theta_2) , x = y \tan \theta_1 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Üçgenleme tekniği kullanılarak bir ses kaynağının konumu kesin olarak belirlenebilir. Üçgenleme hesaplamaları çok basit olduğu için hesaplama süresinin kritik öneme sahip olduğu anlık konumlama yapılması gereken uygulamalarda avantaj sağlar. (Gaber vd., 2018).

2.5. Akustik algılayıcıların (mikrofon) türleri

Tasarlanan sistem için ideal ses kayıtları almak için o alana, ortama uygun mikrofon seçimi yapmak önemli bir unsurdur. Mikrofon türleri genel olarak dinamik ve kapasitif mikrofon olmak üzere ikiye ayrılırlar. kapasitif mikrofonlar, kapasitif bir algılayıcı kullanarak sesleri yakalarlar.

Çalışma metotları ve üretim türlerine göre farklı hassasiyet ve frekans cevabı tepkileri bulunur. Ayrıca aynı tür mikrofonlar bile üretimden kaynaklı olarak az da olsa birbirinden

farklı karakteristiğe sahip olabilirler. Bundan dolayı çalışmada seçilen mikrofon türünün özelliklerini bilmek ve çalışma için doğru algılayıcının kullanılması sonuçlara direkt etki edecektir. Farklı temel mikrofon türlerinin çalışma yapıları alt başlıklarda incelenmiştir. Bunların dışında çoğunlukla medikal sektöründe yüksek hassasiyet gereken çalışmalarda kullanılan fiber optik ve lazer mikrofonlar mevcuttur.

2.5.1. Dinamik mikrofonlar

Dinamik mikrofonlar elektromanyetik indüksiyon yöntemi kullanarak sesleri yakalarlar. Ses kaynağından gelen titreşimleri bobin üzerindeki manyetik alanı değiştirerek elektrik sinyallerine dönüştürür. Bu sebeple ses sinyallerini net ve güçlü bir şekilde yakalamasının yanı sıra yüksek ses basınç seviyelerine dayanıklıdır.

2.5.2. Ribbon mikrofonlar

Elektriksel olarak iletken şerit, bir mıknatısın alanı içinde hareket ettikçe şerit üzerinde gerilim oluşturma prensibine dayanan ribbon mikrofonlar aynı zamanda dinamik mikrofonların bir türüdür. Ribbon mikrofonda, delikli bir şerit kalıcı bir mıknatısın alanına asılır. Ribon tipik olarak düşük kütleli alüminyum alaşımından yapılır. Ses asılı şeritle etkileşime girdiğinde şerit mıknatısa göre hareket eder. Bu, mikrofonun çıkışına bağlanan şerit üzerinde bir gerilim oluşturur. Gerek maliyet gerekse boyut açısından diğer mikrofon türlerine göre daha az tercih edilir.

2.5.3. Kristal (Piezo) mikrofonlar

Kristallerin bazıları mekanik bir kuvvetin altında gerilim üretir. Bu etkiye piezoelektrik etkisi denir. Bu sebeple kristal mikrofon, piezoelektrik mikrofon olarak da adlandırılır. Ses diyaframa veya doğrudan kristale basınç uyguladığında kristal esner. Bu bükülme, kristal üzerinde havada veya belirli bir yüzeydeki titreşimleri temsil eden bir elektrik yükü oluşturur. Algılama açıları dar ve frekans cevabı çalışma için yeterince düz değildir (MATHIAS, 2023).

2.5.4. Karbon mikrofonlar

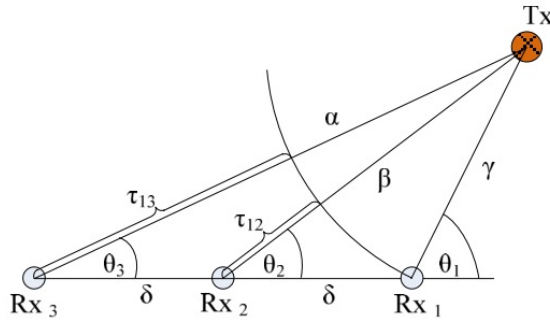
Karbon granülleri sıkıştırıldığında dirençleri azalması prensibiyle çalışan karbon mikrofonlar, karbon granüllerinin içinden akacak bir elektrik akımı oluşturmak için bataryaya ihtiyaç duyarlar. Ses karbonla etkileşime girdikçe granüller sıkıştırılır. Bu, karbonun direncini değiştirerek, havanın hareketleriyle akımın artıp azalmasına neden olur.

2.5.5. Kapasitif mikrofonlar

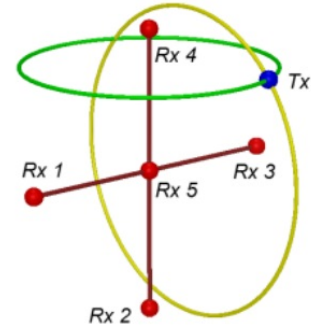
Birbirlerine paralel elektrot görevi gören iki adet delikli metal plaka yakınında bulunan çok ince bir diyaframın yüzeyine gelen akustik dalga ile plakaların titreşmemesi sonucu DC gerilim uygulanan plakalardaki kapasitenin değişmesi prensibi ile çalışmaktadır. Çalışma prensibi nedeniyle condenser, capacitor, elektret mikrofon gibi farklı isimlerle anılırlar. Hassasiyetleri yüksek olması nedeniyle çok yaygın şekilde kullanılmalarına rağmen çıkış sinyalini yükseltmek için genellikle ön yükselteç ve dc kaynağa ihtiyaç duyulmaktadır (Anonim, 2023a).

2.6. Alıcıların (mikrofon) yerleşimi

Mikrofonların yerleşim düzeni ve birbirlerine karşı olan uzaklıkları kaynağın konum tespitinin doğruluğu için ve ayrıca hesaplamalarda oluşacak işlem zorluğu açısından önem taşımaktadır. Tek bir ekseninde eşit veya farklı aralıklarla dizilmiş alıcılarla uzaklık ve tek açı üzerinden yön tayini yapılabilirken, iki boyutlu 2D bir düzlemde dağıtılmış mikrofonlarla birbirine dik iki açı ve uzaklık bilgisi elde edilebilir. Benzer şekilde üç boyutlu 3D sanal bir hacim içine veya küresel geometride dizilmiş mikrofonlarla yapılmış çalışmalar da (Meyer & Döbler, 2006) bulunmaktadır. Şekil 2.5'te mikrofon geometrisi ile alıcıların konumlandırılması örnek verilmiştir.



A - 2D konumlama geometrisi



B - 3D konumlama geometrisi

Şekil 2.5. 2D ve 3D konumlama geometrileri (Kunin vd., 2011)

Şekil 2.5'te görülen “Tx” ses kaynağı, “Rx” alıcılar, “ θ_1 , θ_2 ve θ_3 ” kaynak ile alıcıların yaptığı açı “ α , β , γ ” alıcı ve kaynak arası uzaklık, “ δ ” alıcıların birbiri arasındaki uzaklık, “ τ_{12} ve τ_{13} ” mikrofonlar arası varış zamanı gecikmesini temsil etmektedir (Kunin vd., 2011). Son yıllarda doğrusal diziler, düzlemsel diziler, dairesel diziler ve küresel diziler gibi kendi artıları ve eksileri olan farklı mikrofon dizisi dağılımlarının üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu yerleşim türlerinin tercihi alıcıların kullanımına ve doğruluk gereksinimlerine bağlıdır (Bhavana vd., 2020). Çalışmada üç boyutlu konum tespiti yapılabilmesi için yüzeyde iki eksene göre dağıtılmış mikrofon dizisi kullanılması tercih edilmiştir.

Algılayıcı dizileri algılayıcıların birbirleri arasındaki mesafelere göre düzenli dağılımlı, düzensiz dağılımlı, rastgele dağılımlı olmak üzere sınıflandırılabilirler (D H. Johnson & D.E. Dudgeon, 1993). Çalışmada karşılaştırma yapılması amacıyla alıcıların birbirleriyle arasında olan uzaklıkların eşit olduğu (Düzenli dağılımlı) ve hiçbir uzaklığın aynı olmadığı (Düzensiz dağılımlı) iki farklı mikrofon dizisi kullanılması uygun görülmüştür.

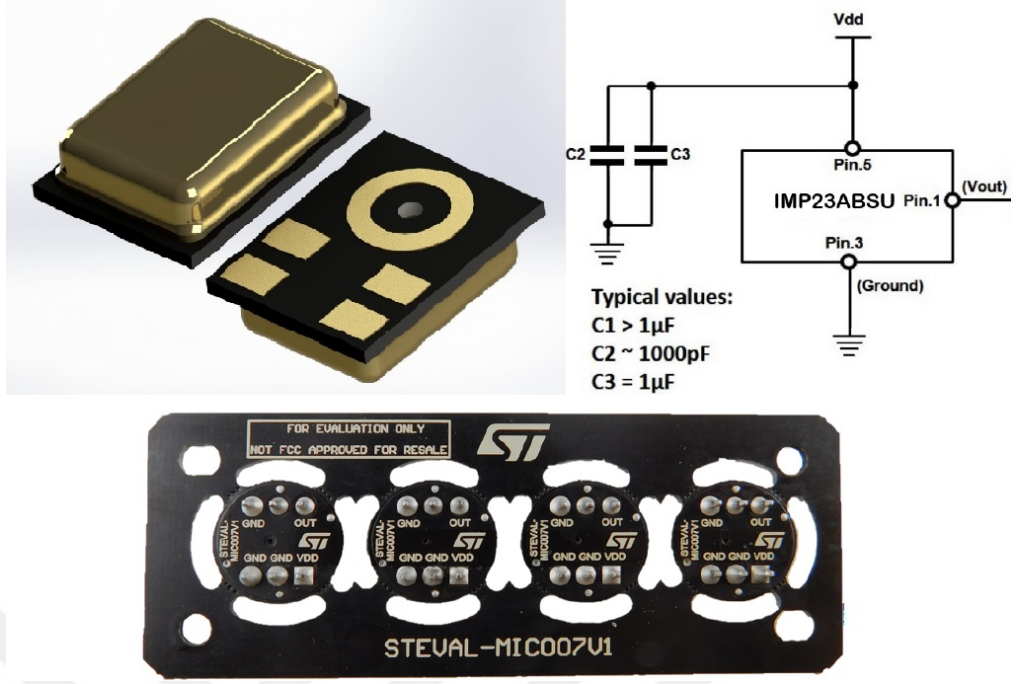
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde tez çalışması için kullanılan malzemelerin seçimi ve dikkat edilen özelliklerine değinilmiştir. Tez çalışması süresince kullanılan yazılımlar açık kaynaklı veya temel sürümler tercih edilmiştir. Baskılı devre tasarımı KiCad 7.0, gömülü yazılım derlemede STM32CubeIDE 1.10.1, veri seti için ses kaydetmede Audacity3.4.2, verilerin işlenmesi ve görüntü üzerinde doğruluğunun karşılaştırılması için Matlab 2023b programı kullanılmıştır. Bu programların yanı sıra gömülü sistem yazılımında STMicroelectronics'e ait USB cihazı ses arayüzü "USB Device Audio interface" kütüphanesinden faydalanılmıştır.

3. 1. Mikrofon seçimi

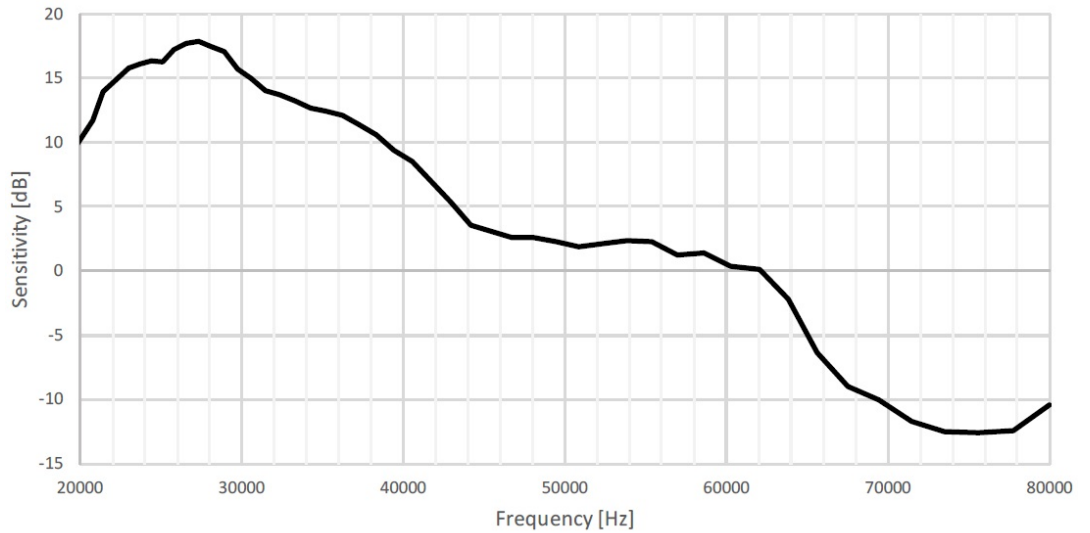
Çalışmada algılanmak istenen sesleri elektrik sinyaline dönüştürmek için öncelikle bir mikrofon dizisi kullanılması gerekmektedir. Kullanılan mikrofonun frekans cevabının ultrasonik sesler için yeterli aralıkta ve düz olması, elektriksel gürültüye dayanıklı, birbirleriyle aralarındaki üretimden kaynaklanan farkın az olması algılayıcı seçiminde öncelikli olan unsurlardır.

Tezde kullanılmak üzere STMicroelectronics firmasının üretimi olan ultrasonik uygulamalar için frekans cevabı 80kHz e uzatılmış IMP23ABSU yüksek performanslı MEMS mikrofonu seçilmiştir. IMP23ABSU temelde kapasitif algılayıcı ve bir tümleşik devreden oluşmaktadır. Mikrofonun düşük güç gereksinimi 150µA max taşınabilir bataryalı sistemler için daha sonraki çalışmalarda da yararlı olacaktır. Bu mikrofon baskılı devre kartının (PCB) arka yüzeyine fırınlama metodu ile monte edilebilmektedir. Ses algılama deliğinin küçük olması bizim için bir avantaj sağlamasının yanı sıra baskılı devre kartının ön yüzeyinde oluşturulan delik ile fazladan bir kılavuz oluşturulmaktadır. Mikrofonun dış kısmının kafes içinde üretilmiş olması harici gürültülerden etkilenmemesini sağlamaktadır. Ayrıca çok yönlü (Omnidirectional) hassasiyeti, yüksek SNR değeri, düşük sinyal gecikmesi ve akustik aşırı yüklenme noktasının diğer mikrofonlara göre yüksek olması diğer tercih sebeplerindendir. Şekil 3.1 de mikrofonun dış görünümü (sol üst) bağlantı yapısı (sağ üst) ve Baskılı devre kartı Steval-mic007v1 (alt) görülmektedir.



Şekil 3.1. IMP23ABSU ve Steval-mic007v1 görünümü ve mikrofon bağlantı yapısı (STMicroelectronics, 2020a, 2020b)

Daha önce bahsedildiği gibi her mikrofon çalışma frekansı aralığında farklı hassasiyet göstermektedir. IMP23ABSU mikrofonun 20kHz ile 80kHz aralığında ve 1kHz e göre normalize edilmiş hassasiyet eğrisi Şekil 3.2 de verilmiştir.



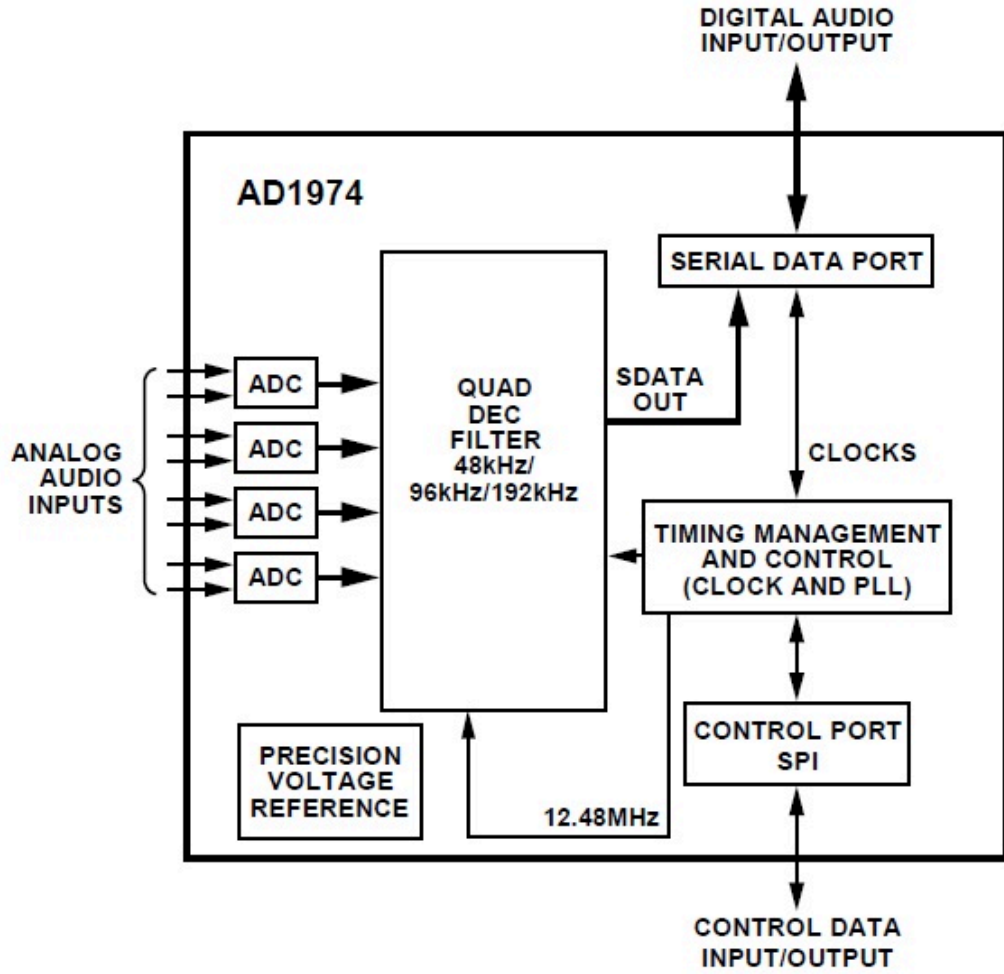
Şekil 3.2. 1 kHz e göre normalize edilmiş hassasiyet eğrisi (STMicroelectronics, 2020a)

Steval-mic007v1 kartı aynı düzlemde eşit aralıkla dizilmiş mikrofonlardan oluşmaktadır. Bu mikrofon dizilimi ki boyutlu 2D uzaklık ve açı bilgilerine ihtiyaç duyulan çalışmalarda kullanılabilir, fakat daha önceden belirtildiği gibi bu tez çalışması için tam olarak uygun değildir. Çalışmada birbirinden farklı eksenlerde kullanılması hedeflenen mikrofonların baskılı devre kartına hassas şekilde monte edilmiş olması bizim için kolaylık sağlamıştır.

3. 2. Analog – sayısal çevirici seçimi

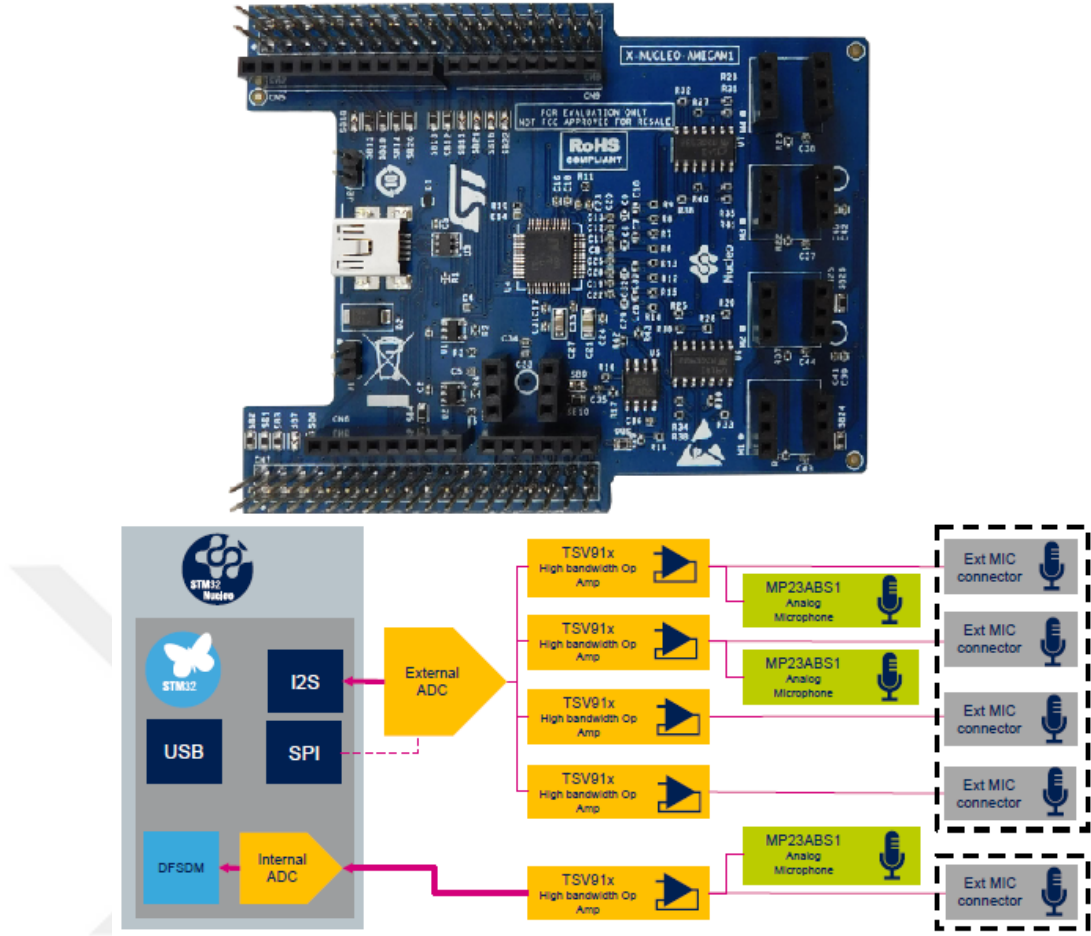
Çok kanallı örnekleme yapılırken kullanılan mikrofonlardan alınan analog ses sinyallerinin eşzamanlı örneklenmesi, birbirleri arasında zaman kaybının olmaması hesaplamalarda fayda sağlayacaktır. İşlenecek sinyale göre yeterli örneklemeyi alabilecek hızda ve mümkün olduğunca yüksek çözünürlükte olması, doğru sonuç alabilmek için önem taşımaktadır.

Bu nedenle çalışmada kullanılan analog- sayısal dönüştürücünün (ADC) tek saat darbesi ile tetiklenen dört ayrı tümleşik devre (IC) veya dâhili dört kanalı bulunan bir IC kullanılmalıdır. Çalışmada kullanılmak üzere seçilen ADAU1974 tümleşik devresinde 192kHz e kadar örnekleme yapabilen 24Bit çözünürlükte dört kanal ADC devresi bulunmaktadır. Ayrıca dâhili PLL (Phase Locked Loop) bloğuna sahiptir, harici saat darbesi gereksinimi duymaz. Mikrokontrolcü arayüzü olarak I2S ve SPI (serial peripheral interface) portları bulunmaktadır. Bu portlar aracılığıyla ses yoğunluğu ve örnekleme hızı vs. gibi fonksiyonlarının parametreleri kontrol edilebilmektedir. Şekil3.3'te ADC tümleşik devresinin fonksiyonel blok yapısı görülmektedir.



Şekil 3.3. AD1974 fonksiyonel blok yapısı (Analog Devices inc., 2013)

Tezde ADC olarak seçilen AD1974 ve bant genişliği yüksek işlemsel yükselteç (op-Amp) kullanılan birinci derece RC alçak ve yüksek geçiren analog giriş filtreleri barındıran X-NUCLEO-AMICAM1 devre kartı kullanılmıştır. Analog filtre kesim frekansları alçak geçiren için 99.4kHz, yüksek geçiren filtre 2.8Hz ise olarak belirlenmiştir. Bu değerler daha sonra istenilen frekans bandı için hesaplanarak devre kartı üzerinde değiştirilebilir. Bizim çalışmamız için alt kesim frekansının 50 Hz üzerinde olması daha uygun olacaktır. Kartın üzerindeki bağlantılar yardımıyla harici mikrofon girişleri aktif hale getirilerek SPI portu üzerinden mikrofonlar test edilmiştir. Kartın görünümü ve blok yapısı şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. X-NUCLEO-AMICAM1 devre kartı ve blok yapısı (STMicroelectronics, 2020c)

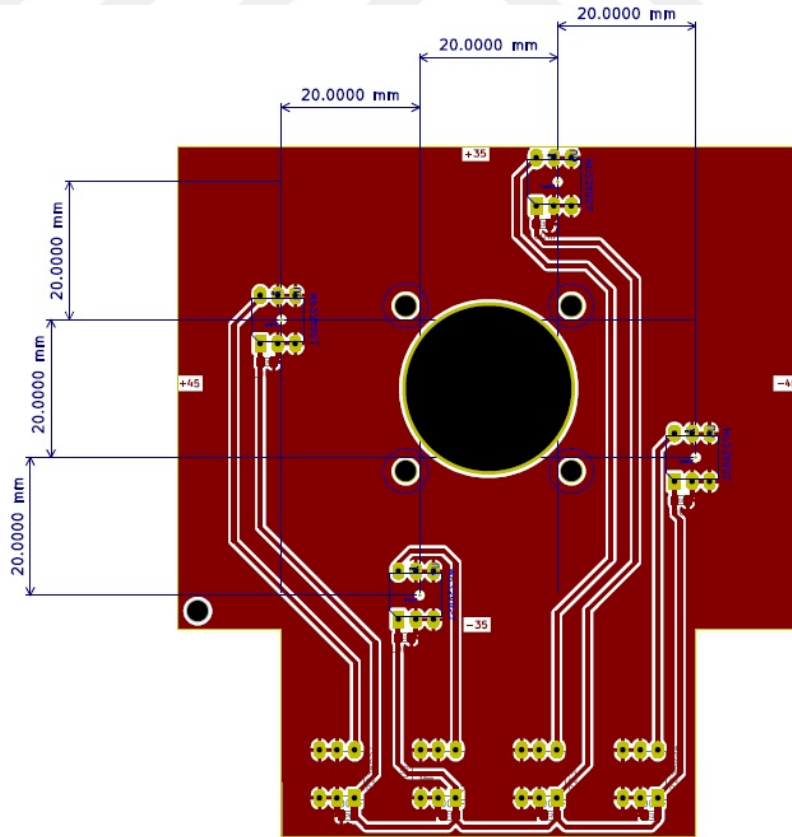
3.3. Mikrokontrolcü (MCU) ve USB Ara yüzü

Mikrokontrolcü sistemi mikrofön dizisinden alınan ve ADC tarafından örneklenmiş ses sinyallerini işlem yapmak üzere bilgisayara aktarmak için köprü görevi görebilecek yapıda çevre birimlerine sahip olmalıdır. Kullanılan ADC devre kartı yapısından anlaşılacağı gibi varsayılan haberleşme türü I2S veya SPI olarak seçilebilir. İkinci önemli gereksinim USB cihazı (USB device) özelliği barındıran bir mikrokontrolcü olmasıdır. ADC devre kartının bağlantı pinleri ile uyumlu olması açısından yine aynı üreticiye ait MCU devre kartları incelenmiştir. Arm® Cortex®-M4 32-bit çekirdekli, 100DMIPS (saniyede işletilen komut sayısı) 1MB Flash hafıza, 128 KB SRAM, USB OTG (On The

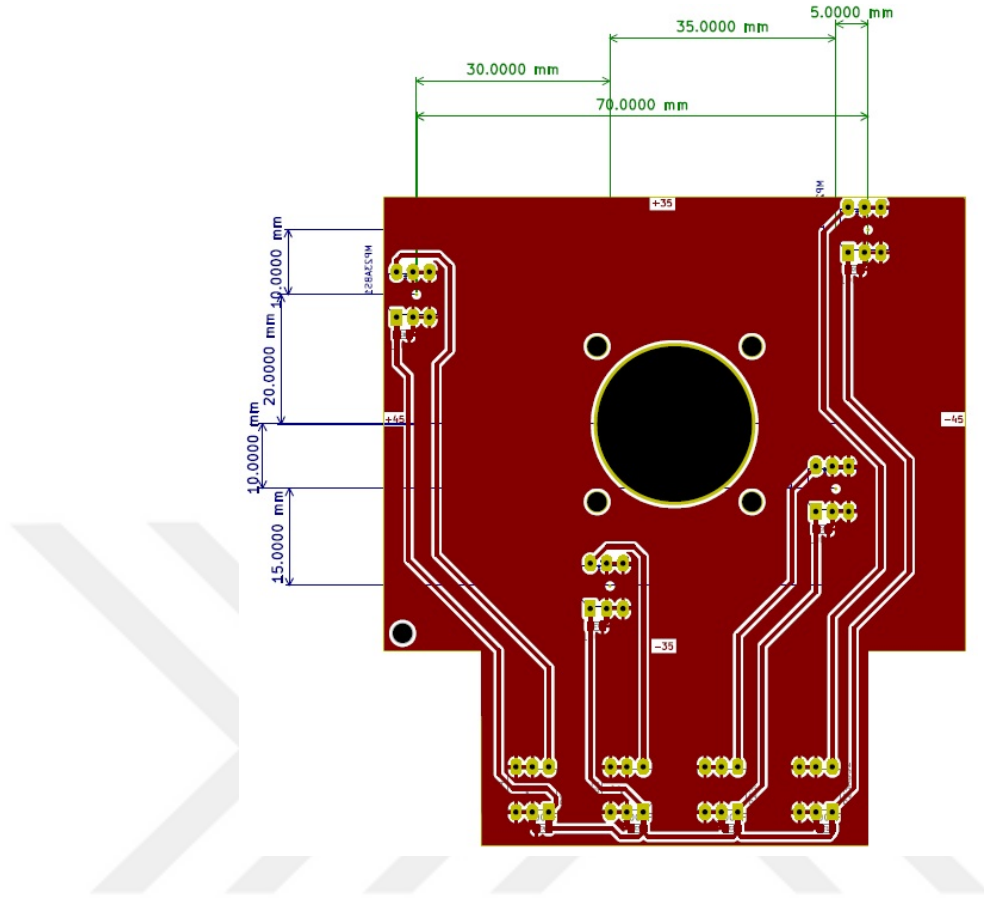
Go) özelliği bulunan 64 pin STM32L476 Mikrokontrolcü barındıran NUCLEO-L476RG devre kartı çalışmada kullanılmak için uygun görülmüştür (STMicroelectronics, 2019).

3.3. Kullanılan mikrofon dizisi için baskılı devre tasarımı

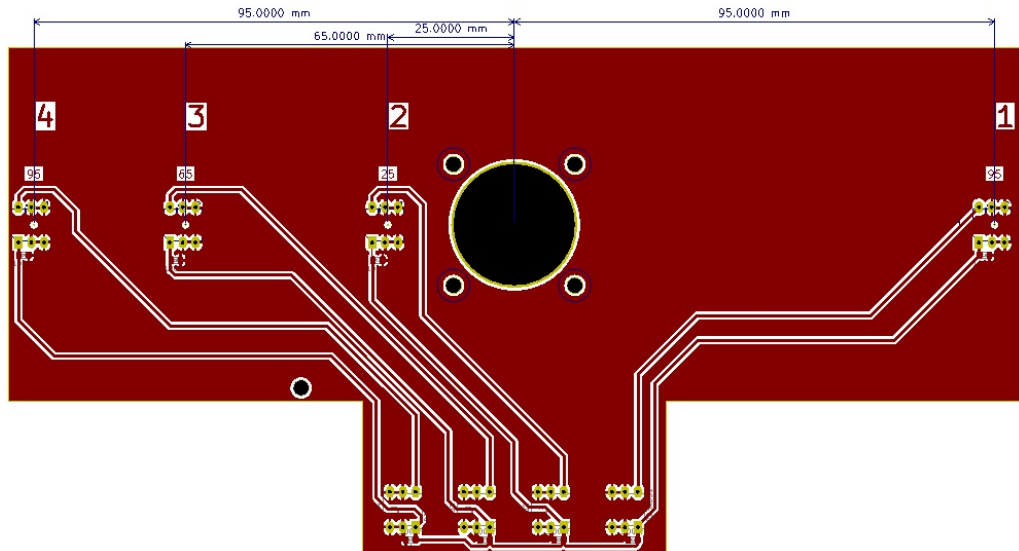
Kullanılacak mikrofon dizisinin üç boyutlu ses algılaması için merkez eksene göre dağılımının Steval-mic007v1 kartındaki gibi tek eksenli değil dikey ve yatay eksenlerde farklı konumlandırılmış olması gerekmektedir. Sinyal gecikmelerinin hesaplanması için birbiri arasındaki ve görsel hesaplamalar için kamera merkezine olan dikey ve yatay uzaklıkları bilinen iki farklı baskılı devre kartı KiCAD7.0 programında tasarlanarak tek katmanlı olarak üretilmiştir. Tasarım yapılırken kullanılacak olan USB kameranın mikrofonların merkezine monte edilebilecek şekilde olması düşünülmüştür. Şekil 3.5'te her mikrofon merkezinin aralığı dikey ve yatay eşit olan Şekil 3.6'da her aralığı farklı olan ve Şekil 3.7'de tek eksende farklı aralıklarla sıralanmış mikrofon dizisinin baskılı devre tasarımları gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Düzenli dağılımlı mikrofon dizisi

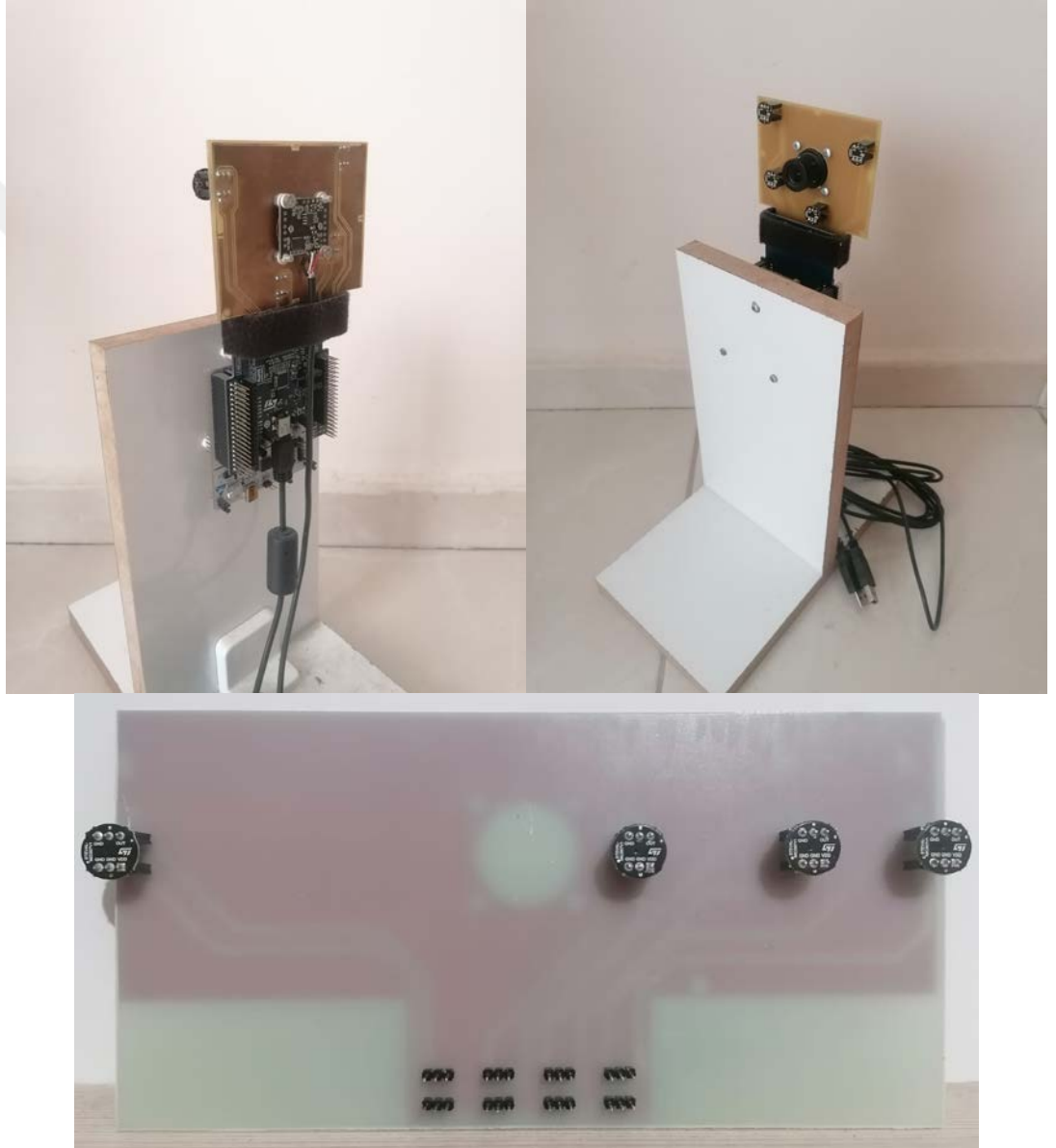


Şekil 3.6. Düzensiz dağılımlı mikrofon dizisi



Şekil 3.7. Lineer düzensiz dağılımlı mikrofon dizisi

Üretimi yapılan baskılı devre kartları analog sayısal dönüştürücü kartı ve mikrokontrolcü kartına monte edildikten sonra dik bir taşıyıcıya sabitlenmiştir. Oluşturulan alıcı sistemde programlama portu, USB ses kartı ve USB kamera bağlantısı olmak üzere üç bağlantı bulunmaktadır. Programa portu sadece USB ses kartı yazılımının yüklenmesinde ve hata ayıklama sırasında kullanılmıştır. Alıcı sistem için üretilen 2D mikrofön dizileri ve lineer düzensiz mikrofön dizisinin görünümü Şekil 3.8’ de verilmiştir.



Şekil 3.8. Deneylerde kullanılan Kamera ve farklı mikrofön

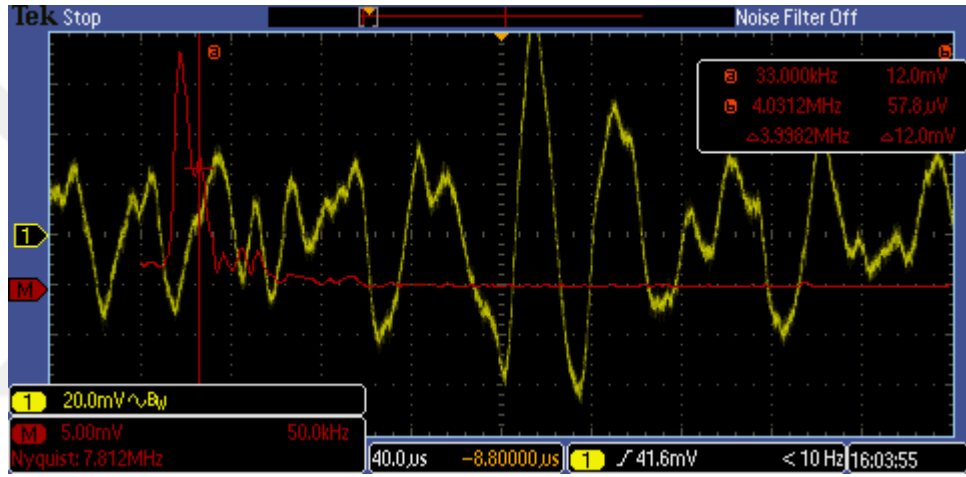
3.5. Ses kaynağının benzetiminin oluşturulması

Yapılan çalışmanın gerçek endüstriyel sistemlerde test edilmeden önce seçilen mikrofon geometrisi ve kullanılan algoritmanın doğruluğunun sınanması için daha sabit bir ortamda veri tabanı elde edilmesi gereksinimi doğurmuştur. Öncelikle endüstriyel sistemlerde oluşan hava kaçaklarının oluşturduğu duyulamayan ses frekansının tespit edilmesi için deneyde kullanılan kompresör 8 Bar'a ayarlanmıştır. Tezde kullanılacak mikrofon bir bataryalı bir devre kartı üzerine monte edilerek mikrofon sinyalinin osiloskop ekranında gözlemlenebilir olması sağlanmıştır. Kaçağın benzetiminin oluşturulması için sinyal üretici ile kullanılmak üzere, yüksek frekanslarda çalışabilecek kristal ve dinamik olmak üzere iki adet hoparlörlerden faydalanılmıştır. Bu donanım daha sonraki bölümlerde verici sistem olarak adlandırılmıştır. Yapılan deneyde kullanılan donanım Şekil 3.8'de görülmektedir.

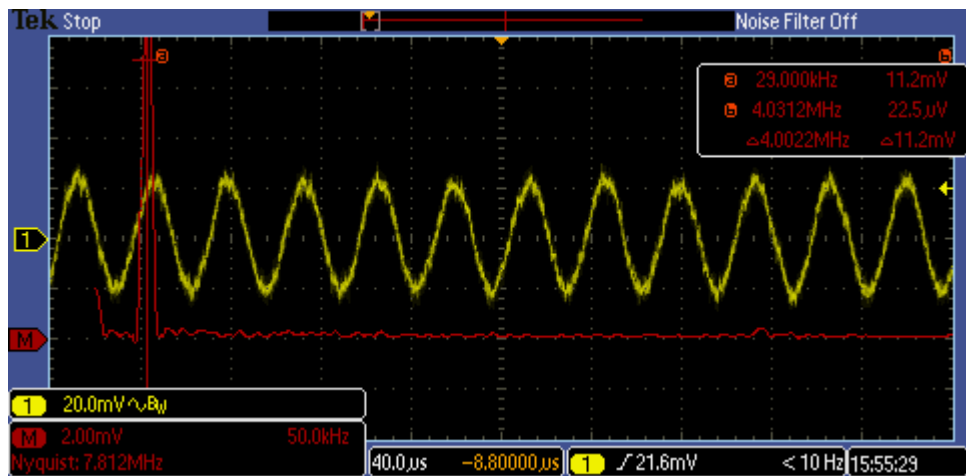


Şekil 3.9. Hava kaçağı benzetim düzeneği

Deneyde kullanılan kompresöre daha sonra takılan hortumlarda küçük kaçaqlar oluşturulmuş ve tezde kullanılacak mikrofon yardımıyla osiloskop ta algılanan ses sinyali genlik ve frekans domeninde incelenmiştir. Hava sızıntısının olduğu andaki yüksek genlikli frekans bileşenlerinin 26kHz - 33kHz aralığında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3.10’da Sızıntı kaynağı ölçümleri gösterilmiştir. Daha sonra sinyal üretici ile tespit edilen frekanslarda sinüs işaretleri üretilerek ses kaçağı benzetiminin yapılması hedeflenmiştir. Burada dinamik hoparlörün deney frekansı aralığında kristale göre daha istikrarlı olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.11’de sızıntı kaynağı benzetiminin ölçülen değerleri gösterilmektedir.



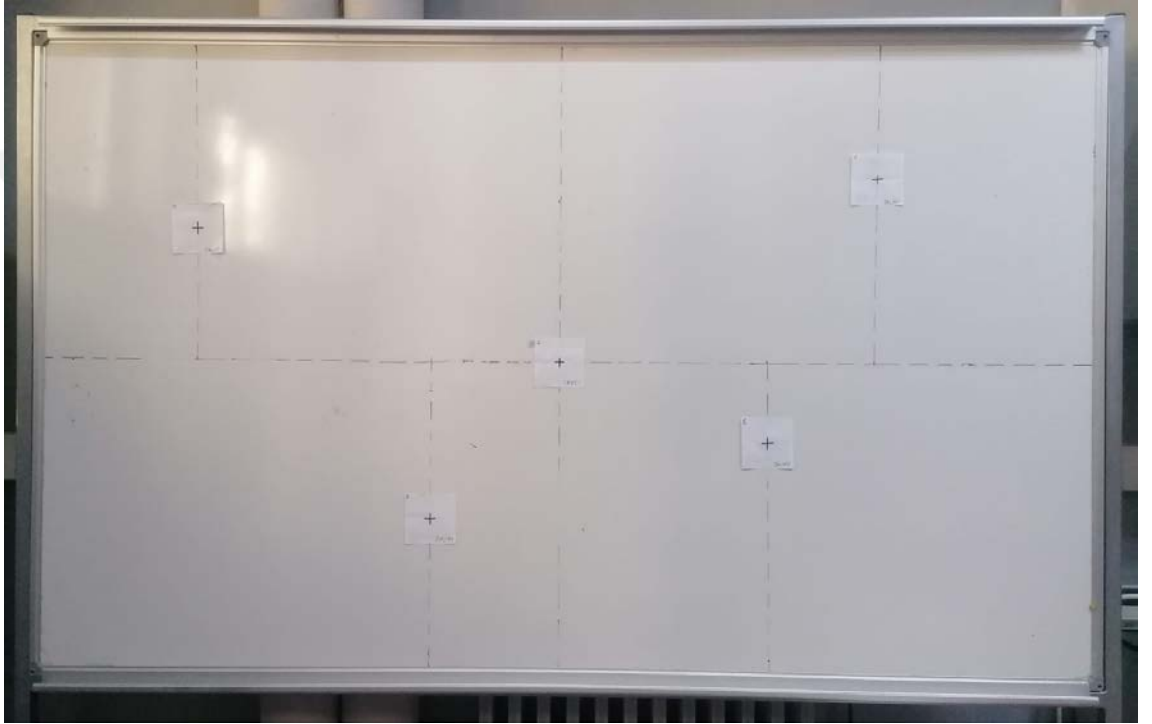
Şekil 3.10. Basınçlı hava kaçağından alınan ölçümler



Şekil 3.11. Sızıntı kaynağı benzetim ölçümleri

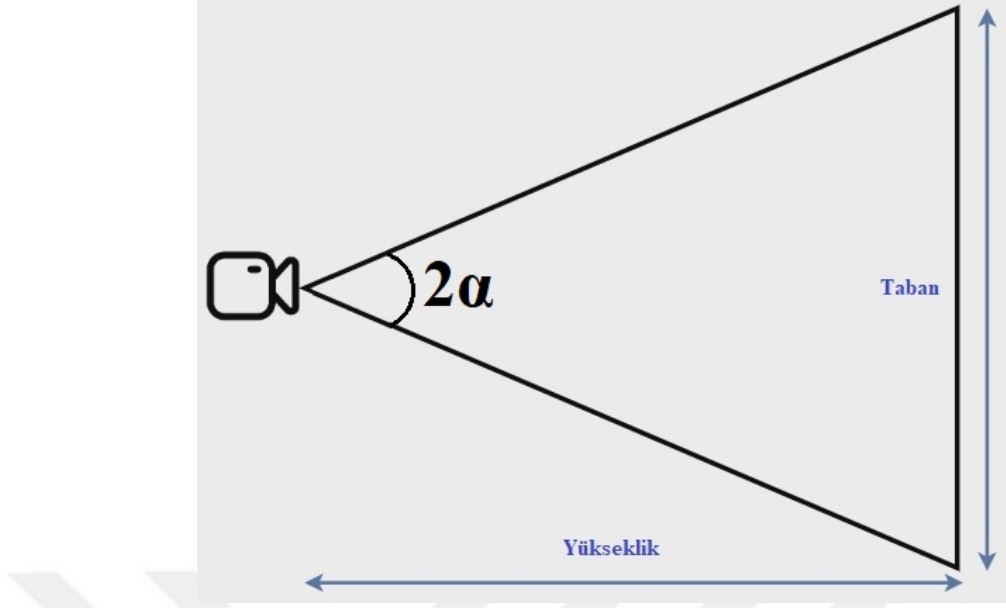
3.6. Kamera açılarının bulunması

Kamera lens açılarının tespit edilmesi için alıcı düzlemi, karşıt düzleme dik uzaklık 1.5metre mesafede konumlandırılmıştır. Merkez ve diğer test bölgeleri işaretlenerek Kullanılacak kameranın karşı düzlemde dikey ve yatay görüş açılarının önceden bilinmesi gerekmektedir. Örnekleme bölgelerinin sırası ve kamera açılarının belirlenmesi için yapılan deneyin görseli Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12. Kameranın karşı düzlem ölçümü ve bölgelerin numaralandırılması

Bu deney sonunda 150cm mesafede bulunan kameranın 16/9 oranında görüntü aldığı alan 157x92cm olarak tespit edilmiştir. Kullanılan kamera görüş açılarının bulunması için gerekli hesaplama yüksekliği 150 ve tabanları yatay için 158 ile dikey için 92 olan iki ikizkenar üçgenin tepe açılarına eşit olacaktır. Şekil 3.13’te gösterildiği gibi kameranın görüş açılarını tanjant fonksiyonu ile hesaplanarak;



Şekil 3.13. Kamera açısının hesaplanması

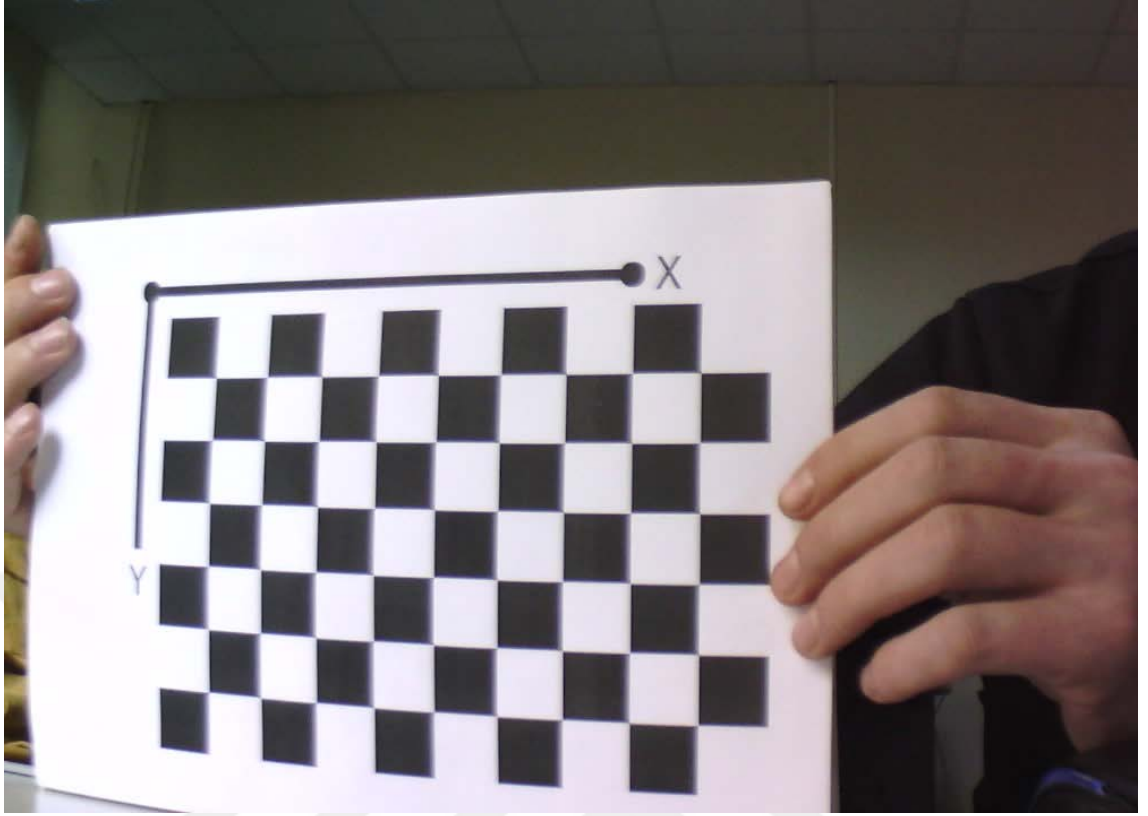
Yatay eksen için; $\tan(\alpha) = \frac{158/2}{150} \Rightarrow 2\alpha = 2\tan^{-1}\left(\frac{158/2}{150}\right) = 55.55^\circ$

Dikey eksen için; $\tan(\alpha) = \frac{92/2}{150} \Rightarrow 2\alpha = 2\tan^{-1}\left(\frac{92/2}{150}\right) = 34.10^\circ$ bulunur.

Sonuç olarak 1280x750px görüntü kalitesinde iken kullandığımız kameranın görüş açıları yatayda 55.55° , dikeyde 34.10° olduğu hesaplanmıştır.

3.7. Kamera odak ve lens kalibrasyonunun yapılması

Sıklıkla tercih edilmekte olan iki temel kamera kalibrasyon uygulaması bulunmaktadır. Bunlar OpenCV yazılımı içerisinde bulunan “calibrateCamera” ve Matlab programındaki “Camera calibration app” tır (Zhengyou Zhang, 2008). Kamera odaklaması 1.5metre mesafeye yerleştirilen Şekil 3.12’deki görselin ekrandaki netliği gözlemlenerek mekanik olarak sabitlenmiştir. Kamera kalibrasyonu yapılırken Matlab - kamera kalibrasyon uygulaması kullanılmıştır. Kamera lensinde Şekil 2.3’teki gibi iğne yastığı bozulması (Pincushion distortion) tespit edilmiş ve Şekil 3.14’te görülene benzer şekilde ardışık resimlerle çekilen bu görsel bozulma düzeltilmiştir.



Şekil 3.14. Kamera kalibrasyonunun yapılması

Kalibrasyon deseni olarak Matlab'ta bulunan, “open checkerboardPattern.pdf” komutu ile elde ettiğimiz “Dama Tahtası” deseni tercih edilmiştir (MathWorks Inc., 2023b).

3.8. Deney düzeneğinde kullanılan mekanik aparatlar

Deneylerde kaynak olarak kullanılan hoparlör, kamera ve mikrofonların bulunduğu algılayıcı sistemin karşılıklı konumlandırılabilmesi için gerekli bazı mekanik aparatlara ihtiyaç duyulmuştur. Pozisyon ve yükseklik ayarı yapılabilmesi nedeniyle mikrofon ve hoparlör sehpalarına iki ayrı montaj aparatı tasarlanmıştır. Ayrıca deneyler sırasında hoparlörün ses çıkışına delik çapının sonuçlara etkisinin incelenmesi için çıkışı 5mm'ye daraltma amaçlı konik bir parça üretilmiştir. Mekanik tasarımlar, yazılım tabanlı üç boyutlu tasarım OpenSCAD2021.01 programı ile oluşturulmuştur. Repetier dilimleyici programı ile dilimlenerek baskıya SLA malzeme kullanılarak baskı alınmıştır. 3D yazıcı ile baskıları yapılan aparatlar Şekil 3.15'te (A- Kamera, mikrofon seti için, B- Hoparlör tutucu, C Ses çıkışı daraltma aparatı) görülmektedir.



Şekil 3.15. 3D yazıcı ile baskısı yapılan mekanik aparatlar

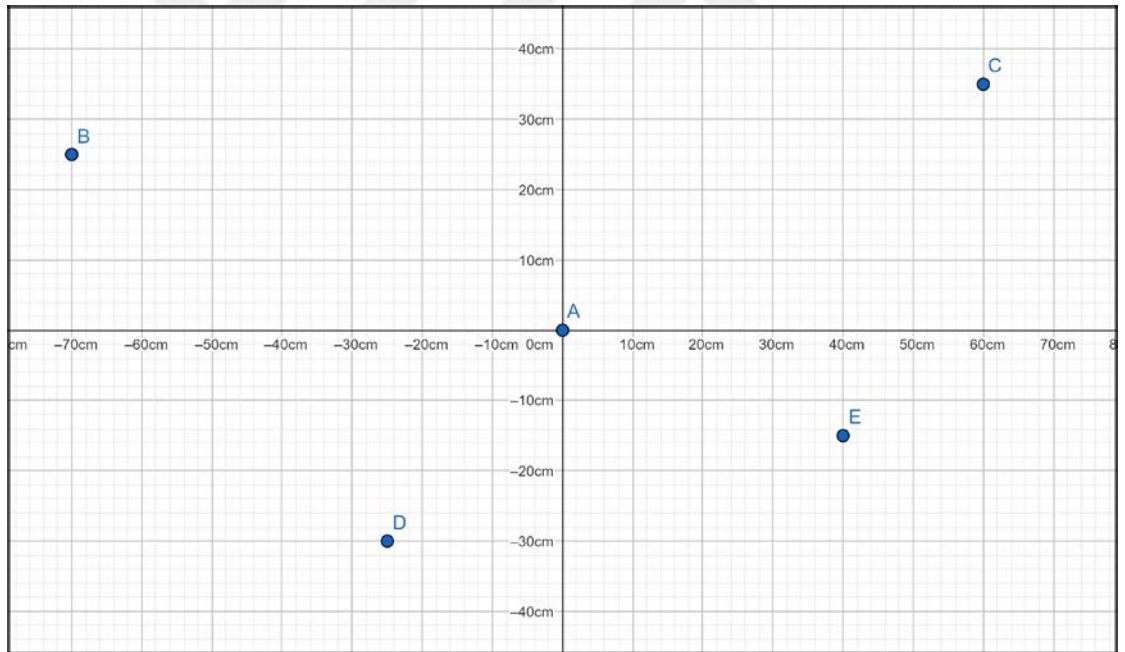
3.9. Veri setinin oluşturulması

Tez çalışmasında kullanılan sonuçları karşılaştırılacak ses kayıtları, çalışmanın hedefinden ötürü dış gürültülere açık laboratuvar ortamında kurulan deney düzeneği ile kaydedilmiştir. Kamera görüntü alanının tam merkezi ve alanın dört parçaya bölünerek sıralanan durum için Şekil 3.12'deki gibi her bölümünde farklı bölgelere ve açılara denk gelecek şekilde seçilen beş farklı noktadan ölçümleme yapıp her iki mikrofona dizisi ile kayıtlar alınmıştır. Konumlama yapılırken daha önce yapılan deney göz önünde bulundurularak kamera görüş alanının dışına çıkılmamıştır. Oluşturulacak veri setinde yapılan kayıtlar kaynağın o andaki pozisyon adı ve kullanılan mikrofona geometrisi ile adlandırılarak kaydedilmiştir. Çizelge 3.1'de bu isimlendirmeler liste halinde verilmektedir.

Çizelge 3.1. Veri seti isimlendirme ve görüntü alanı merkez koordinatları

Konum Numarası ve adı	Konum (x, y)cm
A - merkez	(0, 0)
B - Sol üst	(-70, 25)
C - Sağ üst	(60, 35)
D - Sol alt	(-25, -30)
E - Sağ alt	(40,-15)

Kamera görüş alanının dörde bölünmüş ve her bölgesinde seçilmiş olan benzetim kaynağının konumları ve adları Şekil 3.16’da olduğu gibi görünecektir. Deneysel çalışmalar hoparlörün bu konumlara yerleştirilmesiyle alınan kayıtlarla oluşturulmuş veri seti ile devam edecektir.



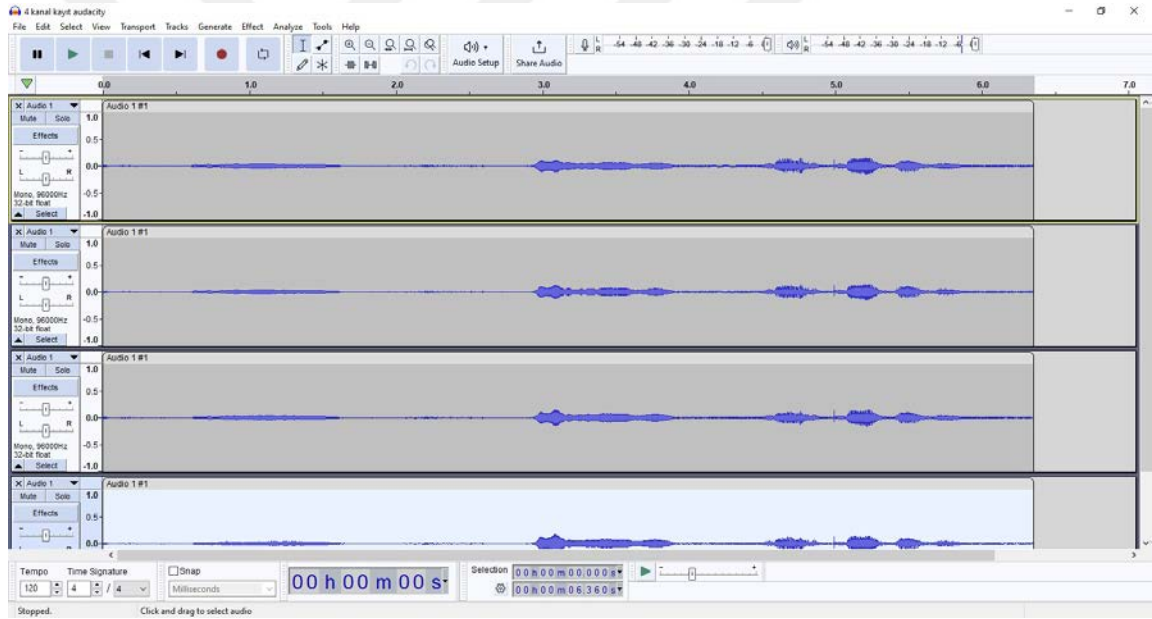
Şekil 3.16. Ölçekli kamera görüş alanı üzerinde test noktalarının görünüşü

Kayıt için özel ve dış etkilerden arındırılmış bir ortam kullanılması tezin hedefine uygun olmayacaktır. Böyle bir ortamda elde edilen veri setleri ile gerçekten laboratuvar veya

laboratuvara yakın koşullarda bazı önemli sonuçlar elde edilmiş olsa da, sistemler gerçekçi koşullarla karşı karşıya kaldığında veya eğitimsiz kullanıcılarla başa çıkmak zorunda kaldığında bu performanslar hızla düşecektir (ERTAŞ, 2002).

Veri seti oluşturulurken stüdyo ortamı yerine hali hazırda birçok elektronik cihazın çalıştığı akustik yalıtımı olmayan bir ortamlar tercih edilmiştir. Yine de gerçek bir endüstriyel ortamda alınacak sonuçlar, karşılaştırmalı sonuçlardan başarısı yüksek olan sistemin başarısının de altında kalacaktır. Sistemin endüstriyel ortamdaki başarısının laboratuvar ortamındaki başarıya eşitlenebilmesi ayrıca bir araştırma konusu alanını oluşturur.

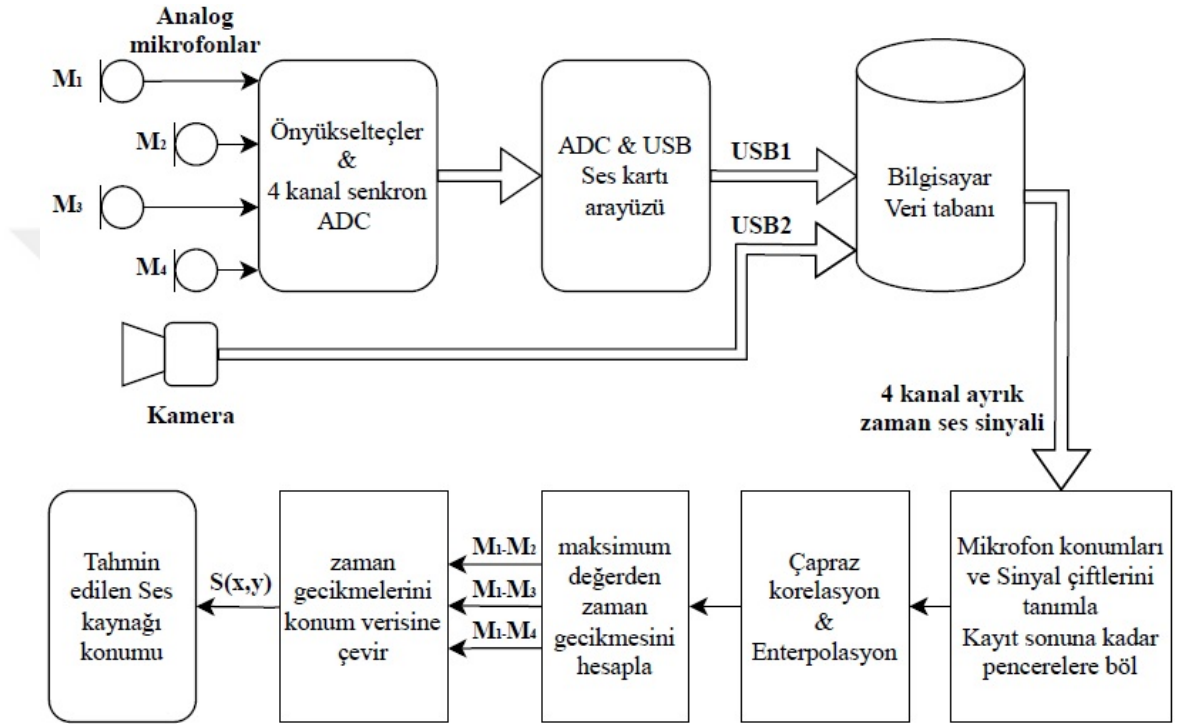
Veri setinin oluşturulmasında alınan kayıtlar için kullanılan Audacity programının dört kanallı ses kayıt görseli Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17. Dört kanallı ses sinyalinin kaydedilmesi.

3.10. Matlab Uygulaması ile farklı mikrofon dizilerinden alınan verilerin işlenmesi

Çalışmanın bu bölümünde Matlab'ta daha önce ses kaynağı konumları ve kayıt alınan mikrofon dizisi geometrileri bilinerek oluşturulan veri tabanındaki dört kanallı ses dosyaları kullanılarak sonuçların başarısı gözlemlenmiştir. Kullanılan sistemin donanım ve yazılımına ait sadeleştirilmiş blok diyagramı Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18. Kullanılan sistemin genel blok diyagramı

Kullanılacak veri tabanının elde edilmesinden sonra sistemin test edilmesi için ilk olarak yazılımda kullanılacak mikrofon geometrisine göre değişen sabitlerin ve diğer değişkenlerin tanımlanması gerekmektedir. İşleme alınacak “Pencere” boyutu 200ms seçilmiştir. Kayıtlar örnekleme frekansı f_s 96Khz olduğu için pencereleme örnek sayısı denklem 3.1’deki gibi,

$$N_p = \frac{f_s}{T_p} \Rightarrow \frac{96000}{0.2} = 19200 \quad (3.1)$$

hesaplanarak kullanılmıştır.

Her mikrofon referans seçilen mikrofon ile ikili çapraz korelasyon uygulanarak sonuçlar enterpolasyon kullanılarak hassas hale getirilmiştir. Elde edilen her çifte ait matrisin en yüksek değerinin konumu kullanılarak örnekleme aralığı ile çarpıldığında tanımlı iki mikrofon arası gecikme elde edilmiştir. Gecikme süreleri ve Denklem 2.1’de verilen akustik seslerin havada yayılım hızı kullanılarak mikrofonların kaynağa olan mesafeleri ve açıları ve üçgenleme metodu ile kaynağın karşı düzlemdeki konumu hesaplanmıştır. Son olarak sonuçlar veri setinde kaydedilen ses dosyalarının konumlarıyla doğrulanarak önce yazılım test edilmiş ardından sonuç tabloları oluşturulmuştur.

İlgili algoritmalarla örtüşen Matlab yardımcı fonksiyonlarının bazıları değişiklikler yapılarak bazıları ise olduğu gibi yazılım içerisinde kullanılmıştır. Örnek olarak ses dosyalarının Matlab’a aktarılmasında “dsp.AudioFileReader()” fonksiyonunun yanı sıra, algoritmada “PairArrayPreprocessor()”, “dsp.FIRInterpolator()”, “xcorr()”, “median()”, “Max()”, “idxloc” gibi sinyal işleme fonksiyonlarından faydalanılmıştır (MathWorks Inc., 2023a).

4. BULGULAR

Çalışmada kullanılan mikrofon dizilerine göre ses kayıtlarıyla elde edilen konum verileri içinden seçilen sonuçlar örnek olarak Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir. Konum verileri Matlab “round()” fonksiyonu ile yuvarlanarak tabloya aktarılmıştır. Sonuçların yaklaşık karşılaştırılması maksimum hata değerinin yüzdesi bulunarak yapılmıştır.

Çizelge 4.1. Düzenli dağılımlı mikrofon dizisi ile elde edilen deney sonuçları

Konum adı	Konum (x, y) cm	Tahmin edilen (x, y) cm
A - merkez	(0, 0)	(-1, 0)
B - Sol üst	(-70, 25)	(-60, 21)
C - Sağ üst	(60, 35)	(68, 29)
D - Sol alt	(-25, -30)	(-28, -25)
E - Sağ alt	(40, -15)	(36, -18)

Çizelge 4.2. Düzensiz dağılımlı mikrofon dizisi ile elde edilen deney sonuçları

Konum adı	Konum (x, y) cm	Tahmin edilen (x, y) cm
A - merkez	(0, 0)	(1, 0)
B - Sol üst	(-70, 25)	(-65, 23)
C - Sağ üst	(60, 35)	(63, 32)
D - Sol alt	(-25, -30)	(-24, -28)
E - Sağ alt	(40, -15)	(38, -14)

4.1. Farklı Mikrofon diziliminin ve Algoritmaların doğruluk oranına etkisi

Örnek olarak verilen değerlerde tahmin edilen konumlar ile kaynak konumu arasında hesaplanan maksimum hata oranı düzenli dağılımda $\pm\%16$ iken düzensiz dağılımlı mikrofonlarla yapılan deneyde $\pm\%12$ ’ye gerilemiştir. Ardışık yapılan diğer ölçümlerde hata oranı bir miktar değişmekte de olsa düzensiz dağılımlı mikrofon dizisi düzenli mikrofona göre genelde daha iyi sonuçlar vermiştir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Tez çalışmasının bulgularında görüldüğü gibi az sayıda mikrofon kullanılırken, mikrofon geometrisinin sonuçlara çok büyük bir etkisi olmasa da belirli açılarda sinyal örtüşmesi kaynaklı hatalı sonuçlardan kaçınılmasını sağlamıştır. Çalışmada kullanılan çapraz korelasyon ve enterpolasyon algoritması işlem yükünün diğer algoritmalara göre kısmen düşük olması ve gömülü sistemlere daha kolay entegre edilebilmesi nedeniyle taşınabilir sistemleri için yeterli düzeyde performans / doğruluk parametreleri belirlenerek tercih edilebilir.

Sistemin sonuçlarındaki doğruluk oranı merkezden alınan örnekler incelendiğinde merkezden uzak örneklere göre daha yüksektir. Bu durum aynı sistem ve mikrofon dizileri ile birlikte geniş açılı kamera veya iki kamera görüntüsü birleştirilerek oluşturulacak sistemde hata oranlarının mesafeyle birlikte yükseleceğini işaret etmektedir. Mikrofonların kaynağa olan mesafesinin artması tespit edilmek istenen sesin zayıflamasına ve daha önce bahsedilen sinyal/gürültü oranının (SNR) yükselmesine neden olacağı için aynı görüş açılarına sahip kamerayla bile daha uzak mesafeden yapılan ölçümler görüntü alanında yanlış noktada sızıntı tespiti yapılmasına neden olacaktır. Deneylerde tercih edilen düzlemler arası mesafenin 1.5 metre olduğu düşüldüğünde, bu uzaklıktaki objeler ile çalışmak endüstriyel ortamlar için yeterli kabul edilebilir. Farklı uygulamalar için ölçüm mesafesi ile görsel hata oranının karşılaştırılması ayrı bir çalışma konusu olarak ele alınabilir.

Önceden yapılmış kayıtlarla test edilen bu sistem, her işlenen kısa süreli pencere bölünmüş ses kaydının ardışık sonuçlarının görüntülenmesi ile kolay bir şekilde anlık ölçümler için de kullanılabilir. Deneylerde kullanılan algoritmaların bilgisayara olan işlem yükü ve gecikme süreleri göz ardı edilmiştir. Tek bir konumlama bilgisi için işlem süresi, alınan ses kaydının (tek pencere) uzunluğu, gecikmeler ve konum hesaplama süresi, bulunan değerin görüntü paneline aktarılması için geçen sürelerin toplamından oluşmaktadır. Görüntü panelindeki işaretlemenin yenileme hızı “FPS” bu toplam sürenin bir saniyeye oranı olduğu göz önünde bulundurulursa görüntü yenileme hızını sınırlayan en önemli etken pencereleme için kullanılan ses kaydının uzunluğudur.

Yapılan çalışmada 200ms uzunluğunda pencereler kullanıldığı düşünülürse işaretleme yenileme hızı 5fps'in altında kalacaktır. Bu değerin gerekenden düşük seçilmesi hata oranını hızla yükseltecektir. Problemin iyileştirilmesi için aralıkları ve sıralaması aynı olacak şekilde ve aynı merkezde konumlanmış ikinci bir mikrofon dizisi kullanılır ve sistem ardışık olarak konumlama verisi aktaracak şekilde tetiklenerek yenileme hızı bir önceki sistemin katı olarak arttırılabilir.

Daha önce bahsedilen çalışmalarda mikrofon sayısının işlem süresini arttırmasına rağmen hesaplama doğruluğuna büyük etkisi olduğu bilinmektedir. Mikrofon sayısının seçimi sistemin maliyeti, hız beklentisi ve sonuçların hassasiyeti parametreleri göz önünde bulundurularak yapılmalıdır.

Tez çalışmasında uygulaması yapılan sistem kapalı bir alanda basınçlı tanklar veya boru hatlarının sürekli sızıntı takibinde, beklemede olan bir endüstriyel sistemin üzerinde oluşan sızıntıların tespit edilmesinde kullanılabilir. Fakat açık alanda veya yüksek gürültülü ortamlarda (çalışmakta olan bir makine, çalışan bir kompresör, vb.), farklı gürültü türleri ve farklı boyutlardaki kapalı ortamda oluşacak yankı benzeri etkilere karşı dayanıklılığının gözlemlenmesi yine başka bir çalışma alanı oluşturur.

Özet olarak bu tez çalışması mikrofon dizileriyle oluşturulacak akustik kamera uygulamaları için belirlenen test koşulları altında alınmış karşılaştırmalı sonuçlar ile birlikte daha farklı koşullarda oluşabilecek sorunların öngörülebilmesini sağlayan bilgiler ve çözüme yönelik öneriler içermektedir.

KAYNAKLAR

- Analog Devices inc. (2013). *AD1974 4 ADC with PLL , 192 kHz , 24-Bit ADC (Datasheet)* (s. 24).
- Anonim. (2023a). *Lecture Notes Microphones* (C. 6, ss. 77–83). Commonwealth Educational Media Centre for Asia (CEMCA). https://www.cemca.org/ckfinder/userfiles/files/7_Lesson-06_MICROPHONES.pdf
- Anonim. (2023b). *Web*. <https://www.fluke.com/tr-tr/urun/endustriyel-goruntuleme/hassas-akustik-goruntuleme-cihazii910>
- Anonim. (2023c). *Web*. Teledyne FLIR LLC. <https://www.flir.com/products/si124/>
- Anonim. (2023d). *Web*. GmbH, CAE Software und Systems. <https://www.cae-systems.de/en/products/acoustic-camera-sound-source-localization/soundcam-20.html>
- Anonim. (2023e). *Web*. SONASCREEN® Acoustic Camera. <https://www.sonotecusa.com/products/preventive-maintenance/ultrasonic-testing-devices/acoustic-camera/>
- Benesty, J., Jingdong, C., & Yiteng, H. (2008). *Microphone Signal Processing* (J. Benesty & W. Kellermann (ed.)). SPRINGER TOPICS IN SIGNAL PROCESING. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-78612-2>
- Bhavana, D., Kishore Kumar, K., Vijay Kumar, Y., Naga Bhanu Maitreyee, N., Naga Jyothirmayi, R., & Ravi Tej, D. (2020). Sound source localization using 3D microphone array. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 9(3), 6234–6238.
- Claeson, L., Hansson, B., Ikdal, E., & Rosengren, W. (2015). *Localization of an Ultrasonic Sound Source with DSP*. 1–13.
- D H. Johnson, & D.E. Dudgeon. (1993). *Array Signal Processing Concepts and Techniques* (ALAN V. OPPENHEIM (ed.)). Prentice Hall Signal Processing Series.
- Damoulakis, M. (2018). *Department of Informatics Sound Source Localization Matthaïos Damoulakis*.
- Eret, P., & Meskell, C. (2012). Microphone arrays as a leakage detection tool in industrial compressed air systems. *Advances in Acoustics and Vibration*, November 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/689379>
- ERTAŞ, F. (2002). PRACTICAL ASPECTS OF BUILDING A SPEECH DATABASE FOR SPEAKER RECOGNITION SYSTEMS. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18, 34–43. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/236711>
- Gaber, M., Elnady, T., & Elsabbagh, A. (2018). Sound Source Localization in 360 Degrees Using a Circular Microphone Array. *Euronoise 2018 - Conference Proceedings*, 2613–2620.
- Holstein, P., Barth, M., & Probst, C. (2016). Acoustic methods for leak detection and tightness testing. *19th World Conference on Non-Destructive Testing*, 1–6. <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/>
- Kunin, V., Jia, W., Turqueti, M., Saniie, J., & Oruklu, E. (2011). 3D direction of arrival estimation and localization using ultrasonic sensors in an anechoic chamber. *IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS*, 756–759. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2011.0184>
- Marshall, G., Hydro, R., & Shafer, M. (1998). Compressed Air System Leaks. *Improving*

- Compressed Air System Performance A Sourcebook for Industry, Compressed*(April), 1–3.
- MATHIAS, K. (2023). *TYPES OF MICROPHONES: How They Work & What They Do Best*. <https://audiouniversityonline.com/types-of-microphones>
- MathWorks Inc. (2023a). *Live Direction of Arrival Estimation with a Linear Microphone Array*. <https://www.mathworks.com/help/audio/ug/live-direction-of-arrival-estimation-with-a-linear-microphone-array.html#AudioArrayDirectionOfArrivalEstimationExample-3>
- MathWorks Inc. (2023b). *Matlab Calibration Patterns*. <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/calibration-patterns.html>
- Menon, A., Kim, C., & Stern, R. M. (2017). Robust speech recognition based on binaural auditory processing. *Proceedings of the Annual Conference of the International Speech Communication Association, INTERSPEECH, 2017-Augus*, 3872–3876. <https://doi.org/10.21437/Interspeech.2017-1665>
- Meyer, A., & Döbler, D. (2006). Noise source localization within a car interior using 3D-microphone arrays. *Proceedings of the BeBeC, January 2006*, 1–7. http://bebec.eu/Downloads/BeBeC2006/Papers/BeBeC-2006-17_Meyer_Doebler.pdf
- Moeck, S. (2016). *Leckagemanagement Von druckluftsystemen mittels ultraschall* (s. 10). SONOTEC GmbH. https://www.sonotec.de/fileadmin/user_upload/business_units/2-preventive-maintenance/expertise/resources/deutsch/applikationsbeschreibung-lokalisierung-von-leckagen-sonotec.pdf
- OPPENHEIM, A. V., WILLISKY, A. S., & NAWAB, S. H. (1996). *SIGNALS and SYSTEMS* (A. V. Oppenheim (ed.); 2.). Prentice Hall Signal Processing Series.
- OPSAHL, T. (2000). Lecture 5.3 Camera Calibration. İçinde *The Photogrammetric Record* (C. 3, Sayı 16, ss. 376–376). University of OSLO. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.1960.tb01300.x>
- Radgen, P., & Blaustein, E. (2001). Compressed air system in the European Union. Energy, emissions, savings potential and policy actions. İçinde *Compressed air system in the European Union. Energy, emissions, savings potential and policy actions*. LOG X.
- STMicroelectronics. (2019). *STM32L476xx series (Datasheet)*.
- STMicroelectronics. (2020a). *IMP23ABSU High-performance MEMS microphone with extended frequency response up to 80 kHz for ultrasound applications (Datasheet)* (Sayı Eylül).
- STMicroelectronics. (2020b). *Microphone coupon board based on the IMP23ABSU analog MEMS microphone STEVAL-MIC007V1* (Sayı Kasım).
- STMicroelectronics. (2020c). *User manual Getting started with the X-NUCLEO-AMICAM1 analog MEMS microphone expansion board based on MP23ABS1 for STM32 Nucleo*.
- Stoica, P., & Moses, R. (2008). Spectral Analysis of Signals [Book Review]. İçinde T. Robbins (Ed.), *IEEE Signal Processing Magazine* (C. 24, Sayı 1). Prentice Hall. <https://doi.org/10.1109/msp.2007.273066>
- Yılmaz, M. (2016). A COMPREHENSIVE SIMULATION OF FACTORS THAT AFFECT PERFORMANCE OF ARRAY BASED ACOUSTIC GUNSHOT LOCALIZATION ON HELICOPTERS. İçinde *Analisis Nilai Moral Dalam Cerita Pendek Pada Majalah Bobo Edisi Januari Sampai Desember 2015* (Sayı February).

Middle East Technical University.
Zhengyou Zhang. (2008). A Flexible New Technique for Camera Calibration. İçinde
Technical Report MSR-TR-98-71 Microsoft (Sayı 13/08/2008).
<http://research.microsoft.com/~zhang>

