



**ARAÇ İÇİ SES SİSTEMLERİNDE AKUSTİK
PERFORMANSIN BENZETİM VE DENEYSEL VERİLER
KULLANILARAK METASEZGİSEL
ALGORİTMALARLA OPTİMİZASYONU**

Volkan BAŞAY



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ARAÇ İÇİ SES SİSTEMLERİNDE AKUSTİK PERFORMANSIN BENZETİM
VE DENEYSEL VERİLER KULLANILARAK METASEZGİSEL
ALGORİTMALARLA OPTİMİZASYONU**

Volkan BAŞAY
0009-0006-5604-942X

Prof. Dr. Güneş YILMAZ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

ARAÇ İÇİ SES SİSTEMLERİNDE AKUSTİK PERFORMANSIN BENZETİM VE DENEYSEL VERİLER KULLANILARAK METASEZGİSEL ALGORİTMALARLA OPTİMİZASYONU

Volkan BAŞAY

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Güneş YILMAZ

Bu tezde, SUV tipi bir aracın tam frekans hoparlör çıkışı, eşit ses yüksekliği konturları prensibine göre optimize edilerek araç içi akustik performans iyileştirilmiştir. Sistem bileşenlerinin frekans cevapları benzetim ortamına aktarılmış ve parametrik ekolayzır filtreler modellenmiştir. Bu bileşenler kaskat bir yapıda ele alınarak, hoparlör çıkışındaki işaret, frekans bölgesinde çarpma yöntemiyle hesaplanmıştır. Öncelikle, standartlarda tanımlanan ideal filtre parametreleri uygulanmış, benzetim ve deneysel ölçümler 0,9295 korelasyon katsayısı ve 2,29 kök karesel ortalama hata (RMSE) değeri ile yüksek uyum göstermiştir. Ancak, eşit ses yüksekliği konturu ile karşılaştırıldığında korelasyon 0,6341 ve RMSE ise 4,88 olarak hesaplanmıştır. Bu uyumsuzluğu gidermek için Genetik Algoritma (GA) ile parametrik ekolayzır filtreler optimize edilmiş olup, korelasyon katsayıları 0,9692 ve 0,9675'e yükselmiş, RMSE değerleri benzetim için 1,17'ye, deneysel ölçümler için 1,34'e düşmüştür. Bu iyileştirme, sürücü baş hizasında test edilmiş, ancak eşit ses yüksekliği konturuna tam uyum sağlanamamıştır. Bu testlerde korelasyon katsayıları 0,5552 ve 0,5510, RMSE değerleri 8,68 ve 5,25 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, sürücü baş hizasındaki çıkış işaretinin, eşit ses yüksekliği konturu ile uyumunun düşük olduğunu göstermektedir.

Sürücü baş hizasında eşit ses yüksekliği konturuna uyumu artırmak amacıyla, benzetime araç içi akustik etkileri içeren bir model dahil edilmiştir. Bu doğrultuda, deneysel tabanlı bir yöntemle araç içi akustik ortamın frekans cevabı oluşturulmuş ve optimizasyon sürecine entegre edilmiştir. Araç içi akustik ortamın frekans cevabının eklenmesinin ardından, GA ile yapılan optimizasyonda korelasyon katsayısı 0,6887'ye yükselmiş, RMSE ise 4,76'ya düşmüştür. Benzetim ve deneysel sonuçlar arasındaki korelasyon 0,8592 olarak hesaplanmıştır. Daha sonra, filtre parametrelerinin, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması ile de optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. PSO optimizasyonu sonucunda, korelasyon katsayıları 0,7111 ve 0,6779'a yükselmiş, RMSE değerleri 4,59 ve 4,04 olarak hesaplanmıştır. Benzetim ve deneysel sonuçlar arasındaki korelasyon katsayısı 0,8661 olarak hesaplanmıştır. PSO ile filtre optimizasyonu, GA'ya kıyasla sürücü baş hizasında daha başarılı bir akustik performans sağlamıştır. Ancak, yansımalar, absorpsiyon, rezonans etkileri ve doğrusal olmayan akustik özellikler nedeniyle eşit ses yüksekliği konturuna tam bir yakınsama sağlanamamıştır.

Anahtar Kelimeler: Araç içi akustik optimizasyon, parametrik ekolayzır filtreler, genetik algoritma (GA), parçacık sürü optimizasyonu (PSO)

2025, xvii + 118 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

OPTIMIZATION OF ACOUSTIC PERFORMANCE IN IN-VEHICLE AUDIO SYSTEMS WITH METAHEURISTIC ALGORITHMS USING SIMULATION AND EXPERIMENTAL DATA

Volkan BAŞAY

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

Supervisor: Prof. Dr. Güneş YILMAZ

In this study, the full-range speaker output of an SUV-type vehicle was optimized based on the principle of equal-loudness contours to enhance in-vehicle acoustic performance. The frequency responses of system components were incorporated into a simulation environment, and parametric equalizer filters were modeled in a cascaded structure. The speaker output signal was computed in the frequency domain using convolution. Initially, ideal filter parameters defined in standards were applied, and simulation results exhibited high agreement with experimental measurements, yielding a correlation coefficient of 0.9295 and an RMSE of 2.29. However, compared to the equal-loudness contour, the correlation decreased to 0.6341, and RMSE increased to 4.88. To address this discrepancy, parametric equalizer filters were optimized using a Genetic Algorithm (GA), improving the correlation coefficients to 0.9692 and 0.9675 while reducing RMSE values to 1.17 for simulation and 1.34 for experimental measurements. This optimization was tested at the driver's head position but did not fully comply with the equal-loudness contour, with correlation coefficients of 0.5552 and 0.5510 and RMSE values of 8.68 and 5.25. These results indicate that the output signal at the driver's head position exhibits low conformity to the equal-loudness contour.

To improve compliance at the driver's head position, a model incorporating in-vehicle acoustic effects was integrated into the simulation. The frequency response of the in-vehicle acoustic environment was obtained experimentally and incorporated into the optimization process. With this addition, GA-based optimization improved the correlation coefficient to 0.6887, while RMSE decreased to 4.76. The correlation between simulation and experimental results was 0.8592. Subsequently, filter parameters were further optimized using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, increasing correlation coefficients to 0.7111 and 0.6779 and reducing RMSE values to 4.59 and 4.04. The correlation between simulation and experimental result was improved to 0.8661. Compared to GA, PSO-based optimization yielded superior acoustic performance at the driver's head position. However, due to reflections, absorption, resonance effects, and nonlinear acoustic properties, full convergence to the equal-loudness contour could not be achieved.

Key words: In-vehicle acoustic optimization, parametric equalizer filters, genetic algorithm (GA), particle swarm optimization (PSO)

2025, xvii + 118 pages.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında yanımda olan, sevgisi ve inancını hiçbir zaman eksik etmeyen kıymetli çekirdek aileme ve geniş aileme en içten teşekkürlerimi sunarım. Onların sınırsız desteği, sabrı ve sevgisi, bu zorlu süreci başarıyla tamamlamamda en büyük motivasyon kaynağım olmuştur. Ayrıca doktora sürecim boyunca bana her zaman anlayış gösteren sevgili eşime ve her anımı güzelleştirerek masum gülümsemesiyle bana enerji veren oğluma da sonsuz sevgilerimi sunarım. Onların varlığı bu yolculuğu benim için daha anlamlı ve özel kılmıştır. Tüm destekleri için gönülden teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimim süresince hem akademik hem de kişisel gelişimim konusunda bana rehberlik eden, desteğini ve bilgisini her zaman cömertçe paylaşan değerli danışman hocam Prof. Dr. Güneş YILMAZ'a en derin teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin katkıları ve rehberliği olmadan bu çalışmayı tamamlamak mümkün olmazdı.

Tezimin gelişim sürecinde yol gösterici önerileri ve değerli yorumlarıyla çalışmama katkı sağlayan Tez İzleme Komitesi'nin saygıdeğer üyeleri Doç. Dr. Abdurrahman GÜNDAY ve Dr. Öğr. Üyesi Ekrem DÜVEN'e, doktora sürecim boyunca bilgi ve deneyimleriyle akademik gelişimime destek olan Dr. Oğuzhan COŞKUN'a teşekkürlerimi sunarım.

Volkan BAŞAY

.../.../.....

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
2.1. Ses ve Psikoakustik Algı.....	7
2.2. Ses Dalgalarının Temel Özellikleri.....	9
2.3. Ses Basıncı, Güç Düzeyleri ve Frekans Ağırlıklandırma.....	11
2.3.1. Ses Basıncı ve Ses Gücü	11
2.3.2. Frekans Ağırlıklandırma Eğrileri	13
2.4. Sesin Dalga Boyu ve Oktav	14
2.5. İnsan Kulağının Fizyolojik Yapısı ve Eşit Ses Yüksekliği Konturu.....	16
2.6. Araç İçi Ses Sistemleri	19
2.6.1. Hoparlörlerin Elektriksel ve Akustik Yapısı.....	20
2.6.2. Ekolayzır Türleri ve Kullanım Alanları	27
2.7. Metasezgisel Yöntemler.....	31
2.7.1. Genetik Algoritmanın İlkeleri.....	32
2.7.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritmasının İlkeleri	34
2.8. Kaynak Araştırması.....	36
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	43
3.1. Kullanılan Cihazlar ve Ölçüm Ekipmanları.....	43
3.2. Ses Ölçüm Metodolojisi.....	45
3.2.1. Hoparlör Çıkışının Ölçülmesi	47
3.2.2. Sürücü Baş Hızasında Mikrofon Ölçümleri	47
3.3. Sistem Bileşenleri ve Modellenmesi.....	51
3.3.1. Giriş İşareti.....	52
3.3.2. Parametrik Ekolayzır Filtreler.....	54
3.3.3. Kuvvetlendirici.....	57
3.3.4. Hoparlör	59
3.4. Tam Frekans Hoparlörün Sistem Çıkışının Modellenmesi ve Optimizasyonu.....	60
3.4.1. Benzetim Modeli.....	60
3.4.2. Benzetim Performans Ölçütleri.....	63
3.4.3. Hoparlör Çıkışının Eşit Ses Yüksekliği Konturu ile Uyumun İyileştirilmesi.....	64
3.5. Sürücü Baş Hızasındaki Çıkışın Modellemesi ve Eşit Ses Yüksekliği Konturu ile Uyumun İyileştirilmesi.....	66
3.5.1. Araç İçi Akustik Etkinin Modellenmesi ve Benzetim Modelinin Oluşturulması	67
3.5.2. Araç İçi Akustik Optimizasyonun Benzetim Performans Ölçütleri.....	71
3.5.3. Optimizasyon Algoritmaları ve Yapılandırma Ayarları	72
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	75
4.1. Genetik Algoritma Kullanarak Hoparlör Çıkışı Ölçümleri ve Analiz	75
4.1.1. Hoparlör Çıkışı Ölçümleri ve Analizleri.....	75
4.1.2. Hoparlör Çıkışı İçin Gerçekleştirilen Filtre Optimizasyonu Sonrası Benzetim ve Deney Bulguları	77

4.2. Sürücü Baş Hızı Benzetim ve Ölçümleri	83
4.2.1. Sürücü Baş Hızı Ölçümleri ve Analizleri	83
4.2.2. Genetik Algoritma ile Sürücü Baş Hızı Çıkışı İçin Gerçekleştirilen Filtre Optimizasyonu Benzetim ve Deney Bulguları	86
4.2.3. Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması ile Sürücü Baş Hızı Çıkışı İçin Gerçekleştirilen Filtre Optimizasyonu Benzetim ve Deney Bulguları	94
5. SONUÇ	104
5.1. Genetik Algoritma İle Hoparlör Çıkışı İçin Gerçekleştirilen Filtre Optimizasyonu ve Elde Edilen Sonuçlar.....	105
5.2.Genetik Algoritma İle Sürücü Baş Hızı İçin Gerçekleştirilen Filtre Optimizasyonu ve Elde Edilen Sonuçlar.....	107
5.3.Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması İle Sürücü Baş Hızı İçin Gerçekleştirilen Filtre Optimizasyonu ve Elde Edilen Sonuçlar.....	110
5.4. Genetik Algoritma ve Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritmasının Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi.....	112
5.5. Gelecek Çalışmalar	113
KAYNAKLAR	115
ÖZGEÇMİŞ	118

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Odanın toplam absorpsiyon katsayısı
A_F	Ses şiddeti
a_f	Ses yüksekliği algısının üssü
b	Giriş işareti
b_k	Giriş işaretini ağırlıklandırmak için filtre katsayısı
b_w	Bant genişliği
B_L	Manyetik kuvvet faktörü
$C_{xy}(f)$	Spektral uyumluluk
c	Yayılma hızı
c_1	Bilişsel katsayı
c_2	Sosyal katsayı
c_n	Parçacıkların doğru çekim katsayıları
Δp	Diyaframın ön ve arka yüzeylerindeki akustik basınç farkı
f	Frekans
f_0	Merkez frekansı
f_1	Alt sınır frekansı
f_2	Üst sınır frekansı
f_{max}	En yüksek frekans bileşeni
f_r	Rezonans frekansı
f_s	Örnekleme frekansı
G	Kazanç
$H(f)$	Sistemin transfer fonksiyonu
$H(z)$	Sistemin Z-dönüşümünde transfer fonksiyonunu
$h(t)$	Sistemin birim dürtü tepkisi
Hz	Hertz
I	Karşılıklı bilgi
j	İmajiner birimi
k	Membranın sertlik katsayısı
L_e	Ses bobininin endüktansı
L_p	Ses basıncı düzeyi
L_U	1000 Hz'de normalize lineer transfer fonksiyonunun büyüklüğü
L_W	Ses gücü düzeyi
m	Membranın kütlesi
M_m	Diyafram
p	Ölçülen ses basıncı
p_0	İnsan kulağının duyma eşiği ($20 \mu P_a$)
P_0	Ses basıncının genliği
$p(x)$	X'in marjinal olasılık dağılımı
$p(y)$	Y'in marjinal olasılık dağılımı
P_{arka}	Diyaframın arka yüzeylerindeki akustik basınç farkı
$P_{ön}$	Diyaframın ön yüzeylerindeki akustik basınç farkı
q	Diyaframdan yayılan hacimsel hız
Q	Yönelme katsayısı (Kalite faktörü)

r	Ses kaynağı ile ölçüm noktası arasındaki mesafe
R_e	Ses bobininin elektriksel direnci
r_n	Rastgele değerler
R_m	Mekanik direnç
RT_{60}	Sesin 60 dB azalması için geçen süre
$S_{xy}(f)$	Çapraz spektral yoğunluğu
t	Zaman
T	Periyod
V	Odanın hacmi
w	Atalet katsayısı
W	Ses gücü
$X(f)$	Frekans alanında giriş işareti
$x(t)$	Zaman alanında giriş işareti
$x[n]$	Giriş işareti
$Y(f)$	Frekans alanında çıkış işareti
$y[n]$	Çıkış işareti
$y(t)$	Zaman alanında çıkış işareti
Z_r	Radyasyon empedansı
10^{-12}	Referans güç değeri olarak kabul edilen standart seviye
α_f	Ses yüksekliği algılamasının üstel değeri
λ	Dalga boyu

Kısaltmalar	Açıklama
A/D	Analogdan Sayısala (Analog to Dijital)
C	Spektral Uyumluluk (Spectral Coherence)
Corr	Korelasyon (Correlation)
D/A	Sayısalan Analoga (Dijital to Analog)
dB	Desibel
dB(A)	Desibel Genlik
DSP	Sayısal İşaret İşleme (Digital Signal Processing)
FIR	Sonlu Darbe Yanıtı (Finite Impulse Response)
GA	Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)
IIR	Sonsuz Darbe Yanıtı (Infinite Impulse Response)
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü (International Organization for Standardization)
MI	Karşılıklı Bilgi (Mutual Information)
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
RMSE	Kök Ortalama Karesel Hata (Root Mean Square Error)
SNR	İşaret-Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio)
SPL	Ses Basınç Seviyesi (Sound Pressure Level)
STFT	Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (Short-Time Fourier Transform)
SUV	Sportif Kullanımlı Araç (Sport Utility Vehicle)
THD	Toplam Harmonik Distorsiyon (Total Harmonic Distortion)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. A, B ve C ağırlıklandırmaları için frekans ağırlıklı filtreler.....	13
Şekil 2.2. Frekans spektrumunda 1/1 oktav ve 1/3 oktav bantlarının analizi.....	16
Şekil 2.3. Saf tonlar için normal eşit ses yüksekliği konturları	19
Şekil 2.4. Araç ses sistemlerinde kullanılan hoparlör tiplerinin frekans eğrileri	20
Şekil 2.5. Hoparlörün elektriksel, mekanik ve akustik özelliklerini modelleyen eşdeğer devre.....	22
Şekil 3.1. Araç içi ses sisteminde hoparlör üzerinden ses ölçümü.....	46
Şekil 3.2. Araç içi ses sisteminde mikrofon kullanarak sürücü baş hizasında yapılan ses ölçümü.....	46
Şekil 3.3. Laboratuvar ortamında hoparlör çıkışı test düzeneği.....	47
Şekil 3.4. Koltuk ile ilişkili mikrofon konumları: (a) Koltuğun yandan görünümü, (b) Koltuğun üstten görünümü.....	48
Şekil 3.5. B-ağırlıklandırma filtresinin frekans cevabı.....	53
Şekil 3.6. Parametrik ekolayzır için $f_0=4000\text{ Hz}$, $Q=0,5$ ve $G=-3\text{ dB}$ değerleriyle oluşturulan filtre tasarımının genlik ve faz tepkisi	55
Şekil 3.7. Parametrik ekolayzır için $f_0=8000\text{ Hz}$, $Q=2,2$ ve $G=-3\text{ dB}$ değerleriyle oluşturulan filtre tasarımının genlik ve faz tepkisi	55
Şekil 3.8. D sınıfı kuvvetlendirici frekans cevabı.....	58
Şekil 3.9. Tam frekans hoparlörün frekans cevabı.....	59
Şekil 3.10 Hoparlör çıkış işaretinin uygunlaştırılması amacıyla, parametrik ekolayzır filtre parametre optimizasyonunu içeren benzetim modelinin blok diyagramı.....	62
Şekil 3.11. Araç içi akustik ortamın frekans cevabı eğrisi.....	69
Şekil 3.12. Sürücü baş hizasındaki işaretin uygunlaştırılması amacıyla, parametrik ekolayzır filtre parametre optimizasyonunu içeren benzetim modelinin blok diyagramı.....	70
Şekil 4.1. İdeal filtre parametreleri ile elde edilen hoparlör çıkışı benzetim sonuçlarının eşit ses yüksekliği konturu ile karşılaştırılması.....	75
Şekil 4.2. İdeal filtre parametreleri ile elde edilen hoparlör çıkışı için benzetim, deneysel ve eşit ses yüksekliği konturunun karşılaştırılması.....	76
Şekil 4.3. Optimize edilmiş filtre parametreleri ile elde edilen hoparlör çıkışı için benzetim, deneysel ve eşit ses yüksekliği konturunun karşılaştırılması	80
Şekil 4.4. İdeal filtre parametreleri ile elde edilen sürücü baş hizası akustik performans için benzetim, deneysel ve eşit ses yüksekliği konturunun karşılaştırılması.....	84

Şekil 4.5.	Hoparlör çıkışı için optimize edilmiş filtre parametreleri ile elde edilen sürücü baş hizası akustik performans için benzetim, deneysel ve eşit ses yüksekliği konturunun karşılaştırılması.....	84
Şekil 4.6.	Sürücü baş hizasından GA optimizasyonu sonucunda bulunan filtre parametreleri ile elde edilen benzetim, deneysel ve eşit ses yüksekliği konturunun karşılaştırılması.....	92
Şekil 4.7.	Sürücü baş hizasından PSO optimizasyonu sonucunda bulunan filtre parametreleri ile elde edilen benzetim, deneysel ve eşit ses yüksekliği konturunun karşılaştırılması.....	99



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. 1/1 oktav bantlarının merkez, alt ve üst frekansları.....	15
Çizelge 3.1. Parametrik ekolayzır tepe filtresinin çalışma aralıkları.....	43
Çizelge 3.2. ISO 226:2003 normu eşit ses yüksekliği konturu filtre değerleri	56
Çizelge 3.3. Genotip filtre parametreleri için alt ve üst sınır değerleri....	66
Çizelge 4.1. GA ile hoparlör çıkışı için gerçekleştirilen filtre parametreleri optimizasyonu sonucu elde edilen uygunluk değerleri	77
Çizelge 4.2. GA ile hoparlör çıkışı uygunluk değerlerinin istatistiksel analizi	78
Çizelge 4.3. GA ile optimize edilen filtre parametreleri sonrası hoparlör çıkışı için istatistiksel analiz sonuçları.....	79
Çizelge 4.4. 9. çalıştırmada hoparlör çıkışı optimizasyon sonucu ile elde edilen parametrik ekolayzır filtre parametreleri.....	80
Çizelge 4.5. GA ile sürücü baş hizası için gerçekleştirilen filtre parametreleri optimizasyonu sonucu elde edilen uygunluk değerleri	86
Çizelge 4.6. GA ile sürücü baş hizasındaki uygunluk değerlerinin istatistiksel analizi	87
Çizelge 4.7. GA ile optimize edilen filtre parametreleri sonrası sürücü baş hizası için istatistiksel analiz sonuçları.....	89
Çizelge 4.8. Sürücü baş hizası için GA ile optimize edilen parametrik ekolayzır filtre parametreleri.....	91
Çizelge 4.9. PSO ile sürücü baş hizası için gerçekleştirilen filtre parametreleri optimizasyonu sonucu elde edilen uygunluk değerleri	94
Çizelge 4.10 PSO algoritması ile sürücü baş hizasındaki uygunluk değerlerinin istatistiksel analizi	95
Çizelge 4.11 PSO ile optimize edilen filtre parametreleri sonrası sürücü baş hizası için istatistiksel analiz sonuçları	97
Çizelge 4.12 Sürücü baş hizası için PSO ile optimize edilen parametrik ekolayzır filtre parametreleri	99

1. GİRİŞ

Araç içinde gerçekleştirilen yaygın aktivitelerden biri müzik dinlemektir. Bu aktivite, sürücüler ve yolcular için bir eğlence kaynağı olmanın yanı sıra sürüş konforu ve genel yorgunluk seviyeleri üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Araştırmalar, araç içindeki sesin, sürücünün konforu ve yorgunluk düzeyi üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır (Paulraj vd., 2010). Bu bağlamda, araç içi sesin kalitesi, sürücü ve yolcuların deneyimini önemli ölçüde etkileyen kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte araç üreticileri ve ses sistemi tasarımcıları, sürücü yorgunluğunu en aza indirmeye yönelik ses kalitesiyle ilgili sistemleri iyileştirmek ve kullanıcı beklentilerini karşılamak için çeşitli stratejiler geliştirmektedir.

Araç içi ses kalitesinin dinleme deneyimine olan etkisi, ses mühendisliği ve psikoakustik ilkeler çerçevesinde değerlendirilmektedir (Howard ve Angus, 2013). Ses mühendisliği, ses sistemlerinin teknik tasarımıyla ilgilenirken; psikoakustik ilkeler, sesin insan algısı üzerindeki etkilerini anlamayı hedeflemektedir. Bu iki disiplinin birleşimi, araç içi ses kalitesinin değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle hoparlörlerden iletilen sesin, insan kulağının 20 Hz ile 20 kHz arasındaki frekanslara farklı duyarlılığını yansıtan eşit yükseklik konturuyla uyumluluğu, sesin netliği ve doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır (Rósciszewska vd., 2012). Bu uyumluluk, daha ayrıntılı ve zengin bir ses deneyimi sunarak sürücü ve yolcuların konfor düzeyini ve keyiflerini artırmaktadır.

Araştırmalar, eşit yükseklik konturuyla uyumlu olmayan ses sistemlerinin, uzun mesafeli yolculuklar sırasında sürücülerin yorgunluk ve stres düzeylerini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Bu durum, sürücülerin dikkat ve tepki sürelerini önemli ölçüde azaltarak genel yol güvenliğini riske atmaktadır (Reed vd., 2021). Dolayısıyla, araç içi ses sistemlerinin eşit yükseklik konturuna göre optimize edilmesi, yalnızca sürücü ve yolcu deneyiminin iyileştirilmesi açısından değil, aynı zamanda yol güvenliğinin artırılması bakımından da büyük bir önem taşımaktadır.

Araç içi ses optimizasyonunda yalnızca fiziksel ölçümler değil, insan algısına dayalı yöntemler de büyük önem taşımaktadır. Araç içi ses kalitesinin psikoakustik açıdan optimize edilmesi, ses dalgalarının fiziksel özellikleri ile insan kulağının algılama özelliklerinin bir arada ele alınmasını gerektirir. Bu bağlamda, ses basınç seviyesi (*SPL*), ses dalgalarının fiziksel şiddetini ölçmek için kullanılan temel bir birimdir. *SPL*'nin logaritmik bir ölçekle hesaplanması, ses basınç seviyelerinin kolayca karşılaştırılmasını mümkün kılmakla birlikte; bu ölçüm, insan kulağının farklı frekanslara olan duyarlılığını dikkate almaz. Dolayısıyla, *SPL* ölçümlerinin eşit yükseklik konturları doğrultusunda yapılan optimizasyonlarla birleştirilmesi hem araç içi ses kalitesinin hem de kullanıcı deneyiminin değerlendirilmesinde daha etkili bir yöntem sunmaktadır (Gerges, 2012).

Bununla birlikte, *SPL*'nin insan algısını yansıtmayan sınırlı yönleri, daha duyarlı değerlendirme yöntemlerini gerekli kılmaktadır. Bu eksikliği gidermek için, sesin algılanan yüksekliğini ifade eden bir ölçüm birimi olan "fon" kullanılmaktadır. Fon, yalnızca sesin fiziksel özelliklerini değil, aynı zamanda insan kulağının algısal özelliklerini de dikkate alan bir ölçüdür. Bu birim, frekanslara bağlı olarak sesin insan algısındaki şiddetini tanımlar ve insan kulağının frekansa bağlı değişen duyarlılıklarını temel alır. Farklı frekanslardaki seslerin algısal yüksekliği, fon birimiyle hesaplanmakta ve bu hesaplama, insan algısına göre ses yüksekliğini frekansa bağlı olarak tanımlayan Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) 226 standardında belirlenen eşit ses yüksekliği konturlarına dayanmaktadır.

Bu algısal fark, araç içi ses sistemlerinin tasarımında kritik bir öneme sahiptir ve psikoakustik optimizasyon süreçlerinin temelini oluşturmaktadır. Söz konusu optimizasyonlar, sürücülerin yorgunluk seviyelerini azaltarak dikkat sürelerini artırabilir ve genel yol güvenliğini iyileştirebilir (Zwicker ve Fastl, 2007).

Araç ses sisteminde, hoparlör çıkışının eşit ses yüksekliği konturuna uygun olabilmesi için farklı frekans aralıklarının hassas bir şekilde düzenlenmesi gerekmektedir. Bu düzenleme, ses işaretlerinin belirli frekans aralıklarındaki seviyesini ayarlayan ekolayzırlar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Ekolayzırlar, grafik ekolayzır, sayısal

ekolayzır ve parametrik ekolayzır olmak üzere üç temel türe ayrılmaktadır. Grafik ekolayzır, kullanıcıların önceden belirlenmiş frekans bantlarında ses seviyelerini elle ayarlamalarına olanak tanımaktadır. Sayısal ekolayzır ise, karmaşık bir teknoloji kullanan, araç hızı, motor gürültüsü gibi faktörlere bağlı olarak ses profilini otomatik şekilde ayarlayan, gelişmiş sürücü destek sistemlerine yönelik bir sistemdir. Parametrik ekolayzır, ses işaretlerinin belirli frekans aralıklarındaki genliğini değiştirmek için kullanılan, yüksek derecede ayarlanabilir bir ses işleme filtresidir. Bu filtre, merkez frekans, kazanç ve kalite (Q) faktörü üzerinden üç düzeyde hassas kontrol sunar. Bu detaylı kontrol yeteneği, parametrik ekolayzırı, hoparlör çıkışının eşit ses yüksekliği konturu prensibine göre ayarlanması açısından diğer türlere kıyasla daha uygun hâle getirmekte ve araç içi eğlence sistemlerinde öne çıkarmaktadır (Winer, 2017).

Araç içi ses sistemi; araç içi eğlence sistemi, kuvvetlendiriciler, hoparlörler, kablolar ve bağlantı elemanları gibi birçok farklı bileşenden oluşan karmaşık bir yapıya sahiptir. Her bir bileşen, sistem genelindeki frekans cevabını çeşitli şekillerde etkileyebilmekle birlikte, en kritik değişiklikler hoparlörler tarafından gerçekleştirilmektedir. Tek bir hoparlör, tüm frekanslar için mükemmel performans sergileyemediğinden, kaliteli ses sistemlerinde farklı frekans bölgeleri için özel olarak tasarlanmış hoparlörler bir arada kullanılmaktadır. Günümüzde araçlarda, bas altı, bas, orta frekans, tam frekans ve tiz gibi çeşitli hoparlör türleri bulunmaktadır. Bu hoparlörlerin her biri, belirli frekans aralıklarında farklı tepkiler verdiği için, araç ses sistemlerinin optimizasyonu sırasında ekolayzır ayarları her hoparlör tipi için ayrı ayrı ele alınmalıdır (Golla, 2016).

Araç içi eğlence sistemlerinde, eşit ses yüksekliği konturuna uyum sağlamak amacıyla filtre parametrelerinin ayarlanması ve hoparlör çıkışının ses analizörü ile ölçülmesi, optimizasyon sürecinin temel adımları arasında yer almaktadır. Ancak bu adımlar, elle yapılan ayarlamalara ve deneysel yöntemlere dayalı olması nedeniyle, detaylı ve zahmetli bir süreç oluşturmaktadır. Optimum sonucun elde edilebilmesi için tekrarlı analizler yapılması gerekmekte, sonuçların subjektif gözlemlerle değerlendirilmesi, istenen akustik seviyelere ulaşmada tutarlılık sağlanmasını zorlaştırmaktadır (Golla, 2016).

Eşit ses yüksekliği konturu, geniş bir frekans aralığını kapsadığından, hassas ayarlamalar yapabilmek için araç içi eğlence sistemlerinde genellikle birden fazla parametrik ekolayzır filtresi kullanılmaktadır. Her bir filtrenin üç parametre ile kontrol edilmesi gerektiği dikkate alındığında, araç içi ses sistemlerinin optimizasyonu, özellikle farklı hoparlör türlerinin her biri için oldukça karmaşık bir süreç hâline gelmektedir.

Bu zorlukları aşmak için, çoklu parametrik ekolayzır filtrelerinin optimizasyonunda bilgisayar destekli modelleme ve benzetim teknolojilerinin kullanımı, araç içi ses sistemlerinin tasarım sürecinin verimliliğini ve etkinliğini artırma potansiyeli taşımaktadır. Özellikle, bilgisayar destekli matematiksel modelleme yazılımlarının sağladığı filtre tasarım olanakları, işaret işleme teknikleriyle gerçekleştirilen benzetimlerle sistemin frekans cevabının hesaplanması ve istatistiksel yöntemlerle eşit ses yüksekliği konturuna uygunluğun değerlendirilmesi, optimizasyon sürecini hem hızlandırmakta hem de basitleştirmektedir.

Bu modern yaklaşımlar, deneysel yöntemlerin neden olduğu zaman kaybı ve karmaşıklık sorunlarını aşarak, araç içi ses sistemlerinin tasarım ve ayar süreçlerinin iyileştirilmesi için detaylı analiz imkânı sunmaktadır (Von Tuerckheim ve Münch, 2014).

Baş hizası için filtre parametrelerinin optimizasyonunun gerekliliği, araç içi akustik deneyimin sürücü odaklı bir şekilde düzenlenmesini zorunlu kılmaktadır. Hoparlör çıkışlarının eşit ses yüksekliği konturuna göre ayarlanması gerekliliği temel bir adım olmakla birlikte, sürücü koltuğu gibi belirli pozisyonlardaki ses algısının değerlendirilmesi, daha dengeli ve tatmin edici bir akustik düzenleme için kritik bir aşamayı oluşturmaktadır. Bu bağlamda, araç içerisinde baş hizasındaki SPL'nin eşit ses yüksekliği konturuyla uyumlu hâle getirilmesi, sürücü ve yolcuların bireysel işitme algılarına uygun bir akustik ortam yaratılmasını sağlamaktadır.

Baş hizasında gerçekleştirilen ölçümler, araç içindeki ses dalgalarının yönelimi, yansıma özellikleri ve frekans bileşimindeki değişimlerin hassas bir şekilde analiz

edilmesine olanak tanımaktadır. Bu süreçte parametrik ekolayzır filtrelerinin kullanımı, hoparlör çıkışlarının ve baş hizasındaki akustik dengenin sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu optimizasyon, araç içindeki sürücü konumuna özgü akustik ihtiyaçların belirlenmesini ve bu ihtiyaçlara uygun frekans cevaplarının düzenlenmesini mümkün kılmaktadır.

Filtre parametrelerinin ayarlanması sırasında akıllı algoritmaların kullanımı, optimizasyon sürecini daha ileri bir seviyeye taşıma potansiyeline sahiptir. Metasezgisel algoritmalar ve yapay sinir ağları gibi yöntemler, parametre seçimlerinde yüksek doğruluk ve verimlilik sağlayarak eşit ses yüksekliği konturuna uygun filtre kombinasyonlarını optimize etmek için kullanılabilir. Bu akıllı algoritmalar, elle yapılan deneme-yanılma yöntemlerine kıyasla ideal frekans cevabının hızlı ve maliyet-etkin bir şekilde elde edilmesini sağlayarak, akustik ayarlama zaman ve kaynak kullanımını önemli ölçüde azaltmaktadır (Pepe vd., 2022).

Bu tez çalışmasında, sportif kullanımlı araç (SUV) tipi bir aracın ses sisteminde yer alan tam frekans hoparlörlerin, eşit ses yüksekliği konturu prensibine göre metasezgisel algoritmalar yardımıyla optimize edilmesi ve araç içi akustik performansın sürücü baş hizasında iyileştirilmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, giriş sesi, kuvvetlendirici ve hoparlörün frekans cevapları benzetim ortamına aktarılmıştır. 1/1 oktav bantlarında ideal işitme eğrisi için standartlarda tanımlanan filtre parametre değerleri kullanılarak on adet parametrik ekolayzır modeli oluşturulmuştur. Modeller frekans alanında tanımlandığı için konvolüsyon işlemi doğrudan çarpma olarak uygulanmış ve hoparlör çıkışları bu yöntemle elde edilmiştir. Aynı filtre ayarları araç içi eğlence sistemine uygulanmış, deneysel sonuçlar benzetimlerle karşılaştırılarak modelin güvenilirliği test edilmiştir.

Hoparlör çıkışı ölçümlerinin eşit ses yüksekliği konturuyla uyumunu değerlendirmek amacıyla, korelasyon ve kök ortalama karesel hata (RMSE) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, hoparlör çıkışı ile hedef frekans cevabı arasındaki benzerliği istatistiksel olarak incelemiş ve filtre parametrelerinin performansını değerlendirmede temel metrikler olarak kullanılmıştır. Filtre parametreleri, eşit ses

yüksekliği konturuna yakından uyacak şekilde iteratif bir süreçle optimize edilmiştir. Optimizasyon sürecinde, parametrik ekolayzır filtrelerinin merkez frekansı, kazancı ve Q faktörü, genetik algoritma (GA) kullanılarak optimize edilmiştir. GA, toplamda on üç kez çalıştırılmış ve her çalışmadan elde edilen farklı filtre parametreleri deneysel olarak incelenmiştir.

Hoparlör çıkışındaki işaret, araç içindeki yansıma, emilim ve yönelim gibi akustik etkiler nedeniyle baş hizasında değişikliğe uğramaktadır. Bu durum, optimizasyon sürecini doğrudan etkilemektedir. Bu etkilerden kaynaklanan değişiklikleri düzenlemek ve daha doğru bir optimizasyon sağlamak amacıyla araç içi akustik etkilerin benzetim modeline dahil edilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda, hoparlör çıkışı ile baş hizasında alınan ses ölçümleri arasındaki etkileşimi temsil eden araç içi akustik ortam frekans cevabı oluşturulmuştur. Transfer fonksiyonunun elde edilmesi için sistem, yirmi beş farklı rastgele filtre konfigürasyonu ile test edilmiştir. Her bir deneyde, hoparlör çıkışından doğrudan ölçülen işaret ile baş hizasındaki mikrofon ölçümlerinden elde edilen işaretin oranı alınmış ve bu oranların geometrik ortalaması hesaplanarak nihai transfer fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu yöntemle araç içi akustik etkiler, modele başarılı bir şekilde entegre edilmiştir.

Baş hizasındaki ses algısının eşit ses yüksekliği konturuyla uyumunu değerlendirmek amacıyla, korelasyon ve RMSE analizlerine ek olarak, karşılıklı bilgi ve spektral uyumluluk istatistiksel analiz yöntemleri de kullanılmıştır. Bu ek analizler, ölçülen ve hedeflenen frekans cevapları arasındaki benzerliği daha kapsamlı bir şekilde değerlendirmek ve metasezgisel algoritmaların uygunluk fonksiyonunu iyileştirmek için benzetim modeline entegre edilmiştir.

Son olarak, araç içi akustik ortam frekans cevabı ile geliştirilmiş bu benzetim modelinde, parametrik ekolayzır filtre parametreleri hem GA hem de PSO kullanılarak optimize edilmiştir. Her iki algoritma, toplamda on üç kez çalıştırılarak farklı senaryolar oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar deneysel olarak uygulanarak benzetimlerle karşılaştırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Ses ve Psikoakustik Algı

Ses, kulak tarafından algılanabilen basınç dalgalanmaları şeklinde ortaya çıkan ve dalgalar halinde yayılan bir enerji formudur. Elektronik mühendisliği perspektifinden ses, analiz edilmesi, işlenmesi ve manipüle edilmesi gereken bir işaret olarak ele alınır. İşaret işleme teknikleri, sesin frekans, genlik, dalga boyu ve yayılma hızı gibi temel parametrelerinin belirlenmesini sağlar. Sesin yayılması için hava, su veya katı maddeler gibi bir ortam gereklidir. Bu ortamlarda, titreşen parçacıklar enerjilerini komşu parçacıklara aktarır. Ortamın yoğunluğu, sıcaklığı ve yapısı, sesin yayılma hızını ve yönünü etkileyerek dalgaların fiziksel özelliklerini şekillendirir.

İnsan kulağının ses algısı, dış ortamdan gelen ses dalgalarının kulak yapıları aracılığıyla iç kulağa iletilmesi, bu dalgaların sinirsel işaretlere dönüştürülmesi ve beynin bu işaretleri işlemesiyle gerçekleşir. Beyin, bu işaretleri analiz ederek sesin frekansı ve yoğunluğu gibi özelliklerini belirler. 20 Hz ile 20 kHz arasındaki frekans aralığında duyarlı olan insan kulağı, farklı frekansları bas ve tiz tonlar olarak algılar. Bu algı, frekansların fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterir.

Ses algısı yalnızca fiziksel niteliklerle değil, aynı zamanda psikoakustik ilkelerle de şekillenir. Psikoakustik, sesin insan kulağı ve beyni tarafından nasıl algılandığını inceleyen bir bilim dalıdır ve ses dalgalarının fiziksel özelliklerinin ötesinde, sesin bireyler üzerindeki algısal etkisini ve beynin bu algıya verdiği tepkileri araştırır. Psikoakustik ilkeler, araç içi akustik optimizasyonu, ses kalitesi değerlendirmesi ve gürültü yönetimi gibi uygulamalarda sıkça kullanılarak, kullanıcıya daha dengeli ve tatmin edici bir işitsel deneyim sunulmasını sağlar (Zwicker ve Fastl, 2007).

Psikoakustik, insan kulağının ses algısını şekillendiren temel mekanizmaları anlamamıza olanak tanır. Bu bağlamda, sesin algılanmasında önemli rol oynayan başlıca prensipler şu şekilde özetlenebilir:

- Frekans Algısı: İnsan kulağı, farklı frekansları çeşitli tonlar olarak algılar; ancak bu algılama doğrusal değildir. Örneğin, 100 Hz ile 200 Hz arasındaki fark, 1000 Hz ile 1100 Hz arasındaki farktan daha belirgin hissedilir. Bu doğrusal olmayan algı, araç içi ses sistemlerinin optimizasyonunda dengeli bir frekans dağılımı sağlamak açısından önemlidir.
- Ses Şiddeti Algısı: Fiziksel olarak ölçülen ses şiddeti ile algılanan şiddet arasında fark vardır. İnsan kulağı, farklı frekansları çeşitli hassasiyetlerle algılar; özellikle düşük ve yüksek frekanslarda bu hassasiyet farklılığı belirgindir. Fletcher-Munson eğrileri, bu hassasiyet değişimlerini grafiksel olarak açıklayarak mühendislik uygulamalarında yol gösterici bir rol üstlenir.
- Maskeleye: Güçlü bir sesin, aynı anda çalınan daha zayıf bir sesi maskeleye etkisi vardır. Bu özellik, özellikle frekansları yakın olan seslerde belirginleşir ve psikoakustik veri sıkıştırma algoritmalarında ve araç içi gürültü yönetiminde kullanılmaktadır.
- Haas Etkisi: İki farklı kaynaktan gelen sesler arasında kısa bir zaman farkı olduğunda, beyin ilk duyulan sesi ana kaynak olarak algılar. Bu etki, araç içi ses sistemlerinde sesin doğal ve dengeli algılanmasını sağlamak açısından önem taşır.
- Lokalizasyon: İnsan kulağı, sesin kaynağını belirlemek için zaman farkı, şiddet farkı ve spektral farklılıklardan yararlanır.
- Harmonik Yapı Algısı: İnsan kulağı, temel frekans ve harmonikleri algılayarak sesin karakteristik özelliklerini belirler. Harmonikler, bir sesin tınısını oluşturarak sesin tanınmasını sağlar.
- Kritik Bantlar: İnsan kulağı, frekans spektrumunu yaklaşık 24 "kritik bant" olarak adlandırılan bölümlere ayırır. Bu bantlar, araç içi ses dağılımının dengeli sağlanması ve işitsel deneyimin iyileştirilmesi amacıyla kullanılır.

Psikoakustik ilkelerin araç içi ses sistemlerine uygulanması, bu sistemlerin tasarımı ve optimizasyonunda önemli bir rol oynar. Bu ilkeler, akustik mühendisliğinde kullanıcı deneyimini iyileştirmek için vazgeçilmez unsurlar arasında yer almaktadır (Howard ve Angus, 2009).

2.2. Ses Dalgalarının Temel Özellikleri

Ses, bir enerji formu olarak mekanik dalgalar hâlinde yayılır ve çevresel faktörlere bağlı olarak farklı fiziksel özellikler sergiler. Bu özellikler, sesin hareketini, algılanmasını ve etkilerini anlamak için temel bir çerçeve sunar. Ses dalgalarının temel özellikleri şunlardır (Everest ve Pohlmann, 2009):

- **Frekans (f):** Ses dalgalarının saniyede yaptığı titreşim sayısıdır ve birimi Hertz (Hz) olarak ifade edilir. Frekans, sesin perdesini belirler; düşük frekanslar bas, yüksek frekanslar ise tiz sesler olarak algılanır. İnsan kulağı, $20\ Hz$ ile $20\ kHz$ arasındaki frekansları duyabilir.
- **Genlik:** Ses dalgasının maksimum titreşim genliği, sesin şiddetini belirler. Daha büyük genlik, daha yüksek ses şiddetine karşılık gelir. Genlik, ses dalgalarının enerjisiyle doğrudan ilişkilidir.
- **Hız (v):** Sesin bir ortamda yayılma hızı, ortamın yoğunluğuna ve elastik özelliklerine bağlıdır. Hava gibi gazlarda yaklaşık $340\ m/s$, su gibi sıvılarda $1500\ m/s$ ve katılarda ise çok daha yüksek hızlarda yayılır.
- **Dalga Boyu (λ):** Ses dalgasının bir döngüsünün uzunluğu dalga boyu olarak adlandırılır ve frekansla ters orantılıdır.
- **Yoğunluk ve Basınç:** Ses dalgaları, ortamda bir basınç değişimi oluşturarak yayılan bir tür boyuna dalgadır. Dalgaın oluşturduğu basınç dalgalanmaları, sesin algılanabilirliğini ve şiddetini etkiler.
- **Yansıma, Kırılma ve Soğurma:** Ses dalgaları bir yüzeye çarptığında yansıma meydana gelirken, ortam değişimlerinde kırılma gerçekleşir. Ayrıca, ses dalgaları yüzeyler tarafından soğurularak enerjinin bir kısmını kaybeder.

Bu temel özellikler, sesin fiziksel dünyadaki davranışlarını anlamamız için bir temel oluşturur.

Sesin bu özellikleri, serbest ve kapalı alanlardaki yayılım davranışlarını belirler. Serbest alanlarda, ses bir noktadan başlayarak tüm yönlere eşit bir şekilde yayılırken, kapalı alanlarda yansımalar ve yankılanma gibi ek faktörler devreye girer. Bu iki farklı

ortamda sesin yayılımını detaylı olarak incelemek, akustik tasarımlar ve mühendislik uygulamaları açısından kritik önem taşımaktadır.

Serbest alanda ses, bir noktadan homojen olarak tüm yönlere yayılacak şekilde varsayılır. Bu durumda ses basıncı düzeyi (L_P), mesafeye göre azalır ve yayılma, r^2 yasası olarak bilinen prensibe göre gerçekleşir. Serbest alan, sesin herhangi bir engelle karşılaşmadan yayıldığı açık bir ortam olarak tanımlanır. Uzaklık arttıkça, ses kaynağının gücüne bağlı olarak birim alana düşen ses enerjisi azalır; bu durum, sesin mesafeyle birlikte zayıflamasına neden olur.

Serbest alan için ses basıncı düzeyi Denklem (2.1) ile hesaplanmaktadır.

$$L_P = L_W - 20 \log_{10}(r) - 10 \log_{10}(Q) \quad (2.1)$$

(2.1)'de, L_P ses basıncı düzeyini (dB), L_W ses gücü düzeyini (kaynağın toplam çıkış gücü, dB), Q yönelme katsayısını ve r ses kaynağı ile ölçüm noktası arasındaki mesafeyi (m) ifade eder (Kinsler vd., 1999).

Kapalı alanlarda ses, serbest alandaki gibi doğrudan yayılmak yerine, duvarlar ve diğer yüzeylerden gelen yansımalarla birleşerek yankılanmaya neden olur. Bu yansımalar, ses basıncı düzeyini artırarak kapalı alanlarda sesin daha uzun süre algılanmasına yol açar. Kapalı alanlarda sesin yayılma özelliklerini değerlendirmek için yankılanma süresi ve soğurulma katsayısı gibi parametreler dikkate alınır.

Kapalı alanlarda yankılanma süresi (RT_{60}), sesin algılanabilirlik süresi ve mekânın akustik özellikleri üzerinde belirleyici bir etkidir. Yankılanma süresi genellikle Sabine formülü kullanılarak belirlenir ve Denklem (2.2) ile hesaplanmaktadır.

$$RT_{60} = \frac{0.161 \times V}{A} \quad (2.2)$$

Burada, RT_{60} sesin 60 dB azalması için geçen süreyi, V odanın hacmini (m^3), A sabin cinsinden odanın toplam absorpsiyon katsayısını ifade eder.

Uzun bir RT_{60} değeri, odada yankının fazla olduğunu ve bu durumun konuşma anlaşılabilirliğini olumsuz etkileyebileceğini gösterir. Buna karşılık, kısa bir RT_{60} değeri, sesin daha fazla soğurulması nedeniyle yankının hızlıca azalması anlamına gelir.

Kapalı alanlardaki ses basıncı düzeyi, odanın hacmi ve yüzeylerin ses soğurma özelliklerine bağlı olarak artış göstermektedir. Kapalı alanlardaki ses basıncı düzeyi Denklem (2.3) ile hesaplanmaktadır.

$$L_P = L_W + 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi r^2 + 4A} \right) \quad (2.3)$$

Denklem (2.3), kapalı alanlarda sesin yayılmasını daha doğru bir şekilde temsil eder. Bu denklem, ses kaynağından yayılan enerjinin bir kısmının yüzeylerden yansıdığını, bir kısmının ise yüzeyler tarafından soğurulduğunu dikkate alır. Soğurma katsayısı (A), odadaki yüzeylerin ses enerjisini emme kabiliyetini ifade eder ve sesin ortamdaki yankılanma seviyesini belirler.

Soğurma katsayısının artırılması, sesin ortamda yankı oluşturmada kaybolmasını sağlayarak akustik kaliteyi iyileştirir. Denklem 2.3'ün bu parametreleri içermesi, kapalı alanlardaki ses basıncı düzeyinin hassas bir şekilde hesaplanmasını mümkün kılmaktadır (Kuttruff, 2009).

2.3. Ses Basıncı, Güç Düzeyleri ve Frekans Ağırlıklandırma

2.3.1. Ses Basıncı ve Ses Gücü

Ses basıncı, bir ses kaynağının çevresinde oluşturduğu basınç değişimlerini ifade eder ve ortamın akustik özelliklerine, kaynağın gücüne ve kaynağa olan uzaklığa bağlı olarak değişir. Ses gücü (W), bir ses kaynağından birim zamanda yayılan toplam akustik

enerjiyi temsil eder ve kaynağın akustik etkinliğini doğrudan tanımlar. Ancak, ses gücü ile ses basıncı arasındaki ilişki doğrusal değildir; bu ilişki logaritmik bir ölçekle ifade edilmektedir.

İnsan kulağının algıladığı sesin yoğunluğu, kaynağın ses gücüyle bağlantılıdır. Ancak bu algı, ortamın özellikleri, uzaklık ve diğer fiziksel faktörler nedeniyle farklılık gösterebilir. Dolayısıyla, ses basıncı ve ses gücü, ses dalgalarının fiziksel davranışlarını anlamak için birbirini tamamlayan iki temel parametredir.

Bir ses kaynağının yaydığı enerjinin gücü, ses gücü düzeyi L_W olarak adlandırılır ve bu düzey belirli bir referans değere göre logaritmik olarak tanımlanır. L_W , Denklem (2.4) ile hesaplanmaktadır.

$$L_W = 10 \log \left(\frac{W}{10^{-12}} \right) \quad (2.4)$$

Burada ses gücü (W), birim zamanda yayılan toplam akustik enerjiyi ifade ederken, 10^{-12} sabit değeri, referans güç değeri olarak kabul edilen standart seviyeyi temsil etmektedir.

Ses basınç düzeyi L_P , belirli bir referans basınç değeri kullanılarak hesaplanır ve bu hesaplama Denklem (2.5) ile gerçekleştirilir.

$$L_P = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad (2.5)$$

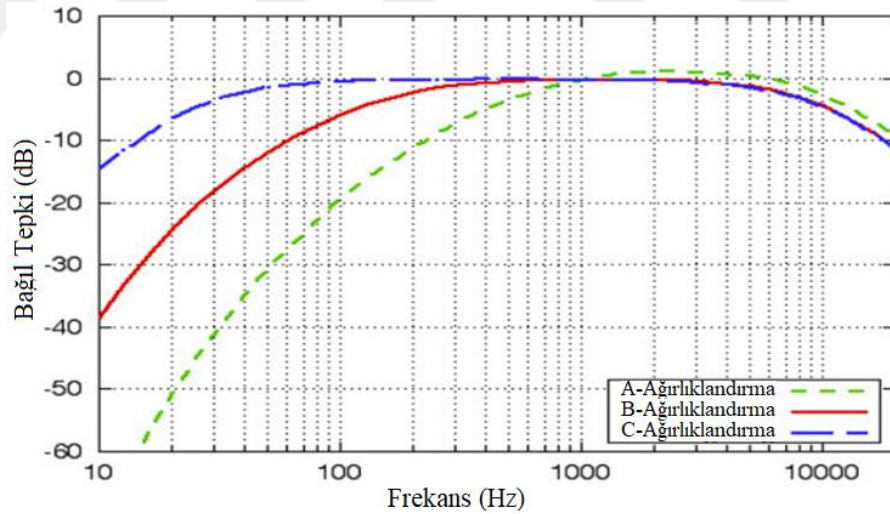
Burada p ölçülen ses basıncını, p_0 $20 \mu P_a$ olarak kabul edilen referans basınç değerini ve insan kulağının duyma eşiğini temsil etmektedir.

Ses basıncını P_a cinsinden ölçülmesi, genellikle büyük sayılarla ifade edilmesi gerektiği için pratik değildir. Bu nedenle, desibel (dB) ölçeği kullanılarak ölçüm sonuçları daha anlaşılır ve karşılaştırılabilir bir forma dönüştürülür (Taş, 2010).

2.3.2. Frekans Ağırlıklandırma Eğrileri

Frekans ağırlıklandırma eğrileri, insan kulağının farklı frekanslardaki seslere olan duyarlılığını dikkate alarak ses basınç seviyelerinin değerlendirilmesini sağlar. Bu nedenle, akustik analizörler insan kulağının frekanslara olan duyarlılığını taklit edebilmek için frekans ağırlıklandırma eğrilerini kullanır. İnsan kulağı, düşük frekanslara kıyasla, orta ve yüksek frekanslara karşı daha hassas bir algıya sahiptir. Bu durum göz önünde bulundurularak, her frekans bandındaki ses basıncı düzeyi, insan kulağının duyarlılığına göre ağırlıklandırılır ve toplam ses seviyesi bu doğrultuda hesaplanır (Head Acoustics, 2017).

A, B ve C ağırlıklandırma ölççekleri, ses ölçümlerinde kullanılan farklı frekans tepki filtreleridir. Şekil 2.1'deki A, B ve C ağırlıklandırma eğrileri, insan kulağının frekansa bağlı değişken hassasiyetini göstermek için kullanılır ve her frekansta algılanan ses düzeyini bu doğrultuda ayarlayarak değerlendirme yapılmasını sağlar.



Şekil 2.1. A, B ve C ağırlıklandırmaları için frekans ağırlıklı filtreler.

Ağırlıklandırma eğrileri, farklı frekanslardaki seslerin insan kulağı üzerindeki etkisini değerlendirmede önemli bir rol oynar. Bu eğriler sayesinde, gürültü denetimi ve insan sağlığına uygun ses seviyelerinin belirlenmesi mümkün hâle gelir.

A, B ve C ağırlıklandırma eğrilerinin kullanım alanları ve belirli ses seviyelerine uygunlukları şu şekilde açıklanabilir:

- A Ağırlıklandırma: 40 $dB(A)$ ve altındaki düşük ses seviyelerinde kullanılır. İnsan kulağının düşük ses seviyelerine verdiği tepkiyi daha doğru bir şekilde yansıtır ve genellikle çevresel gürültü ve işitme sağlığıyla ilgili ölçümlerde tercih edilir. Bu ölçek, düşük ve yüksek frekanslardaki sesleri azaltırken 500 Hz ile 10 kHz arasındaki frekanslarda daha hassastır. Bu özellik, A ağırlıklandırmayı gündelik çevresel ses ölçümleri için ideal kılar.
- B Ağırlıklandırma: Orta düzeyde ses seviyeleri (yaklaşık 70 $dB SPL$) için uygundur. B ağırlıklandırma eğrisi, insan kulağının orta ses seviyelerindeki duyarlılığını temsil etmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu ölçek, orta frekanslardaki sesleri biraz daha fazla vurgular ve bu nedenle sinema ve müzik prodüksiyonları gibi ortamlarda kullanışlıdır.
- C Ağırlıklandırma: 100 $dB SPL$ ve üzerindeki yüksek ses seviyelerinde insan kulağının duyarlılığını dikkate alır. Geniş bir frekans aralığında daha düz bir tepki sağlar ve düşük ile yüksek frekanslardaki sesler neredeyse orijinal seviyelerinde ölçülür. Özellikle endüstriyel uygulamalarda ve yüksek düzeyde gürültü ölçümlerinde tercih edilir (Sutton vd., 1994).

Bu ağırlıklandırma eğrileri, farklı ses seviyelerine göre insan kulağının duyarlılığını yansıtacak şekilde geliştirilmiştir. A, B ve C ağırlıklandırma eğrilerinin her biri, ses seviyesinin ölçülmesi ve değerlendirilmesinde doğru ve kapsamlı analiz yapılmasına olanak tanır (Head Acoustics, 2017).

2.4. Sesin Dalga Boyu ve Oktav

Bir dalga, dalga boyu (λ) kadar bir mesafeyi, periyodu (T) boyunca kat eder. Bu durumda, dalganın yayılma hızı (c), dalga boyu ve periyot arasındaki ilişkiye göre Denklem (2.6)'da gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$c = \frac{\lambda}{T} \quad (2.6)$$

Oktav, bir frekans ile o frekansın iki katı veya yarısı olan frekanslar arasındaki aralık olarak tanımlanır. Örneğin, 1000 Hz ile 2000 Hz arasındaki fark bir oktavdır. Bu aralık, sesin farklı frekans aralıklarında düzenlenmesi ve analiz edilmesi için temel bir yöntemdir. Oktav bandında, üst sınır frekansı (f_2) alt sınır frekansının (f_1) iki katıdır ve her bandın üst sınır değeri, bir sonraki bandın alt sınır değeri olarak kabul edilir. Oktav bantlarının merkez frekansı (f_0), alt ve üst sınır değerlerinin geometrik ortalaması olarak hesaplanır. Oktav bant frekansları arasındaki ilişki, Denklem (2.7) ile hesaplanmaktadır.

$$f_2 = 2f_1 \text{ ve } f_0 = \sqrt{2}f_1 = \frac{f_2}{\sqrt{2}} \quad (2.7)$$

Bant genişliği (b_w), alt ve üst sınırlar arasındaki fark olarak tanımlanır ve Denklem (2.8) ile hesaplanmaktadır.

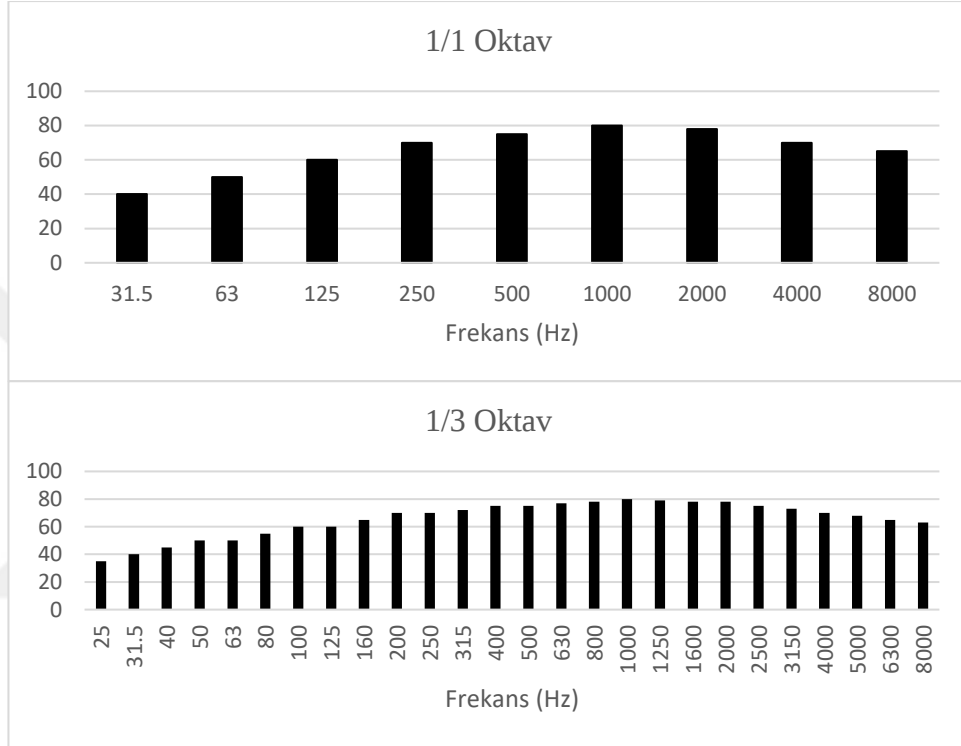
$$b_w = f_2 - f_1 \quad (2.8)$$

Standart 1/1 oktav bantlarının merkez frekansları sırasıyla 31,5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz, 8000 Hz ve 16000 Hz'dir. Bu bantların alt ve üst sınır değerleri, Çizelge 2.1'de verilmiştir (ISO, 1997).

Çizelge 2.1. 1/1 oktav bantlarının merkez, alt ve üst frekansları

Merkez Frekans (Hz)	Alt Sınır Frekansı (Hz)	Üst Sınır Frekansı (Hz)
31,5	22	44
63	44	88
125	88	177
250	177	355
500	355	710
1000	710	1420
2000	1420	2840
4000	2840	5880
8000	5880	11360
16000	11360	22720

Daha hassas analizler gerektiren durumlar için 1/3 veya 1/12 oktav analizleri de kullanılabilir. 1/3 oktav bantları, merkez frekans çevresinde yaklaşık %70 bir bant sağlayarak, insan kulağının algılayabileceği frekans değişimlerini daha ayrıntılı bir şekilde yakalamaya olanak tanır. Şekil 2.2'de, 1/1 ve 1/3 oktav bantları arasındaki farklar gösterilmektedir (Taş, 2010).



Şekil 2.2. Frekans spektrumunda 1/1 oktav ve 1/3 oktav bantlarının analizi.

2.5. İnsan Kulağının Fizyolojik Yapısı ve Eşit Ses Yüksekliği Konturu

İnsan kulağı, çevresindeki ses dalgalarını fiziksel ve biyolojik bir süreçle algılar. Bu süreç, üç temel bölge olan dış kulak, orta kulak ve iç kulak aracılığıyla gerçekleşmektedir.

Dış kulak, çevreden gelen ses dalgalarını toplayarak, bu dalgaları kulak zarına iletir. Kulak zarı, ses dalgalarının basıncıyla titreşerek bu dalgaları mekanik titreşimlere dönüştürür. Mekanik titreşimler, matematiksel olarak Denklem (2.9) ile ifade edilmektedir.

$$p(t) = P_0 \sin(2\pi ft) \quad (2.9)$$

Burada, P_0 ses basıncının genliğini, f ses dalgasının frekansını, t zamanı ifade etmektedir. Bu titreşimler, Denklem (2.10) ile mekanik kuvvet olarak formüle edilmektedir.

$$F = P(t).A \quad (2.10)$$

Burada, A kulak zarının yüzey alanını (m^2) ifade etmektedir. Bu kuvvet, kulak zarından işitme kemiklerine aktarılmaktadır. Orta kulakta yer alan çekiç, örs ve üzengi kemikleri, titreşimleri daha da güçlendirerek iç kulakta bulunan kokleaya iletmektedir. Kokleanın sıvıyla dolu yapısı, titreşimlerin enerjisini yoğunlaştırarak içindeki sıvının hareketini sağlamaktadır.

Kokleanın içinde yer alan baziler membran, ses dalgalarını frekanslarına göre ayrıştıran kritik bir yapıdır. Baziler membranın belirli bölgeleri, belirli rezonans frekanslarına (f_r) duyarlıdır. Bu rezonans frekansı, Denklem (2.11) ile hesaplanmaktadır.

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.11)$$

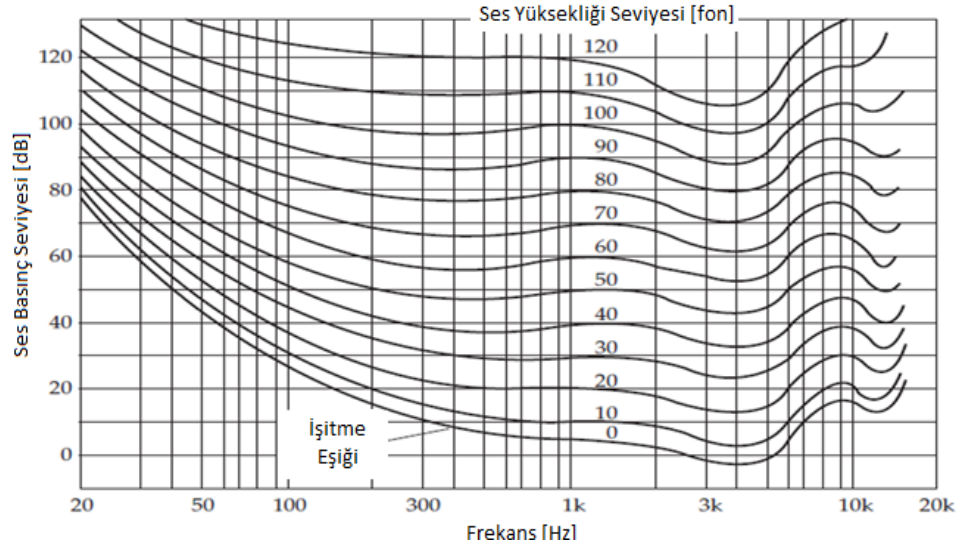
Burada, k membranın sertlik katsayısını ifade etmekte olup frekansla doğru orantılı olarak değişmektedir. m ise membranın kütesini (g) temsil etmekte olup frekansla ters orantılı olarak değişmektedir.

Yüksek frekanslar, baziler membranın kokleanın başlangıç kısmında daha fazla titreşim oluştururken, düşük frekanslar kokleanın uç kısmında titreşim meydana getirmektedir. Bu durum, insan kulağının ses frekanslarını algılama mekanizmasını belirleyen temel bir etkidir. Dolayısıyla, baziler membranın rezonans frekansı, insan kulağının algılayabileceği frekans aralıklarını tanımlamaktadır (Pickles, 2012).

İnsan kulağının farklı frekanslardaki sesleri algılama duyarlılığı, kulağın fizyolojik yapısından kaynaklanmaktadır. Bu algılama mekanizması sonucunda, farklı frekanslardaki seslerin eşit düzeyde algılanabilmesi için farklı şiddet seviyelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu prensip, deneysel çalışmalarla modellenerek Eşit Ses Yüksekliği Konturları ile ifade edilmiştir.

Bu modeller, insan kulağının en duyarlı olduğu 1000 *Hz* referans alınarak geliştirilmiştir. Eşit ses yüksekliği konturları, farklı frekanslardaki bir sesin, 1000 *Hz* referans frekanstaki bir sesle eşit algılanabilmesi için gereken ses basıncı seviyelerini göstermektedir. Bu eğriler, ISO 226 standardı ile standart hâle getirilmiş olup akustik tasarımlar için bir referans olarak kabul edilmektedir (Başay vd., 2024).

İnsan kulağının duyarlılığı frekansa bağlı olarak değiştiğinden, yalnızca fiziksel bir ölçüm olan ses basıncı seviyesi (*dB SPL*), algılanan ses şiddetini tam olarak yansıtmaz. Bu nedenle, algılanan ses şiddetini daha doğru bir şekilde ifade etmek için fon birimi geliştirilmiştir. Fon birimi, insan kulağının frekansa bağlı duyarlılık farkını dikkate alarak bir sesin algılanan şiddet seviyesini 1000 *Hz*'deki referans tonun algılanan şiddetiyle kıyaslayarak ölçmektedir. Örneğin, 50 fon olarak belirtilen bir ses, 1000 *Hz*'de 50 *dB SPL* ses basıncı seviyesine eşit algılanmaktadır. Eşit ses yüksekliği konturları, farklı fon seviyelerine karşılık gelen algılama düzeylerini tanımlamaktadır. Şekil 2.3, ISO 226 standardında tanımlanmış olan bu konturları göstermektedir.



Şekil 2.3. Saf tonlar için normal eşit ses yüksekliği konturları.

2.6. Araç Ses Sistemleri

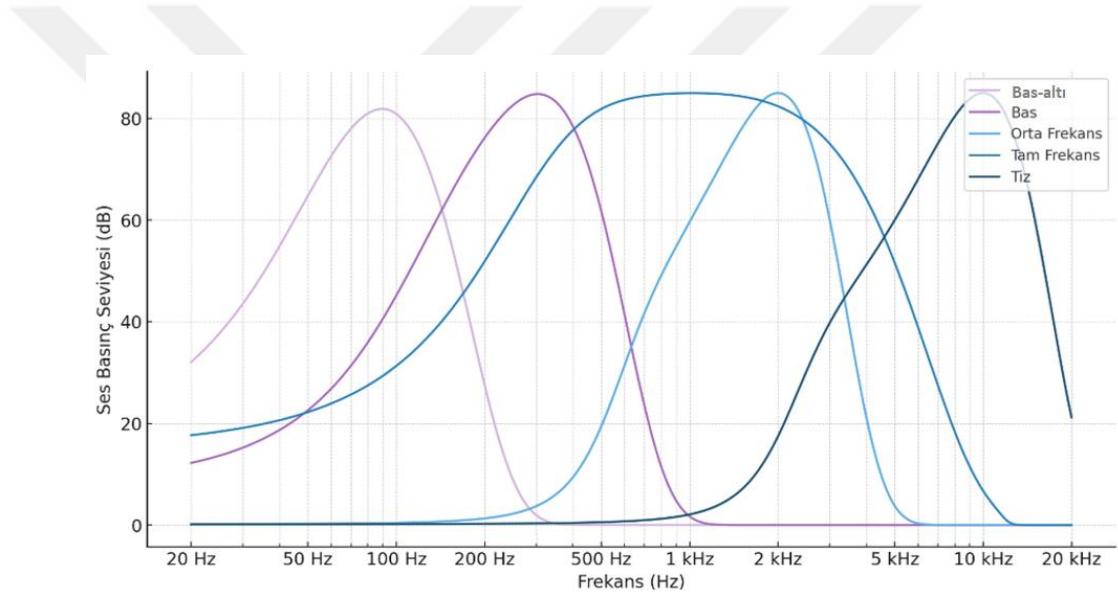
Modern araç ses sistemleri, kullanıcı deneyimini iyileştirmek ve araç içinde yüksek kaliteli bir ses ortamı sağlamak amacıyla tasarlanmış kompleks sistemlerdir. Bu sistemler, sesin doğru ve dengeli bir şekilde iletilmesi için birbirleriyle uyum içinde çalışan birçok bileşenden oluşmaktadır. Araç içi ses sistemlerinin temel bileşenleri; ses oynatıcılar, hoparlörler ve ekolayzırlardır.

Ses oynatıcılar, ses kaynaklarını işleyerek uygun formatlarda ileten ve sistemin temel yapı taşı olarak görev yapan bileşenlerdir. Hoparlörler, elektrik işaretlerini ses dalgalarına dönüştürerek bu işaretleri fiziksel dünyaya aktarırken, ekolayzırlar sesin frekans bileşenlerini düzenleyerek akustik denge sağlamaktadır. Bu bileşenlerin her biri, araç içindeki farklı akustik ihtiyaçları karşılamak üzere özelleştirilmiş şekilde tasarlanmaktadır.

Hoparlörler, ses frekanslarının geniş bir aralığında çalışacak şekilde çeşitli türlere ayrılmaktadır. Bu çeşitlilik, düşük, orta ve yüksek frekansların her birini en iyi şekilde temsil etmeyi amaçlamaktadır. Ekolayzırlar ise araç içi akustik optimizasyonu sağlayarak farklı frekansların kullanıcı tercihlerine ve ortam koşullarına göre ayarlanmasını mümkün kılmaktadır.

2.6.1. Hoparlörlerin Elektriksel ve Akustik Yapısı

Hoparlörler, elektriksel işaretleri ses dalgalarına dönüştüren elektro-akustik dönüştürücülerdir. Araç içi ses sistemlerinde kullanılan hoparlörler, geniş bir frekans aralığında doğru ve dengeli bir ses deneyimi sunmak için tasarlanmış farklı türlerde olabilir. Her hoparlör türü, belirli bir frekans aralığında optimal performans sağlamak üzere özelleştirilmiştir. Araç ses sistemlerinde hoparlörler temelde, orta ve yüksek frekansları kapsayacak şekilde dört ana kategoriye ayrılmakta olup toplamda beş çeşit hoparlör kullanılmaktadır. Hoparlörlerin etkili olduğu frekans bölgeleri Şekil 2.4'te açıklanmaktadır.



Şekil 2.4. Araç ses sistemlerinde kullanılan hoparlör tiplerinin frekans eğrileri

Bas altı hoparlörler, yalnızca en düşük frekansları yeniden üretmek için tasarlanmış olup genellikle 20 Hz ile 200 Hz arası frekanslarda etkilidir.

Bas hoparlörler, 40 Hz ile 500 Hz arasında çalışarak düşük frekanslı sesleri yeniden üretmektedir. Bu hoparlörler, geniş çaplı diyaframları sayesinde daha fazla hava hareketi sağlayarak araç içi ses sistemlerinde güçlü bas sesleri üretmektedir.

Orta frekans hoparlörler, 250 Hz ile 2000 Hz arasındaki orta frekanslı sesleri yeniden üretmek üzere tasarlanmıştır. Bu frekans aralığı, insan seslerini ve birçok müzik

enstrümanının frekanslarını içerdüğinden, orta frekans hoparlörler araç içi ses sistemlerinde kritik bir rol oynamaktadır.

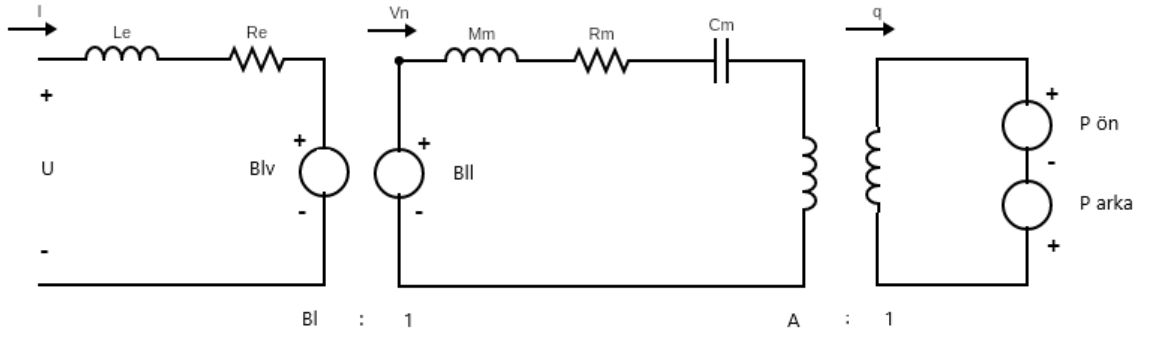
Tiz hoparlörler, 2000 *Hz* ile 20.000 *Hz* arasındaki yüksek frekansları yeniden üretmektedir. Küçük boyutları ve hafif diyaframları sayesinde tiz hoparlörler, yüksek frekanslarda hızlı tepki vererek net ve ayrıntılı ses üretimi sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde, yüksek frekanslardaki ayrıntılar daha net bir şekilde duyulabilmektedir.

Tam frekans hoparlörler, tüm duyulabilir frekans spektrumunu tek bir sürücü üzerinden yeniden üretebilmek üzere tasarlanmıştır. Bu hoparlörler, basitlik ve taşınabilirlik avantajı sunmakla birlikte, geniş bir frekans aralığını tek bir sürücü ile kapsama çabası nedeniyle düşük ve yüksek frekanslarda performans sınırlamaları yaşayabilmektedir (Aksoy ve Yılmaz, 2020).

Hoparlör türlerindeki bu çeşitlilik, araç içindeki her bir frekans aralığının, uygun bir sürücü tarafından en iyi şekilde temsil edilmesini sağlamaktadır. Bu sayede, araç içi ses sistemleri, daha dengeli ve detaylı bir ses üretimi sunmaktadır.

Hoparlörlerin çalışma prensibi ve performansı, elektriksel, mekanik ve akustik özelliklerini modelleyen eşdeğer devreler yardımıyla analiz edilebilmektedir. Bu modelleme, hoparlörlerin belirli frekans aralıklarında nasıl davrandığını anlamak ve optimize etmek açısından kritik öneme sahiptir. Eşdeğer devre modeli, hoparlörün elektriksel girişten akustik çıkışa kadar tüm fiziksel süreçlerini temsil etmektedir. Bu süreçler üç ana başlık altında incelenebilmektedir: Elektriksel bileşenler, mekanik bileşenler ve akustik bileşenler.

Hoparlörlerin elektriksel, mekanik ve akustik özelliklerini temsil eden eşdeğer devre Şekil 2.5'te verilmiştir. Bu devre, hoparlörün girişinden (elektriksel) çıkışına (akustik) kadar tüm süreçleri kapsamlı bir şekilde modellemektedir.



Şekil 2.5. Hoparlörün elektriksel, mekanik ve akustik özelliklerini modelleyen eşdeğer devre.

Elektriksel bölüm, hoparlörün ses bobini üzerinden akan elektrik akımını ve bu akımın hoparlörün empedansı üzerindeki etkisini modellemektedir. Hoparlörün elektriksel empedansı (Z_e), ses bobininin elektriksel direnci (R_e) ve endüktansı (L_e) tarafından belirlenmekte olup Denklem (2.12) ile hesaplanmaktadır.

$$Z_e = R_e + j\omega L_e \quad (2.12)$$

Burada ω açısal frekansı temsil etmekte olup $2\pi f$ ile hesaplanmaktadır. R_e , ses bobininin doğru akıma karşı gösterdiği direnci ifade etmekte olup hoparlörün gücünü doğrudan etkilemektedir. Yüksek R_e değerleri termal kayıplara yol açarken, düşük R_e değerleri hoparlörün enerji verimliliğini artırmaktadır. L_e , ses bobininin endüktansını temsil etmekte olup empedansın frekansa bağlı olarak artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, tiz hoparlörlerde L_e , düşük tutulurken, bas hoparlörlerde genellikle daha yüksek değerler tercih edilmektedir.

Hoparlör devresinde uygulanan toplam gerilim (U), hem hoparlörün elektriksel empedansı üzerinde oluşan gerilimi hem de geri elektromotor kuvvetini ($B_L\vartheta$) içermektedir. Uygulanan gerilim, Denklem (2.13) ile hesaplanmaktadır.

$$U = Z_e I + B_L \vartheta \quad (2.13)$$

Burada, $B_L \vartheta$ hoparlörün mekanik hareketinden kaynaklanan geri elektromotor kuvvetini (geri EMF) temsil etmektedir. Geri EMF, hoparlör diyaframının manyetik alan içerisinde hareketi sırasında indüklenen bir gerilimdir. Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasasına göre, geri EMF, hoparlör diyaframının hızı (ϑ) ile manyetik kuvvet faktörünün (B_L) çarpımına eşittir. Geri EMF devrede bir karşı gerilim oluşturarak akım üzerinde doğrudan bir etki yaratmakta ve hoparlörün toplam elektriksel davranışını değiştirmektedir. Manyetik kuvvet faktörü (B_L), hoparlörün elektriksel enerjisini mekanik harekete dönüştüren temel bir parametredir. Yüksek B_L değeri, ses bobininden geçen akımın diyafram üzerinde daha büyük bir kuvvet oluşturmasını sağlamaktadır. Bu ilişki, Denklem (2.14) ile hesaplanmaktadır.

$$F = B_L I \quad (2.14)$$

Bu nedenle, B_L hoparlör tasarımında hassas bir şekilde optimize edilmelidir. Diyaframın doğru ve hızlı hareketi, sesin daha hassas ve doğru bir şekilde üretilmesine katkı sağlamaktadır.

Hoparlör devresinde geri EMF'nin varlığı hem mekanik hem de elektriksel bileşenler arasındaki dinamik etkileşimi yansıtmaktadır. Geri EMF, hoparlörün empedansını artırarak yüksek frekanslarda daha belirgin hâle gelmekte ve bu durum hoparlörün performansını doğrudan etkilemektedir. Hoparlörün elektriksel devre tasarımı, empedans, geri EMF ve manyetik kuvvet faktörünün etkilerini dikkate alarak frekans cevabını kontrol etmede kritik bir rol oynamaktadır (Allard ve Atalla, 2009).

Mekanik bölüm, hoparlör diyaframının hareketini ve bu hareketin kontrolünü temsil etmektedir. Hoparlörün mekanik empedansı (Z_m), diyaframın hareketine karşı gösterdiği toplam zorluğu ifade etmekte olup üç ana bileşenden oluşmaktadır: Diyaframın kütlesi (M_m), süspansiyonun esnekliği (C_m) ve hareket sırasında oluşan enerji kayıplarını temsil eden mekanik direnç (R_m). Z_m , Denklem (2.15)'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$Z_m = j\omega M_m + \frac{1}{j\omega C_m} + R_m \quad (2.15)$$

M_m , hoparlör diyaframı, ses bobini ve süspansiyon gibi hareketli parçaların toplam kütesini temsil etmektedir. Daha yüksek M_m değerine sahip hoparlörler, düşük frekanslarda daha iyi performans gösterebilmektedir. Örneğin, bas altı hoparlörler yüksek M_m değerleri ile daha güçlü bas frekanslar üretmek üzere tasarlanmaktadır. Ancak, M_m 'nin yüksek olması, diyaframın hızlı hareket etmesini zorlaştırarak yüksek frekanslardaki performansı olumsuz etkileyebilmektedir.

R_m , hoparlör diyaframının hareketi sırasında oluşan enerji kayıplarını ifade etmektedir. Bu direnç, hareket sırasında sürtünme ve sönümleme etkilerinden kaynaklanmaktadır. Yüksek R_m değerleri, ses verimliliğini azaltarak enerji kaybına neden olabilmektedir. Ancak, aynı zamanda diyafram hareketinin kontrolüne yardımcı olarak, istenmeyen rezonansların önlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

C_m , hoparlörün süspansiyon sisteminin esnekliğini ifade etmektedir. Yüksek C_m değerleri, diyaframın düşük frekanslarda daha iyi hareket etmesini sağlayarak güçlü bas sesleri üretmesine katkıda bulunmaktadır. Ancak, esnekliğin artması, yüksek frekanslarda diyaframın hızlı ve hassas kontrolünü zorlaştırabilmektedir. Bu nedenle, tiz hoparlörlerde düşük C_m ve sert bir süspansiyon tercih edilirken, bas hoparlörlerde daha yüksek C_m değerleri kullanılmaktadır.

Z_m , frekansa bağlı olarak değişmekte olup, farklı frekans aralıklarında farklı bileşenler baskın hâle gelmektedir. Düşük frekanslarda, mekanik kütle (M_m) ve süspansiyon (C_m) empedans üzerinde daha etkili olurken, yüksek frekanslarda mekanik direnç (R_m) belirleyici hâle gelmektedir. Bu durum, hoparlörlerin belirli bir frekans aralığında en iyi performansı gösterecek şekilde tasarlanmasını gerektirmektedir.

Diyaframın hızı (V_n), hoparlörün mekanik davranışını ve ürettiği ses dalgalarının niteliğini etkileyen önemli bir parametredir. Diyafram hızı, Denklem (2.14)'te açıklanan

mekanik kuvvet (F) ile mekanik empedans (Z_m) arasındaki ilişkiye bağlı olup, Denklem (2.16) ile hesaplanmaktadır.

$$V_n = \frac{F}{Z_m} \quad (2.16)$$

Bu ilişki, hoparlör diyaframının farklı frekans aralıklarında nasıl tepki verdiğini açıklamaktadır. Düşük frekanslarda, C_m ve M_m diyafram hareketinde baskın hâle gelirken, yüksek frekanslarda R_m diyafram hızını sınırlayan ana faktör olmaktadır. Diyafram hızı, hoparlörün ses basıncını ve frekans tepkisini doğrudan etkileyerek, performansın optimize edilmesi gereken kritik bir parametresi olarak öne çıkmaktadır.

Hoparlörün mekanik bileşenlerinin optimize edilmesi, hedeflenen frekans aralığında en iyi performansın sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Örneğin, orta frekans hoparlörleri, M_m ve C_m 'nin dengeli bir tasarıma sahip olması sayesinde hem bas hem de tiz frekanslarda tatmin edici bir performans sunabilmektedir. Bas altı hoparlörlerde, daha yüksek M_m ve C_m değerleri güçlü bas seslerinin üretilmesi için uygunken; tiz hoparlörlerde düşük M_m ve C_m , diyaframın hızlı ve hassas bir şekilde hareket etmesini sağlamaktadır. Tam frekans hoparlörlerde ise M_m ve C_m değerleri, geniş bir frekans aralığını kapsayacak şekilde orta seviyelerde dengelenmektedir. Bu tasarım, basitlik ve taşınabilirlik avantajı sunmakla birlikte, özellikle düşük ve yüksek frekanslarda performans sınırlamaları yaratabilmektedir (Enggaard, 2007).

Akustik bölüm, hoparlör diyaframından yayılan ses dalgalarının oluşumunu ve bu dalgaların çevresel akustik etkilerle etkileşimini temsil etmektedir. Hoparlörün akustik empedansı (Z_r), hoparlör diyaframının, çevresindeki havayı nasıl etkilediğini ve ses dalgalarının ortama aktarılma verimliliğini belirlemektedir. Akustik empedans, diyaframın ön ve arka yüzeyleri çevresel basınç farkı (Δp) ile hacimsel hız (q) dikkate alınarak Denklem (2.17) ile hesaplanmaktadır.

$$Z_r = \frac{\Delta p}{q} \quad (2.17)$$

Burada, Δp , hoparlör diyaframının ön ve arka yüzeyler arasındaki akustik basınç farkını ifade etmektedir. Bu basınç farkı, hoparlörün diyafram hareketinin ürettiği ses dalgalarının gücünü ve yönünü belirlemektedir. Hacimsel hız (q), hoparlör diyaframından yayılan hava miktarını ifade eder ve hoparlörün ürettiği toplam ses enerjisiyle doğrudan ilişkilidir.

Diyaframın yüzey alanı (A), hoparlörün ürettiği ses basıncı seviyesini (P) belirleyen önemli bir parametredir. Daha büyük diyafram alanına sahip hoparlörler, özellikle düşük frekanslarda daha yüksek ses basıncı üretebilmektedir. Örneğin, bas altı hoparlörlerde, diyafram alanı büyük tutularak güçlü bas sesleri elde edilmektedir. Buna karşılık, tiz hoparlörlerde daha küçük diyaframlar kullanılarak, hızlı ve hassas hareket sağlanmaktadır.

Hoparlörün akustik empedansı (Z_r), ses dalgalarının havaya aktarılmasını etkileyen çevresel bir yükü temsil etmektedir. Yüksek Z_r değerleri, hoparlörün çevresel dirence karşı ses dalgalarını üretmekte zorlanmasına ve bu nedenle ses seviyesinin düşmesine yol açmaktadır. Bu nedenle, özellikle bas altı hoparlörlerde, düşük frekanslarda daha verimli performans elde edebilmek için Z_r 'nin optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Hoparlörün akustik bileşenleri, farklı frekans aralıklarında verimli ses üretimini sağlamak amacıyla optimize edilmektedir. Örneğin, bas altı hoparlörlerde büyük bir diyafram alanı (A) ve düşük akustik empedans (Z_r) ile güçlü ve derin bas sesleri üretmek amaçlanmaktadır. Buna karşılık, tiz hoparlörlerde, daha küçük bir diyafram ve daha yüksek frekanslarda daha iyi radyasyon sağlamak için optimize edilmiş akustik bileşenler tercih edilmektedir. Orta frekans hoparlörlerinde ise diyafram alanı ve empedans dengelenerek hem bas hem de tiz frekanslarda tatmin edici bir performans sunulması hedeflenmektedir.

Hoparlörün toplam performansı, empedansın frekansa bağlı değişimi, rezonans frekansı ve harmonik üretimi gibi birden fazla faktör tarafından belirlenmektedir. Hoparlörün rezonans frekansı (f_0), diyaframın kütlesi (M_m) ve süspansiyonun esnekliği (C_m) ile

doğrudan ilişkilidir. Bu rezonans frekansı, hoparlörün mekanik sisteminin doğal titreşim frekansını ifade etmekte olup, Denklem (2.18) ile hesaplanmaktadır.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_m C_m}} \quad (2.18)$$

Mekanik rezonans frekansı, hoparlörün düşük frekanslardaki tepkisini etkileyen kritik bir parametredir. Rezonans frekansı çevresinde, empedans genellikle minimum seviyeye inmekte ve hoparlör bu frekansta en verimli şekilde çalışmaktadır. Düşük frekanslarda, empedansı belirleyen ana bileşenler, mekanik kütle (M_m) ve süspansiyon (C_m) olmaktadır. Bu durum, diyaframın geniş hareket genlikleriyle güçlü bas sesleri üretmesini sağlamaktadır.

Frekans arttıkça, hoparlörün empedans karakteristiği, elektriksel bileşenlerin etkisiyle değişmektedir. Yüksek frekanslarda, ses bobininin doğru akım direnci (R_e) ve endüktansı (L_e) hoparlör empedansı üzerinde baskın hâle gelmektedir. Bu, hoparlörün tiz frekanslardaki performansını belirleyen önemli bir faktördür. Empedansın elektriksel ve mekanik bileşenlerinin frekansa bağlı bu değişken etkileri, hoparlörün geniş bir frekans aralığında dengeli bir ses cevabı sunabilmesi için titizlikle optimize edilmesini gerektirmektedir (Golla, 2016).

2.6.2. Ekolayzır Türleri ve Kullanım Alanları

Araç içi ses sistemleri, sürücülere ve yolculara yüksek kaliteli bir işitsel deneyim sunmayı hedefleyen teknolojiler arasında yer almaktadır. Bu sistemlerde, sesin frekans tepkisini optimize eden ve tonal dengenin sağlanmasına olanak tanıyan ekolayzırlar önemli bir rol oynamaktadır. Ekolayzırlar, belirli frekans bantlarının genlik seviyelerini artırma veya azaltma yeteneği ile araç kabininde meydana gelebilecek akustik sorunları gidermekte ve hoparlörlerin doğal frekans tepkilerini iyileştirmektedir. Genel olarak, grafik, raf ve parametrik olmak üzere üç temel ekolayzır türü bulunmaktadır (González Villegas, 2020; McCarthy, 2012).

Grafik ekolayzırlar, sabit frekans aralıklarında kullanıcıya sınırlı ancak pratik bir kontrol sunmaktadır. Her bir frekans bandı için ayrı kontrol noktalarına sahip olan bu ekolayzırlar, özellikle hızlı ve genel ses ayarları için uygundur. Ancak, bu tür ekolayzırların sunduğu kontrol, belirli frekanslara hassas müdahaleler yapılmasını sınırlandırmaktadır. Raf ekolayzırlar, düşük ve yüksek frekans aralıklarında genel bir dengeleme sağlamaktadır. Özellikle bas ve tiz seviyelerini düzenlemek için kullanışlı bir çözüm sunan bu ekolayzırlar, araç içi eğlence sistemlerinde standart bir bileşen hâline gelmiştir.

Bunun yanı sıra, parametrik ekolayzırlar, ses işareti üzerinde detaylı düzenlemeler yapılmasına olanak tanımaktadır. Bu ekolayzır türü, kullanıcının bir frekans bandını seçmesine, bu bandın genişliğini ayarlamasına ve kazanç seviyesini artırmasına veya azaltmasına imkân tanımaktadır. Bu esneklik, araç içi ses sistemlerinde meydana gelen rezonansları veya zayıf frekans bölgelerini düzelterek daha dengeli bir ses çıkışı elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

Araç içi ses sistemlerinde, kabin akustiği ve hoparlör yerleşimi nedeniyle belirli frekanslarda istenmeyen rezonanslar veya dipler meydana gelebilir. Özellikle dar bantlı rezonansların bastırılması veya belirli frekans aralıklarında ses kalitesinin iyileştirilmesi için tepe filtreleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Tepe filtreleri, parametrik ekolayzırın özel bir türü olup, belirli bir merkez frekansta meydana gelen ses bozulmalarını hassas bir şekilde düzeltmek için tasarlanmıştır (McCarthy, 2012).

Otomotiv uygulamalarında, motor gürültüsü, yol yüzeyi titreşimleri ve kabin içi yansımalar belirli frekanslarda bozulmalara neden olabilir. Bu tür bozulmaların düzeltilmesi için tepe filtreleri kullanılarak, belirli frekanslarda kazanç artırımı veya azaltımı yapılabilir. Tepe filtrelerinin matematiksel modeli, transfer fonksiyonları ile tanımlanmakta olup, bu model ses işaretinin frekans alanındaki etkisini açıklamak amacıyla kullanılmaktadır. Transfer fonksiyonu Denklem (2.19) ile hesaplanmaktadır.

$$H(f) = 1 + \frac{GQ \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)}{1 + Q \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)} \quad (2.19)$$

Burada, f incelenen frekansı, f_0 merkez frekansı, G kazancı ve Q kalite faktörünü ifade etmektedir (Winer, 2017). Kalite faktörü, bir frekans bandının genişliğini belirleyen temel parametrelerden biri olup, kazanç değeri ise belirli bir frekansın seviyesini artırmak veya azaltmak amacıyla kullanılmaktadır.

Araç içi ses sistemlerinde kullanılan sayısal ekolayzır işlemleri, genellikle Sayısal İşaret İşleme (DSP) tekniklerine dayanmaktadır. Bu bağlamda, filtreleme işlemleri için iki temel yöntem öne çıkmaktadır: Sonlu Darbe Yanıtı (FIR) filtreler ve Sonsuz Darbe Yanıtı (IIR) filtreler. FIR filtreler, doğrusal faz tepkisi ve koşulsuz stabilite avantajları ile bilinmektedir. FIR filtrelerde çıkış işareti, Denklem (2.20) ile hesaplanmaktadır.

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} b_k \cdot x[n - k] \quad (2.20)$$

Bu ifadede, $y[n]$ çıkış işaretini, $x[n]$ giriş işaretini temsil etmektedir. b_k ise filtre katsayıları olarak tanımlanmaktadır.

FIR filtreler, hassas frekans kontrolü gerektiren durumlar için uygun olmakla birlikte, dar bant geçişlerinde yüksek işlem gücü gereksinimi nedeniyle gömülü sistemlerde sınırlamalar oluşturabilmektedir.

IIR filtreler, FIR filtrelere kıyasla daha az işlem gücü ve bellek gereksinimiyle çalışmaktadır. Bu filtre türü, yalnızca giriş işaretini değil, aynı zamanda çıkış işaretinin önceki örneklerini de hesaba katmaktadır. IIR filtrelerin fark denklemi, Denklem (2.21)'deki gibidir.

$$y[n] = \sum_{k=0}^M b_k \cdot x[n-k] - \sum_{k=1}^N a_k \cdot y[n-k] \quad (2.21)$$

Bu ifadede, $y[n]$ çıkış işaretini, $x[n]$ giriş işaretini temsil etmekte olup; b_k filtre katsayılarını ve a_k geri besleme katsayılarını ifade etmektedir.

IIR filtreler, 2. dereceden yapılarla dar bant geçişlerinde dahi yüksek performans sağlayarak araç içi ses sistemlerinde sıkça tercih edilmektedir (Woo, 2002).

Özellikle 2. dereceden IIR yapıları, otomotiv ses sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yapı, merkez frekans, kazanç ve bant genişliği gibi parametrelerin temel ayarlarının tek bir fark denklemiyle kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Genel olarak, 2. dereceden bir IIR filtre, Denklem (2.22)'de belirtilen transfer fonksiyonu ve Denklem (2.23)'te ifade edilen fark denklemi ile tanımlanmaktadır.

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (2.22)$$

$$y[n] = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + b_2 x[n-2] - a_1 y[n-1] - a_2 y[n-2] \quad (2.23)$$

Bu denklemde, $y[n]$ çıkış işaretini ve $x[n]$ ise giriş işaretini temsil etmektedir. Katsayılar b_0 , b_1 ve b_2 , giriş işareti katsayılarıdır ve giriş işaretinin filtre üzerindeki etkisini belirlemektedir. Benzer şekilde, a_1 ve a_2 çıkış geri besleme katsayıları olup filtreleme işleminin davranışında belirleyici bir rol oynamaktadır. Burada n , zaman örnekleme indeksi olup, sayısal sistemlerde işaretin hangi örnekleme anında bulunduğunu göstermektedir. Bu denklemin katsayıları, analog tarafta tepe filtresi yaklaşımlarına uygun olacak şekilde sayısal ortamda hesaplanmaktadır (McCarthy, 2012).

Katsayıların doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için öncelikle örnekleme frekansı (f_s), merkez frekansı (f_0), kazanç (G) ve kalite faktörü (Q) parametrelerinin bilinmesi

gerekmektedir. Bu parametreler kullanılarak ara değerler, Denklem (2.24) ile hesaplanmaktadır.

$$w_0 = 2\pi \frac{f_0}{f_s}, \quad A = 10^{\frac{G}{40}}, \quad \alpha = \frac{\sin(w_0)}{2Q} \quad (2.24)$$

Burada w_0 , normalleştirilmiş açısal merkez frekansı olup, f_0 ve f_s arasındaki oran ile belirlenmektedir. A , kazancı temsil eden bir büyütme faktörüdür ve kazanç seviyesini desibel cinsinden kontrol etmektedir. α , filtrenin bant genişliği ile ilişkili bir parametre olup, Q ile ters orantılıdır. Bu parametreler kullanılarak, Denklem (2.25)'te ifade edildiği gibi fark denkleminin katsayıları hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} b_0 &= 1 + \alpha A, & b_1 &= -2 \cos(w_0), & b_2 &= 1 - \alpha A \\ a_0 &= 1 + \alpha, & a_1 &= -2 \cos(w_0), & a_2 &= 1 - \alpha \end{aligned} \quad (2.25)$$

Bu şekilde, parametrik ekolayzırlar, hoparlörler ve araç kabinindeki rezonanslar veya zayıf frekans bölgelerine müdahale ederek daha dengeli bir ses çıkışı sağlamaktadır. Özellikle 2. dereceden IIR filtreler, yüksek Q değerleri gerektiren dar geçiş bantlarında, FIR filtrelere kıyasla daha düşük dereceli czmler sunarak, gömülü sistemler için işlem gücü ve bellek açısından verimli bir yapı oluşturmaktadır. Bu avantajlar, araç içi ses sistemlerinde parametrik ekolayzırların pratik bir czm olarak uygulanabilirliğini artırmaktadır.

2.7. Metasezgisel Yöntemler

Metasezgisel yöntemler, klasik optimizasyon tekniklerinin yetersiz kaldığı, karmaşık ve çok boyutlu problemlerin czm için geliştirilmiş, esnek ve güçlü yaklaşımlardır. Bu yöntemler, deterministik olmayan yapıları sayesinde küresel czmlere ulaşmada daha başarılıdır.

Genellikle doğadaki biyolojik, fiziksel veya sosyal fenomenlerden ilham alınarak geliştirilen metasezgisel yöntemler, optimal czm arayışında farklı stratejiler

uygulamaktadır. Temel özellikleri, çözüm uzayında geniş bir keşif yapabilmeleri ve yerel çözümlerden kaçınma yetenekleridir.

Bu tez çalışması kapsamında, optimizasyon problemlerinde etkinliği literatürde kanıtlanmış ve yaygın olarak kullanılan GA ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) yöntemleri tercih edilmiştir.

2.7.1. Genetik Algoritmanın İlkeleri

Evrimsel süreç, canlı organizmaların çevresel koşullara uyum sağlamasını ve nesiller boyu hayatta kalma şansını artırmasını sağlayan bir mekanizmadır. Bu süreç, doğal seçilim ve üreme olmak üzere iki temel mekanizmaya dayanmaktadır. Doğal seçilim, bir popülasyondaki bireylerin hayatta kalma ve üreme başarısını belirlerken, üreme aşaması genetik çeşitliliğin artmasına yol açmaktadır. Üreme sırasında, ebeveynlerin genetik materyali çaprazlanmakta ve mutasyonlar aracılığıyla yeni varyasyonlar ortaya çıkmaktadır. Bu süreç, yavruların genetik özelliklerinin farklı kombinasyonlarla oluşmasını sağlayarak popülasyonun evrim hızını artırmaktadır.

GA, bu biyolojik süreçlerin doğrudan bir modellemesi olarak geliştirilmiş bir optimizasyon yöntemidir. GA, belirli bir problemin çözümüne yönelik arama yaparken, doğal seçilim ve evrim ilkelerini temel alarak çalışmaktadır.

GA, bir popülasyon içindeki bireylerden (kromozomlar) oluşmakta olup, her birey optimizasyon problemine yönelik potansiyel bir çözümü temsil etmektedir. Kromozomlar, bir dizi parametreyi (gen) içeren dizilerdir ve bu diziler belirli bir kodlama yöntemi kullanılarak tanımlanmaktadır.

İkili kodlama, GA için yaygın bir temsil biçimi olup, her parametre, 0 ve 1'lerden oluşan bir bit dizisi ile gösterilmektedir. Bu kodlama, bireyin genetik materyalini, yani genotipini oluşturmaktadır. Genotip, problem alanında doğrudan bir çözüm sunmaz; ancak genotipin açılımı olan fenotip, gerçek problem uzayında değerlendirilerek çözümü ortaya çıkarmaktadır.

Her birey, uygunluk fonksiyonu kullanılarak değerlendirilmekte ve bireyin probleme sunduğu çözümün kalitesi belirlenmektedir. Uygunluk fonksiyonu, bireyin genotipinden türetilen fenotipin problem üzerinde ne kadar etkili olduğunu ölçen bir fonksiyondur. GA'nın temel işlemleri arasında seçim, çaprazlama ve mutasyon yer alır. Seçim aşamasında, popülasyondaki bireylerin uygunluk değerlerine göre üreme için bireyler belirlenir. En iyi performansa sahip bireyler, üremeye daha sık seçilerek gen havuzunda daha fazla temsil edilmektedir. Çaprazlama, seçilen iki bireyin genetik materyallerini birleştirerek yeni bireyler oluşturduğu aşamadır. Bu süreç, genellikle tek noktalı veya çok noktalı kesişim yoluyla gerçekleşmektedir. Mutasyon ile çaprazlama sonrası bireylerin genlerinde rastgele değişiklikler yapılarak genetik çeşitlilik artırılmakta ve arama alanında farklı çözümler keşfedilmektedir. Bu süreçlerin tamamı, popülasyonun zamanla evrimleşmesine ve problemin optimal veya optimal çözüme yakın bir noktaya ulaşmasına olanak tanımaktadır. Standart GA adımları şu şekildedir:

1. Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması: Rastgele kromozomlar (bireyler) oluşturularak başlangıç popülasyonu belirlenmektedir.
2. Uygunluk Değerlendirmesi: Bireylerin performansı, uygunluk fonksiyonu ile değerlendirilmekte olup, bu fonksiyon bireyin çözüme yakınlığını ölçmektedir. Amaç, hatayı minimize ederek uygunluk değerini maksimize etmektir. Uygunluk fonksiyonu, Denklem (2.26) ile ifade edilmektedir:

$$F(x) = \frac{1}{1 + E(x)} \quad (2.26)$$

Burada $E(x)$, bireyin hata oranını ifade etmektedir. Hata azaldıkça uygunluk değeri artmakta, böylece algoritma en iyi bireyleri seçerek popülasyonun gelişimini sağlamaktadır.

3. Seçim: Uygunluk değeri yüksek bireyler, üreme için seçilmektedir. Kullanılan seçim yöntemleri şunlardır:
 - Rulet Tekerleği Seçimi: Bireylerin uygunluk oranlarına göre seçilme olasılıkları hesaplanmaktadır.
 - Turnuva Seçimi: Rastgele bireyler arasında turnuvalar düzenlenerek en uygun bireyler seçilmektedir.

- Elitizm: En iyi bireyler doğrudan bir sonraki nesle aktarılmaktadır.
- 4. Çaprazlama: Seçilen bireyler, rastgele bir noktadan kesilerek genetik materyal değiş tokuş etmekte ve bu işlem yeni bireylerin oluşturulmasını sağlamaktadır. Tek noktalı çaprazlama en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Çaprazlama olasılığı $P_c = 0,7$ ile $0,9$ arasında olup, genetik materyalin birleşim sıklığını belirlemektedir.
- 5. Mutasyon: Yeni bireylerde, küçük bir olasılıkla rastgele bitler değiştirilmekte, böylece genetik çeşitlilik korunarak yerel minimumlara sıkışma önlenmektedir. Mutasyon olasılığı $P_m = 0,01$ ile $0,05$ arasında değişmektedir.
- 6. Yeni Neslin Oluşturulması: Çaprazlama ve mutasyon işlemlerinden sonra yeni nesil bireyler oluşturulmaktadır.
- 7. Yakınsama Kontrolü: Belirli bir iterasyon sayısından sonra veya tüm kromozomların benzer hâle gelmesi durumunda algoritma durdurulmaktadır.

GA, belirli bir iterasyon sayısına ulaşıldığında veya popülasyondaki en uygun birey belirli bir çözüm kalitesine eriştiğinde durdurulmaktadır. Bu durumda, en yüksek uygunluk değerine sahip birey, problemin en iyi çözümü olarak kabul edilmekte ve sonuç olarak kullanılmaktadır (Rimell ve Hawksford, 1995).

2.7.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritmasının İlkeleri

Doğada gözlemlenen sürü davranışları, PSO algoritmasının temelinde yer almaktadır. Doğadaki pek çok canlı, yiyecek aramak veya tehlikelerden kaçınmak amacıyla kolektif hareket etmektedir. Bu kolektif hareket sırasında, her birey, kendi deneyimlerini ve diğer bireylerin konumlarını göz önünde bulundurarak pozisyonunu güncellemektedir. PSO, bu doğal davranışı model alarak, sürü zekâsı aracılığıyla optimizasyon problemlerinin çözümünü amaçlamaktadır.

PSO algoritması, bir problemin çözümünü arayan çok sayıda "parçacıktan" oluşmaktadır. Her parçacık, çözüm uzayında bir noktayı temsil etmekte ve belirli bir hızda hareket etmektedir. Algoritmanın işleyişinde, her parçacık, kendi en iyi bireysel çözümünü (pbest) ve sürüdeki en iyi küresel çözümü (gbest) güncelleyerek

ilerlemektedir. PSO algoritması, parçacıkların bu iki konumu temel alarak hız ve konum güncellemeleri yapmalarını sağlamaktadır. PSO algoritmasının temel bileşenleri şunlardır:

- **Konum ve Hız:** Her parçacık, çözüm uzayında bir konum vektörüne ve bir hız vektörüne sahiptir. Parçacıkların hız ve konum güncellemeleri, sürüdeki en iyi çözüme doğru toplu hareket etmelerini sağlamaktadır.
- **En İyi Bireysel Çözüm:** Her parçacık, geçmişteki deneyimleri doğrultusunda bulduğu en iyi konumu saklamaktadır. Bu konum, parçacığın elde ettiği en yüksek uygunluk değerine karşılık gelmektedir.
- **En İyi Küresel Çözüm:** Sürüdeki tüm parçacıkların ulaştığı en iyi konumdur. Her parçacık, gbest konumuna doğru hareket ederek bu noktaya ulaşmaya çalışmaktadır.

PSO'da her parçacığın performansı, bir uygunluk fonksiyonu aracılığıyla değerlendirilmektedir. Bu fonksiyon, parçacığın mevcut konumunun probleme ne kadar uygun olduğunu ölçmektedir. Örneğin, bir hoparlör sisteminin akustik kalitesini optimize etmek amacıyla kullanılacak bir uygunluk fonksiyonu, frekans tepkisini veya ses kalitesini değerlendirebilir. Parçacıkların hızının güncellenmesi Denklem (2.27) ile sağlanmaktadır.

$$v_i(t + 1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_i - x_i) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest - x_i) \quad (2.27)$$

Bu denklemde, w atalet katsayısı olarak parçacığın önceki hızını korumasını sağlarken, c_1 ve c_2 parçacıkların kendi en iyi konumlarına ve en iyi çözümlerine doğru çekim katsayılarını temsil etmektedir. r_1 ve r_2 ise çeşitlilik sağlamak amacıyla rastgele değerlerdir. Parçacığın yeni konumu ise Denklem (2.28) ile hesaplanmaktadır.

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \cdot \Delta t \quad (2.28)$$

x_i parçacığın konumunu ifade etmektedir (Bae vd., 2014). Standart PSO adımları şu şekildedir:

1. Rastgele pozisyon ve hızlarla parçacık popülasyonunu başlatın.

2. Popülasyondaki her parçacığın uygunluk değerini değerlendirin.
3. Parçacık için uygunluk değerinin en iyi konumu, uygunluk değerinden daha iyiye; yeni uygunluk değerini bu parçacık için yeni bir en iyi konum olarak güncelleyin.
4. Eğer herhangi bir en iyi konum güncellenirse ve mevcut değer en iyi çözümden daha iyi ise; mevcut uygunluk değerini en iyi çözüm olarak belirleyin.
5. Parçacıkların hız ve pozisyonlarını güncelleme denklemleri ile güncelleyin.
6. Tüm parçacıkların uygunluk değerleri en iyi uygunluk değerine ulaştığında veya maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığında, algoritmayı durdurun.

PSO algoritması, belirli bir iterasyon sayısına ulaşıldığında veya küresel en iyi konum, belirli bir çözüm kalitesine eriştiğinde durdurulmaktadır. Bu durumda, küresel en iyi konum nihai çözüm olarak kullanılmaktadır (Li vd., 2014).

2.8. Kaynak Araştırması

Ses sistemlerinin optimizasyonu, son yıllarda hem akademik hem de endüstriyel alanda önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir. Bu alanda, parametrik ekolayzırlar, ses sınıflandırma modelleri ve frekans analizi gibi teknikler, akustik performansı iyileştirme amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Parametrik ekolayzırların tasarımında kullanılan GA ve PSO gibi metasezgisel yöntemler, ses sistemlerinin bileşen değerlerini optimize ederek daha hassas ve kararlı bir performans sunmaktadır. GA, kontrol parametrelerinin optimize edilmesinde esneklik sağlarken, PSO ise yüksek doğruluk ve düşük hesaplama maliyetiyle öne çıkmaktadır. Bu yöntemler, hoparlör eşitlemesi, ses sınıflandırması ve akustik analiz gibi farklı alanlarda etkili bir şekilde kullanılmakta olup, yeni nesil sinir ağı modelleriyle birleştirilerek daha güçlü çözümler sunmaktadır. Literatürde, bu yöntemlerin çeşitli uygulamalarını ve avantajlarını inceleyen çalışmalar, ses optimizasyonunda yeni bir standart belirlemektedir. Aşağıda, bu bağlamda yapılan önemli çalışmaların özetleri sunulmuştur.

Fernandez-Vazquez vd. (2007), sayısal filtre tasarımında tüm geçiren filtrelerin kullanımına dayanan yeni bir yöntem sunmaktadır. Çalışmada, raf ve tepe filtrelerinin

tasarımında geleneksel analog yaklaşımların aksine sayısal tüm geçiren filtrelerin avantajları vurgulanmaktadır. Raf filtre tasarımında, frekans kazançları, geçiş ve durdurma bandı özellikleri gibi parametreler göz önünde bulundurulmuş; tepe filtre tasarımında ise geçiş ve durdurma bandı genişlikleri ile merkez frekansı ele alınmıştır. Makale, bu filtrelerin matematiksel hesaplamalarını ve kapalı form denklemlerini detaylandırarak, tasarım sürecini tek bir tüm geçiren filtre üzerinden basitleştirmektedir. MATLAB kullanılarak yapılan uygulamalar, tasarımların düşük gürültü seviyelerine ve yüksek kararlılığa sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışmada üç örnek tasarım sunulmuş, beşinci dereceden bir raf filtresi, düşük ve yüksek geçişli kesim raf filtreleri ile bir tepe filtresinin tasarımı incelenmiştir. Önerilen yöntem, filtrelerin kararlılığını artırırken, düşük gürültü seviyeleri sağlamaktadır. Bununla birlikte, yöntemin geleneksel Butterworth ve Chebyshev filtreleri ile karşılaştırmalı performansının ve farklı uygulamalardaki uygunluğunun gelecekte daha kapsamlı bir şekilde araştırılabileceği belirtilmektedir. Bu çalışma, sayısal filtre tasarımında tüm geçiren filtrelerin önemini vurgulayarak literatüre önemli bir katkı sunmaktadır.

Prince ve Kumar (2007), GA ile optimize edilmiş bir grafik ekolayzır geliştirmeyi hedeflemektedir. Çalışmada, 16. dereceden IIR filtrelerin katsayıları GA ile optimize edilmiş ve bu süreçte MATLAB ortamında deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, bitişik frekans bantları arasındaki etkileşimi azaltırken, hesaplama karmaşıklığını da minimize etmektedir. Elde edilen sonuçlar, optimize edilmiş yapının düşük grup gecikmesi, yüksek kazanç ve düşük hesaplama maliyeti sunduğunu göstermektedir.

Yapılan testlerde, maksimum kazanç hatasının $\pm 1,9$ dB olduğu, optimum filtre düzeninin 750 olarak belirlendiği ve grup gecikmesinin başarılı bir şekilde optimize edildiği gözlemlenmiştir. Çalışma, grafik ekolayzırların, frekans bantları arasındaki girişimi en aza indirmede etkili olduğunu vurgulamaktadır. Bununla birlikte, gerçek zamanlı uygulamalarda test edilmemesi ve GA'nın başlangıç popülasyonu ile mutasyon oranı gibi parametrelere bağımlı olması, yöntemin potansiyel sınırlamaları olarak değerlendirilmektedir.

Vairetti vd. (2018), akustik sistemlerin cevaplarını hedef cevaplarla uyumlu hâle getirmek için düşük dereceli IIR filtreler kullanan bir otomatik eşitleyici tasarımı önermektedir. Çalışmada, sistemin mevcut frekans cevabı ile hedeflenen frekans cevabı arasındaki kareler toplamı hatasını en aza indiren bir optimizasyon yöntemi geliştirilmiştir. Bu süreçte, parametrelili filtrelerin ortogonalite özelliği kullanılarak her bir filtre bölümü sırayla optimize edilmiş ve çizgi arama yöntemi uygulanarak maliyet fonksiyonu değerleri etkili bir şekilde azaltılmıştır.

Bulgular, bu yöntemin mevcut tasarım prosedürlerine kıyasla daha düşük hata oranları sağladığını ve özellikle algısal açıdan önemli frekans bölgelerinde başarılı sonuçlar elde ettiğini göstermektedir. Önerilen yöntemin güçlü yanları arasında, daha iyi başlangıç parametreleri ve hızlı yakınsama bulunurken, yöntemin farklı sistemlere genellenebilirliğinin sınırlı bir şekilde test edildiği belirtilmektedir. Bu çalışma, akustik sistemlerin parametrelili IIR filtreler kullanılarak eşitlenmesi konusunda literatüre önemli bir katkı sunmaktadır.

Mijwil ve Abttan (2020), analog aktif filtrelerin geliştirilmesinde direnç ve kondansatör değerlerinin belirlenmesi için GA kullanımını ele almaktadır. Çalışmada, klasik yöntemlerin karmaşıklık ve hata risklerini azaltmak amacıyla GA'nın etkinliği incelenmiş ve belirli tasarım gereksinimlerinde uygun bir filtre yapılandırması geliştirilmiştir. Araştırma, özellikle ikinci dereceden bant geçiren aktif filtrelerin tasarımına odaklanmış ve GA'nın filtre duyarlılığını azaltmada etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Sonuçlar, iki farklı senaryoda GA'nın duyarlılıkları ve tasarım hatalarını başarılı bir şekilde minimize edebildiğini göstermektedir. Optimum filtre tasarımı, belirli birey sayıları ve geçiş olasılıkları ile elde edilmiştir. Elde edilen bulgular, GA'nın direnç ve kondansatör değerlerini optimize ederek tasarım gereksinimlerini karşıladığını ve analog filtre tasarımında uygulanabilir bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Mishima ve Kajikawa (2012), kullanıcı değerlendirmelerine dayalı olarak ses eşitleyici parametrelerini optimize etmek için interaktif GA temelli bir yöntem önermektedir. Çalışma, kullanıcıların ses ayarlarını elle doğru bir şekilde yapmalarındaki zorlukları ortadan kaldırmayı hedeflemekte ve yeniden üretilen sesin kullanıcı tarafından değerlendirilmesine dayalı olarak parametrelerin otomatik ayarlanmasını sağlamaktadır. Önerilen yöntem, tepe filtrelerin merkezi frekansını, keskinliğini ve kazancını optimize ederek beş bantlı bir eşitleyicide çalışmaktadır. Dinleme testleri, bu sistemin kullanıcıların ses tercihlerini doğru şekilde yansıtabildiğini ortaya koymaktadır.

Sonuçlar, kullanıcıların orta frekansları bastırmayı, düşük ve yüksek frekans aralıklarını ise artırmayı tercih ettiğini göstermektedir. Ortalama uyumluluk değeri, üçüncü nesilde en yüksek düzeye ulaşmış, ancak mutasyon oranına bağlı olarak daha sonra azalmıştır. Sistemin etkinliği, kullanıcıların ortalama 12,3 dakika içinde tercih ettikleri frekans karakteristiklerine ulaşmasıyla doğrulanmıştır. Bununla birlikte, sistemin kullanıcı arayüzünün iyileştirilmesi ve mutasyon oranının daha iyi ayarlanması gerektiği belirtilmektedir. Bu alışma, kullanıcı merkezli ses eşitleyici tasarımı alanında önemli bir katkı sunmaktadır.

Pepe vd. (2021), ses dengelemesi için parametrik IIR filtrelerin tasarımında Derin ğrenme tabanlı yeni bir yöntem sunmaktadır. Çalışmada, BiasNet adlı sinir ağı mimarisi kullanılmış ve bu aę, ölçülen ile hedef genlik tepkisi arasındaki spektral mesafeyi minimize eden bir kayıp fonksiyonu ile parametreleri optimize etmiştir. BiasNet, tüm katmanları türevlenebilir bir yapı ile tasarlanarak filtre parametrelerini etkili bir şekilde belirlemiştir. Deneyler, oda ve araç içi akustik ortamlarda gerçekleştirilmiş ve yöntemin düşük hesaplama maliyeti ile neredeyse düz bir frekans bandı elde ettiği gösterilmiştir.

Sonuçlar, BiasNet'in mevcut yöntemlere kıyasla daha düşük hata oranı ve standart sapma ile üstün performans sağladığını ortaya koymaktadır. Oda senaryosunda, BiasNet düşük ortalama karesel hata ve standart sapma değerleri sunarken, araç içi senaryolarda da yüksek doğrulukla çalışmıştır. Bununla birlikte, yöntemin yalnızca statik test ortamlarında değerlendirilmiş olması ve gerçek zamanlı adaptasyon yeteneğinin

incelenmemesi, önemli sınırlamalar olarak belirtilmektedir. Ön-ayarlama aşamasında etkili bir araç olarak değerlendirilen BiasNet, ses dengelemesi ve akustik filtre tasarımı alanlarında literatüre önemli katkılar sağlamaktadır.

Ramos ve López (2006), hoparlör ve ses sistemleri için parametrik IIR filtrelerle dayalı yeni bir eşitleme yöntemi sunmaktadır. Çalışmada, ikinci dereceden kesitlerden oluşan zincir yapılı bir sistem kullanılarak alçak geçiren, yüksek geçiren veya tepe filtresi olarak işlev görebilen bir eşitleme yöntemi tanıtılmaktadır. Algoritma, doğrudan bir arama yöntemi ile parametrik optimizasyon sürecini birleştirerek ölçeklenebilir ve donanım sınırlamalarına uygun çözümler sunmaktadır. İnsan işitmesine dayalı çift logaritmik maliyet fonksiyonu sayesinde yüksek doğruluk elde edilmiştir.

Sayısal sonuçlar, yöntemin düşük dereceli filtrelerle yüksek kalitede eşitleme sağladığını ve FIR ile diğer IIR yöntemlerine kıyasla daha düşük hesaplama maliyetiyle benzer sonuçlar verdiğini göstermektedir. Örneğin, 20 filtre bölümü ile hata değeri 0,25 dB olarak bulunmuş ve bu değer diğer yöntemlerle kıyaslandığında daha iyi performans sergilemiştir. Ayrıca, filtre derecesini azaltarak hesaplama maliyetlerini düşüren psikofiziksel bir modelin kullanımı, pratik uygulamalarda önemli bir avantaj sağlamaktadır. Subjektif değerlendirmeler de yöntemin ses kalitesinde üstün olduğunu doğrulamaktadır.

Yi ve Zou (2018), GA teorisini ve uygulamalarını ele alarak, bu yöntemlerin kontrol yapılarını ve fonksiyonlarını optimize etmede hızlı ve etkili bir araç olduğunu vurgulamaktadır. Çalışmada, GA'nın küresel arama yeteneği ve hızlı sonuç elde etme kapasitesi gibi avantajları detaylandırılmış, aynı zamanda yerel arama yeteneklerinin zayıflığı ve erken yakınsama gibi sınırlamalarına dikkat çekilmiştir. Kullanılan kodlama yöntemleri (ikili, gerçek sayı, ondalık, sayısal olmayan) ve genetik işlemler (seçim, çaprazlama, mutasyon) derinlemesine incelenmiştir.

Makale, GA'nın diğer zeki algoritmalarla, özellikle PSO ile birleştirilerek bu sınırlamaların üstesinden gelinebileceğini tartışmaktadır. Yapılan deneyler, GA'nın kontrol parametrelerini optimize etmedeki esnekliğini ve etkinliğini ortaya koymuştur.

Örneğin, belirli kontrol parametreleri ile yapılan optimizasyon denemelerinde, $P_c = 0,6$; $P_m = 0,001$ ve $N_{pop} = 50$ parametreleri optimal performans sağlamıştır. Bu çalışma, GA'nın yerel arama yeteneklerinin artırılması ve genel performansının iyileştirilmesi için daha fazla araştırma gerektiğini vurgulayarak, algoritmaların gelişimi için önemli çıkarımlar sunmaktadır.

Shakoor vd. (2019), 3. dereceden analog alçak geçiren filtrelerin tasarım parametrelerini optimize etmek için GA tabanlı bir yöntem sunmaktadır. Çalışma, bileşen değerlerinin piyasada mevcut olanlarla uyumlu hâle getirilmesini ve filtre kazancı ile kesim frekansı gibi tasarım gereksinimlerinin ihlal edilmeden optimal değerlerin belirlenmesini amaçlamaktadır. MATLAB GA Toolbox kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon sürecinde, direnç ve kondansatör değerleri optimize edilmiş, kazanç 12 dB, kesim frekansı ise 1800 Hz olarak belirlenmiştir.

Optimizasyon sürecinin sonuçları, transfer fonksiyonunun Bode diyagramı ile doğrulanmış ve yöntemin esnekliği vurgulanmıştır. Çalışma, GA'nın bileşen değerlerini etkin bir şekilde optimize ederek tasarımın verimliliğini artırdığını göstermektedir. Bununla birlikte, optimizasyon sürecinin yüksek hesaplama maliyetine sahip olabileceği ve algoritmanın performansının başlangıç popülasyonuna bağlı olduğu belirtilmektedir. Bu çalışma, GA'nın aktif filtre tasarımında etkili bir şekilde nasıl kullanılabileceğini göstererek literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

Zhang vd. (2022), ses sınıflandırma için CBiLSTM ağlarını kullanan bir ensemble model ve bu ağın hiperparametrelerini optimize eden bir PSO tabanlı yöntem önermektedir. Her ses işareti, önce Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (STFT) yöntemiyle spektrograma dönüştürülmüş; ardından CBiLSTM ağlarının öğrenme oranı, ağırlık azalması ve katman parametreleri, PSO algoritması ile optimize edilmiştir. Üç optimize edilmiş ağın çoğunluk oylaması ile birleştirilmesiyle oluşturulan ensemble model, çeşitli veri setlerinde üstün performans sergilemiştir. Çalışma, özellikle mekânsal ve zamansal özellikleri etkili bir şekilde çıkarabilen bir yöntem sunmaktadır.

Modelin, ICBHI 2017, PhysioNet/CinC Challenge 2016 ve ESC-10 gibi veri setlerinde elde ettiği doğruluk oranları, diğer yöntemlerle kıyaslandığında belirgin şekilde yüksek bulunmuştur. Örneğin, ICBHI 2017 veri setinde %92,5 doğruluk oranına ulaşılmıştır. Bununla birlikte, çalışmanın veri toplama yöntemleri ve gerçek zamanlı uygulamalardaki performansının eksik kaldığı belirtilmektedir. Gelecekte, yöntemin daha geniş veri setleri ve farklı görevlerde test edilmesi önerilmektedir. Makalenin güçlü yönleri arasında, önerilen modelin ses sınıflandırmada etkili olması ve PSO algoritmasının hiperparametre optimizasyonundaki başarısı yer alırken, eksik yönleri arasında veri toplama detaylarının yetersizliği bulunmaktadır.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Kullanılan Cihazlar ve Ölçüm Ekipmanları

Araç içi eğlence sistemlerinde ses işleme tümdevresi olarak SAF400 tümdevresi kullanılmaktadır. Bu tümdevre, özellikle araç içi ses sistemlerinde belirli frekans bantlarında kazanç veya kayıp yaratmak amacıyla kullanılan, önemli bir parametrik ekolayzır türü olan 2. dereceden tepe filtresini desteklemektedir. Söz konusu filtre, frekans cevabında belirli bir merkez frekansta tepe veya çukur oluşturarak araç içi akustik optimizasyonu sağlamak amacıyla ince ayarlamaların yapılmasına olanak tanımaktadır. SAF400 tümdevresi, bu tepe filtresini ayarlanabilir parametrelerle desteklemekte ve geniş bir frekans spektrumunda hassas kontrol sunmaktadır.

Bu filtre, IIR filtre sınıfına girmektedir. IIR filtreleri, çıkışın önceki değerlerini geri besleyerek sonsuz süreli bir tepki üretmektedir. Bu özellik, filtre tasarımında belirli frekanslarda daha keskin bir cevap elde edilmesine olanak tanıdığından, araç içi akustik sistemlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. IIR filtrelerin, daha az hesaplama yükü ile yüksek performans sağlaması, araç içi donanımlarda verimli bir çözüm olarak öne çıkmasını sağlamaktadır. SAF400 tümdevresi, bu avantajlardan faydalanarak araç içi ses sistemlerinin akustik performansını optimize etmeye katkıda bulunmaktadır.

SAF400 tümdevresi, 10 adet 2. dereceden parametrik ekolayzır tepe filtresinin kullanımına olanak tanımakta olup, ilgili parametrelerin çalışma aralıkları Çizelge 3.1’de sunulmaktadır.

Çizelge 3.1. Parametrik ekolayzır tepe filtresinin çalışma aralıkları

Parametre	Birim	Aralık
Örnekleme frekansı (f_s)	Hz	44,1k ... 48k
Merkez frekansı (f_c)	Hz	20 ... 20k
Q faktörü	--	0,1 ... 2,2
Kazanç (G)	dB	-12 ... 12

Bu parametrelerin her biri, araç içi ses sisteminde belirli frekans aralıklarına yönelik ince ayar yapılmasına olanak tanımaktadır (NXP Semiconductors, 2020).

Bu çalışmada kullanılan ses analizörü sistemi, yüksek hassasiyetli ses ölçümleri gerçekleştirebilmek amacıyla SpectraDAQ-200 veri toplama kartı ve SpectraPLUS-SC yazılımından oluşmaktadır. SpectraDAQ-200, geniş dinamik aralık ve düşük distorsiyon oranı sağlayan gelişmiş analogdan sayısala (A/D) ve sayısaldan analoga (D/A) dönüştürücüler ile donatılmıştır. SpectraPLUS-SC yazılımı, hızlı Fourier dönüşümü (FFT) analizleri aracılığıyla işaret ölçümleri gerçekleştirebilmekte ve 192 kHz'e kadar örnekleme hızını desteklemektedir. Yazılım, kullanıcı ihtiyaçlarına bağlı olarak frekans çözünürlüğünün ayarlanmasına olanak tanımakta ve dar bant FFT analizleri kapsamında 1/24 oktav ölçümlerini sağlayabilmektedir.

SpectraDAQ-200, 24-bit örnekleme hassasiyeti ve 192 kHz'e kadar örnekleme hızı ile düşük seviyeli işaretlerin dahi yüksek doğrulukla analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Cihazın toplam harmonik distorsiyon (THD) oranı %0,002 seviyesindedir. Bu teknik özellikler, geniş bir frekans aralığında yüksek doğrulukla spektral analiz yapılmasını sağlamakta ve ses analizlerinde güvenilir ölçüm sonuçları elde edilmesine katkıda bulunmaktadır (Pioneer Hill Software LLC, 2024).

Bu çalışmada, akustik testlerde yüksek hassasiyetli ölçümler sağlamak amacıyla GRAS 146AE 1/2" CCP Free-field Mikrofon Seti kullanılmıştır. GRAS 146AE, geniş bir frekans aralığı ve yüksek dinamik kapasite sunarak araç içi ses analizlerinde üstün performans sergilemektedir. Frekans aralığı, ± 1 dB doğrulukla 5 Hz ila 10 kHz, ± 2 dB doğrulukla ise 3,15 Hz ila 20 kHz arasında olup, geniş bir spektrumda doğru ölçüm yapılmasını sağlamaktadır. Mikrofonun dinamik aralığı 18 dB(A) ile 133 dB(A) arasında olup, düşük ve yüksek ses seviyelerinde hassas veri sağlayarak araç içindeki çeşitli akustik kaynakların analizine olanak tanımaktadır. IEC 61094-4 standardına göre WS2F sınıflandırmasına sahip olan mikrofon, $<50 \Omega$ çıkış empedansı ile işaret kayıplarını minimize ederek veri yönetimini optimize etmektedir. Bu teknik özellikler, GRAS 146AE mikrofonunu araç içi akustik, gürültü ve titreşim analizlerinde güvenilir

bir ölçüm cihazı hâline getirerek, çalışmanın hedeflerine uygun bir çözüm sunmaktadır (G.R.A.S. Sound & Vibration, 2024).

3.2. Ses Ölçüm Metodolojisi

Çalışmada, ses şiddetinin basınç seviyesi üzerinden değerlendirildiği bir ölçüm metodolojisi kullanılmaktadır. Sesin şiddeti ile basınç seviyesi arasındaki ilişki, ISO 226:2003 standardına göre Denklem (3.1)'de verilmiştir:

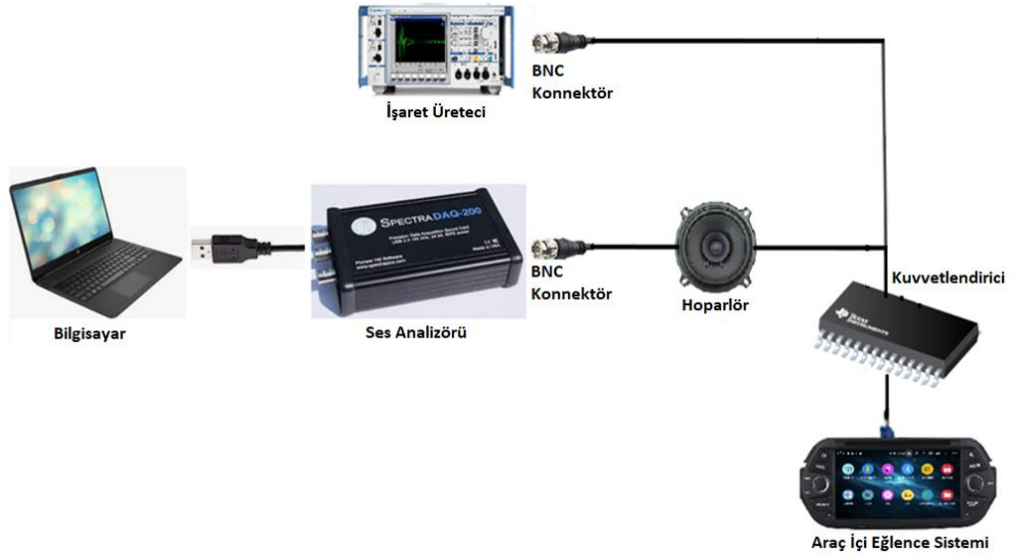
$$L_p = \left(\frac{10}{a_f} \lg A_f \right) dB - L_U + 94dB \quad (3.1)$$

Burada, a_f ses yüksekliği algılamasının üstel değerini, L_U (dB) 1000 Hz'de normalize edilmiş lineer transfer fonksiyonunun büyüklüğünü ifade etmektedir. Ses şiddeti (A_f) Denklem (3.2) ile tanımlanmaktadır (ISO, 2003).

$$A_f = 4,47 \times 10^{-3} (10^{0,025L_N} - 1,15) + \left[0,4 \times 10^{\left(\frac{T_f + L_U}{10} - 9 \right)} \right]^{a_f} \quad (3.2)$$

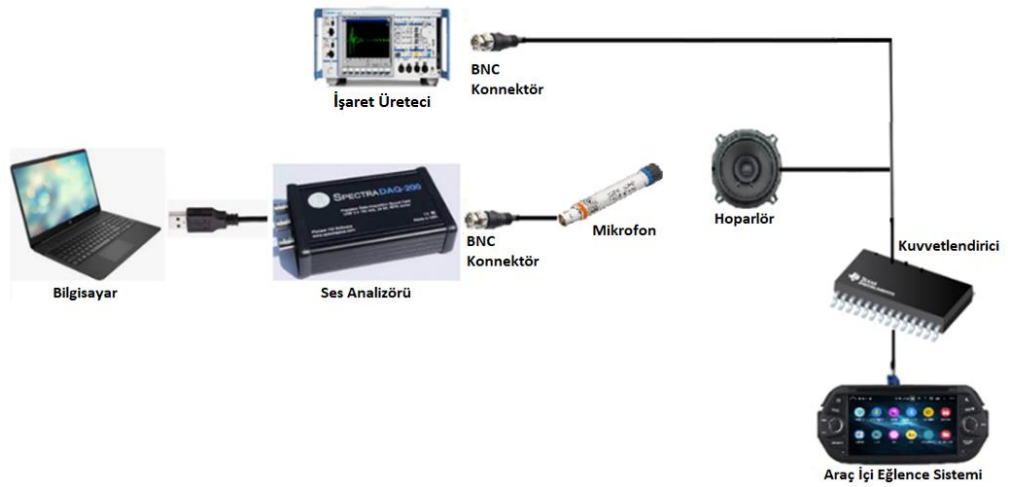
Bu denklemler, araç içi ses sistemi tarafından üretilen frekansların insan kulağı üzerindeki etkisini değerlendirerek, doğru ses basınç seviyelerinin ölçümünü sağlamaktadır. Denklem (3.2)'de kullanılan a_f , ses yüksekliği algısının üstel katsayısını temsil etmektedir.

Şekil 3.1'de gösterilen yapı, hoparlörlerin doğrudan kablo bağlantısıyla yapılan ölçüm yönteminin şematik görünümünü sunmaktadır. Bu doğrudan bağlantı, ses sisteminin her bir bileşeninin frekans tepkisini objektif olarak incelemeye olanak tanımakta ve sistemin performansını bileşen bazında değerlendirmeye yardımcı olmaktadır (Başay vd., 2023).



Şekil 3.1. Araç içi ses sisteminde hoparlör üzerinden ses ölçümü.

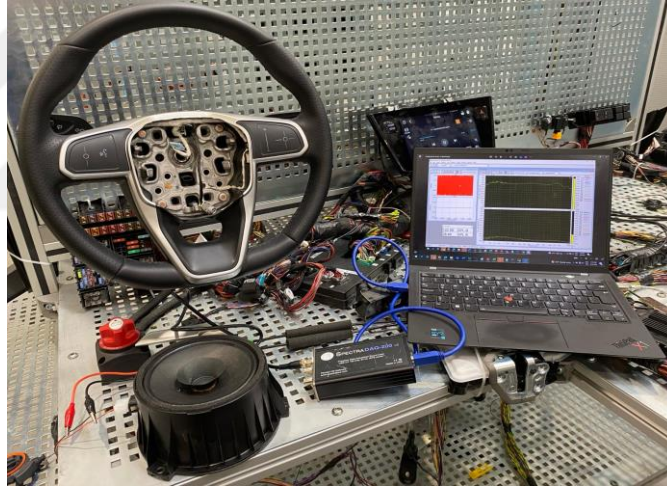
Aynı zamanda, Şekil 3.2’de gösterilen yapı ile, araç içerisindeki sesin sürücü baş hizasındaki algısını değerlendirmek için mikrofonla ölçüm yapılmaktadır. Her iki ölçümde de giriş işareti olarak 20 *Hz* ile 20 *kHz* frekans aralığında beyaz gürültü kullanılarak spektral analiz gerçekleştirilmiştir. Beyaz gürültü, tüm frekanslarda dengeli bir spektrum sunduğundan, araç içindeki yansıma ve soğurma etkilerini simüle ederek sürücü konumundaki gerçek akustik deneyimi kapsamlı bir şekilde değerlendirmeyi sağlamaktadır (Başay vd., 2023).



Şekil 3.2. Araç içi ses sisteminde mikrofon kullanarak sürücü baş hizasında yapılan ses ölçümü.

3.2.1. Hoparlör Çıkışının Ölçülmesi

Hoparlör çıkışının ölçülmesi, araç içi akustik performansın değerlendirilmesi açısından kritik bir adımdır. Şekil 3.3'te gösterilen laboratuvar ortamında, hoparlör çıkışı, gerçek araç içi koşullara benzer şekilde test edilmektedir. Test düzeneği, hoparlör işaretinin doğruluğunu ve tepkisini incelemek amacıyla işaret analiz cihazları, bir veri toplama sistemi ve analiz yazılımından oluşmaktadır. Bu sistem, hoparlörün farklı frekans aralıklarındaki performansını ölçerek, ses dağılımını ve distorsiyon gibi istenmeyen etkileri belirlemeye olanak tanımaktadır. Elde edilen ölçüm sonuçlarında, ses basıncı seviyesi *dB SPL* birimi ile ifade edilmektedir. Test ortamı, hoparlörün optimize edilmesine ve araç içi akustik kalite standartlarının sağlanmasına yönelik detaylı veri sağlamaktadır.



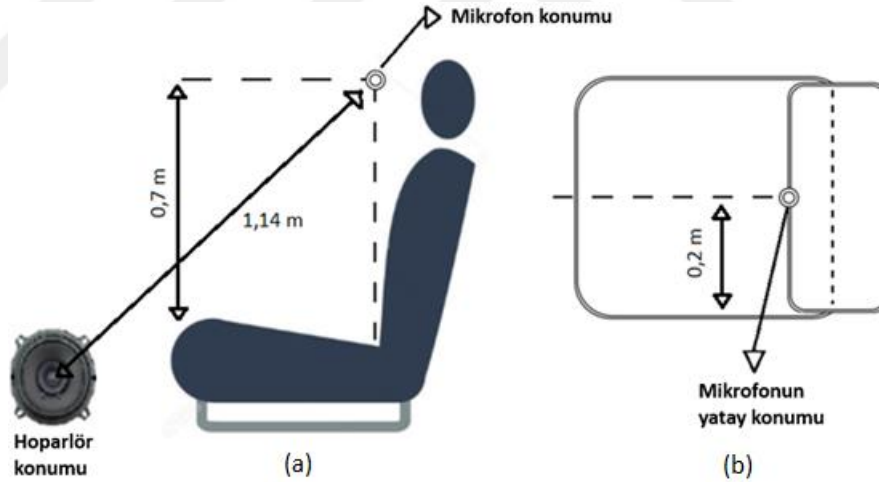
Şekil 3.3. Laboratuvar ortamında hoparlör çıkışı test düzeneği.

3.2.2. Sürücü Baş Hızasında Mikrofon Ölçümleri

Hoparlör çıkışının ölçülmesini takiben, araç içi akustik performansın daha kapsamlı bir şekilde analiz edilebilmesi için sürücü ve yolcu baş hizasında mikrofon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler, araç içi ses kalitesinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi ve sürüş sırasında oluşan akustik ortamın optimize edilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır.

ISO 5128 standardına uygun olarak, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi mikrofon, sürücü baş hizasında konumlandırılmıştır. Mikrofon yerleşimi, boş koltuğun oturma ve sırt yüzeylerinin kesişim noktasından 0,7 m yukarıda olacak şekilde belirlenmiş olup, boş koltuk için mikrofon koltuğun orta eksenine hizalanmıştır. Ayrıca mikrofon, koltuğun sol yanından orta eksene doğru 0,2 m kaydırılarak, sürücüye ait kulak seviyesini daha iyi temsil edecek şekilde yerleştirilmiştir.

Bununla birlikte, test edilen araç içerisindeki hoparlör konumu ve sürücü baş hizasına olan mesafesi de belirlenmiştir. Sürücü kapısına yerleştirilen hoparlörün sürücü baş hizasına olan öklidyen mesafesi 1,14 m olarak hesaplanmıştır. Hoparlör ile mikrofon arasındaki mesafeler; x eksen boyunca 0,777 m, y eksen boyunca 0,768 m ve z eksen boyunca 0,324 m olarak ölçülmüştür. Bu düzenleme, araç içindeki ses dağılımının doğru bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımakta ve hoparlör konumlandırmasının iyileştirilmesine yönelik değerlendirmeler yapılmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.4. Koltuk ile ilişkili mikrofon konumları: (a) Koltuğun yandan görünümü, (b) Koltuğun üstten görünümü.

Bu yerleşim ve düzenleme sayesinde, hoparlör çıkışı ve araç içi ses dağılımı üzerindeki etkiler detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu ölçümler, araç içi akustik performansın daha doğru bir şekilde modellenmesini ve hoparlör tasarım parametrelerinin optimize edilmesini sağlamaktadır.

Bu çalışmada, araç içi akustik modelleme ve transfer fonksiyonlarının hesaplanmasına yönelik ölçümler, belirli test koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm süreçlerinin güvenilirliğini, tutarlılığını ve tekrarlanabilirliğini sağlamak amacıyla, çevresel değişkenler sabitlenmiş, ölçüm ortamı ve araç içi koşullar belirli parametreler doğrultusunda kontrol altında tutulmuştur. Bu koşullar, elde edilen verilerin sağlıklı bir şekilde analiz edilmesine ve modelleme sürecinde olası değişkenliklerin minimuma indirgenmesine olanak tanımaktadır.

Ölçümler, dış ortam gürültüsünden izole edilmiş yarı yankısız bir odada gerçekleştirilmiştir. Bu ortam, harici ses kaynaklarının ölçüm sonuçlarına etkisini engelleyerek yalnızca araç içi akustik cevabın analiz edilmesini sağlamaktadır. Ortam sıcaklığı 25°C ve bağıl nem oranı %50 olarak sabitlenmiş, böylece sesin yayılımı ve malzemelerin akustik özellikleri üzerinde çevresel koşullardan kaynaklanan farklılıklar minimize edilmiştir.

Ölçüm sırasında, araç durağan hâlde tutulmuş ve motor sistemleri devre dışı bırakılmıştır. Klima ve havalandırma sistemleri kapatılarak, hava sirkülasyonunun akustik cevap üzerindeki olası etkileri en aza indirilmiştir. Araç içi koltuklar deri kaplama olup, bu malzemelerin ses yutum katsayıları modelleme aşamasında ihmal edilmiştir. Araç tavanı saç malzemedен üretilmiş olup, tavanın akustik davranışa etkisi göz ardı edilmiştir. Camlar tam kapalı konumda tutulmuş ve araç içinde herhangi bir insan bulunmamıştır. Bu yaklaşım, araç içi ses yansımalarının tutarlı bir şekilde ölçülmesini sağlamış ve ölçümler sırasında değişkenliğe yol açabilecek olası faktörleri ortadan kaldırmıştır.

Ölçümler, Şekil 3.4'teki yerleşime uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Hoparlörün etkin frekans bandı olan 85 Hz ile 12500 Hz aralığında yapılan ölçümler, düşük ve yüksek frekanslı ses bileşenlerinin hoparlör çıkışı üzerindeki etkilerinin analiz edilmesine olanak tanımaktadır.

Araç içi akustik modelleme sürecinde, bazı faktörlerin doğrudan modele dahil edilmesi mümkün olmamakla birlikte, bu unsurlar ölçüm ortamında kaçınılmaz olarak varlık

göstermektedir. Modelleme sırasında, bu faktörlerin ihmal edilmesi, araç içi transfer fonksiyonunun daha sade ve temel bileşenlere dayalı olarak oluşturulmasını sağlamak amacı taşımaktadır. Ancak, bu unsurların ölçüm sırasında transfer fonksiyonuna dolaylı olarak yansdığı göz önünde bulundurulmuştur.

Ölçüm sürecinde göz ardı edilen ancak modelin doğruluğunu sınırlı düzeyde etkileyebilecek faktörler arasında, araç içi titreşimler, kabin rezonansı, yan panel ve kapı kaplamalarının ses yutumu, araç iç döşemelerinin yansıtıcı/yutucu özellikleri ve araç içi hava akımı bulunmaktadır. Araç gövdesinde meydana gelen düşük seviyeli titreşimlerin hoparlör çıkışı üzerindeki etkisi minimal kabul edilerek modele dahil edilmemiştir. Benzer şekilde, kabin içerisinde belirli frekanslarda meydana gelen rezonanslar, hoparlör çıkışında önemli bir sapmaya yol açmayacağı varsayılarak modelleme dışında bırakılmıştır. Araç kapılarında ve yan panellerde kullanılan malzemelerin ses yutum katsayıları doğrudan işlenmemiş olsa da ölçüm ortamında bu malzemelerin dolaylı etkileri dikkate alınmıştır.

Tavan ve yan döşeme malzemelerinin ses yutma özellikleri de modele ilave edilmemiştir. Bu malzemelerin araç içi ses davranışı üzerindeki etkilerinin sınırlı olduğu öngörülmektedir. Klima ve havalandırma sistemleri kapatılmış olmasına rağmen, araç içi hava sirkülasyonunun tamamen engellenememesi nedeniyle, hava akımının hoparlör çıkışı üzerindeki etkisi modelleme sırasında göz ardı edilmiştir. Ek olarak, araç içi dikiş detayları, vidalar, bağlantı noktaları ve paneller arasındaki küçük boşluklar gibi yapısal unsurların transfer fonksiyonuna etkisi ihmal edilmiştir.

Bu ölçüm koşulları ve modelleme sınırları, araç içi akustik modellemenin doğruluğunu artırmak ve tekrarlanabilirliğini sağlamak amacıyla dikkatle belirlenmiştir. Ölçüm ortamında değişkenlerin titizlikle kontrol altında tutulması, hoparlör çıkışı ile sürücü baş hizasında elde edilen transfer fonksiyonlarının güvenilirliğini sağlamaktadır. Ancak, bazı faktörlerin doğrudan modele dahil edilmemesi, modelin yalın bir yapıda kalarak araç içi akustik davranışın genel hatlarını yansıtmasına olanak tanımaktadır.

3.3. Sistem Bileşenleri ve Modellenmesi

Araç içi ses sistemleri, birden fazla bileşenin etkileşim hâlinde olduğu karmaşık akustik yapılar olarak değerlendirilmektedir. Bu sistemlerin temel amacı, sürücü ve yolcular için yüksek kaliteli bir ses deneyimi sağlamaktır. Araç içi akustik ortam, hoparlör konumları, iç mekânda kullanılan malzemeler ve geometrik yapılar gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Bu nedenle, araç içi ses sistemi modellemesi, yalnızca hoparlörlerden yayılan ses dalgalarını değil, aynı zamanda sürücü baş hizasında meydana gelen ses transfer fonksiyonlarını da kapsayacak şekilde ele alınmalıdır.

Bu çalışmada, araç içi ses sisteminin modellemesi hem hoparlör çıkışlarındaki frekans cevapları hem de sürücü baş hizasında gerçekleştirilen akustik ölçümler temel alınarak yapılmıştır. İlk aşamada, giriş işareti, parametrik ekolayzır filtreleri, kuvvetlendirici ve hoparlör bileşenleri ayrı ayrı modellenmiştir. Daha sonra, hoparlörlerden yayılan sesin araç içinde farklı noktalarda nasıl bir akustik cevaba yol açtığı analiz edilmiştir. Sürücü baş hizasında elde edilen transfer fonksiyonu, sistem performansını değerlendirmek ve optimize etmek için kritik bir parametre olarak ele alınmıştır.

İşaret akışı, araç içi eğlence sistemi ses modülü üzerinden başlatılmakta ve sırasıyla kuvvetlendirici, hoparlör frekans cevapları ve parametrik ekolayzır filtreleri uygulanarak düzenlenmektedir. Hoparlörden çıkan ses, araç içi malzeme ve yüzeylerden yansyıp farklı frekans bileşenlerine ayrışmakta ve bu durum, araç içindeki çeşitli noktalarda farklılaşan frekans cevapları oluşmasına neden olmaktadır. Özellikle, sürücü baş hizasında ölçülen frekans tepkisi, sistem performansının optimize edilmesinde doğrudan hedeflenen bir çıktı olarak değerlendirilmektedir.

Bu tez kapsamında, araç içi akustik modellemede iki farklı yaklaşım benimsenmiştir. Birinci modelde, hoparlör çıkışındaki doğrudan frekans cevabı temel alınarak optimizasyon sağlanmıştır. İkinci modelde ise, sürücü baş hizasında ölçülen transfer fonksiyonu dikkate alınarak daha kapsamlı bir akustik modelleme gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, akustik ayarlamalar GA ve PSO gibi metasezgisel yöntemler kullanılarak iteratif bir yaklaşımla geliştirilmiştir.

Araç içi ses sistemlerinin modellenmesi ve optimizasyonunda, hoparlör ve sürücü baş hizasında elde edilen frekans tepkilerinin çarpımı, nihai ses performansını belirleyen kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, hoparlör konumlandırmaları, ekolayzır filtre ayarları ve kuvvetlendirici kazançları gibi parametreler, sistemin farklı frekans bileşenlerine verdiği cevapları optimize edecek şekilde düzenlenmiştir.

Sonuç olarak, bu modelleme yaklaşımı, araç içi ses sistemlerinde daha dengeli ve geniş bantlı bir ses performansı sağlamakta, akustik doğruluk ve konfor düzeyini artırmaktadır. İlerleyen bölümlerde, her bir bileşenin frekans cevabı detaylı olarak incelenecek ve bu bileşenlerin iteratif optimizasyon süreçleri ayrıntılı şekilde ele alınacaktır.

3.3.1. Giriş İşareti

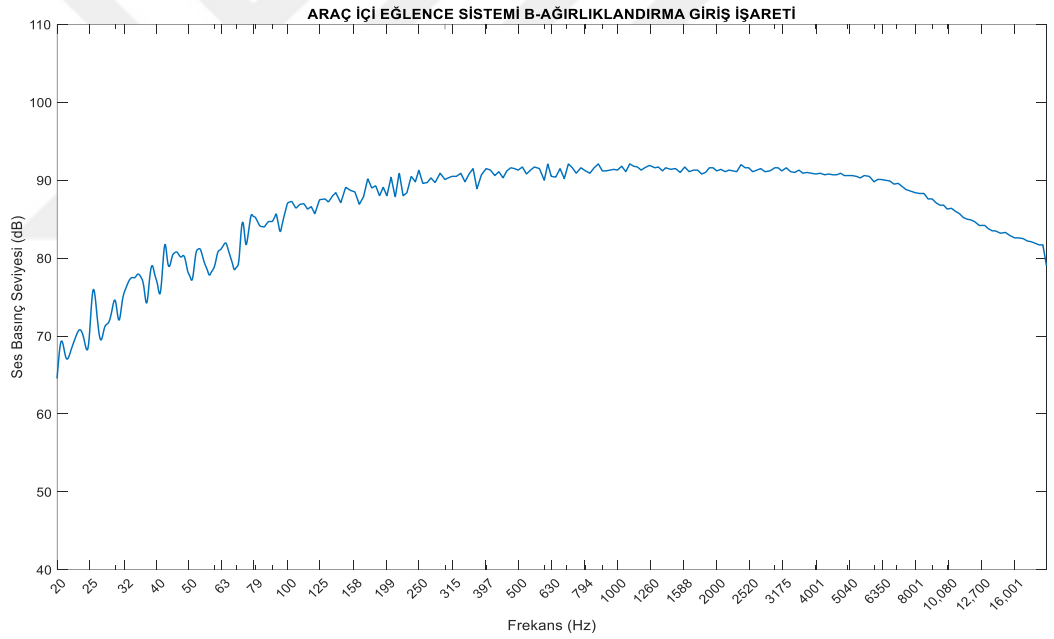
Araç içi ses sistemlerinin performans analizi ve optimizasyonu için kullanılan giriş işaretleri, sistemin frekans tepkisini doğru bir şekilde değerlendirebilmek için özenle seçilmelidir. Bu bağlamda, beyaz gürültü işaretleri, tüm frekans bileşenlerinde eşit güce sahip olmaları nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak, insan işitme sistemi her frekansa aynı duyarlılığı göstermediğinden, beyaz gürültünün doğrudan kullanımı, insan kulağının algısal tepkisini tam olarak yansıtmayabilir.

Bu sorunun üstesinden gelmek ve insan işitme sistemine daha yakın bir frekans cevabı elde etmek amacıyla giriş işaretine B-ağırlıklandırma uygulanmıştır. B-ağırlıklandırma, orta ila yüksek ses seviyelerinde, insan kulağının frekansa olan duyarlılığını daha iyi yansıtmak amacıyla tasarlanmış bir yöntemdir. Araç içi ses sistemlerinde genellikle orta-üst ses seviyeleri hedeflendiğinden, bu ağırlıklandırma eğrisi, akustik modellemelerde daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesine katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada kullanılan B-ağırlıklandırma eğrisi, 20 Hz – 20 kHz frekans aralığında elde edilmiş ve benzetime eklenmiştir. Bu eğri, SpectraPLUS-SC yazılımı ve ses analizörü yardımıyla, beyaz gürültü işareti üzerinde B-ağırlıklandırma filtresi

uygulanarak oluşturulmuştur. Bu süreçte, ölçümlerin doğruluğunu sağlamak için ses analizörü kullanılmış ve yazılım aracılığıyla frekans spektrumundaki değişiklikler kaydedilmiştir. Böylece, beyaz gürültü işaretine uygulanan B-ağırlıklandırma filtresinin oluşturduğu eğri, ölçüm yoluyla elde edilmiştir. Bu yöntem, frekans tepkisi analizi sırasında kullanılan işaretlerin insan algısıyla uyumlu bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır.

Şekil 3.5'te, bu işlem sonucunda elde edilen B-ağırlıklandırma filtresinin frekans cevabı gösterilmektedir. Referans olarak 1000 Hz frekansında 90 dB ses basınç seviyesi esas alınmıştır. Bu referans noktası, sistemin kalibrasyonu açısından kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 3.5. B-ağırlıklandırma filtresinin frekans cevabı.

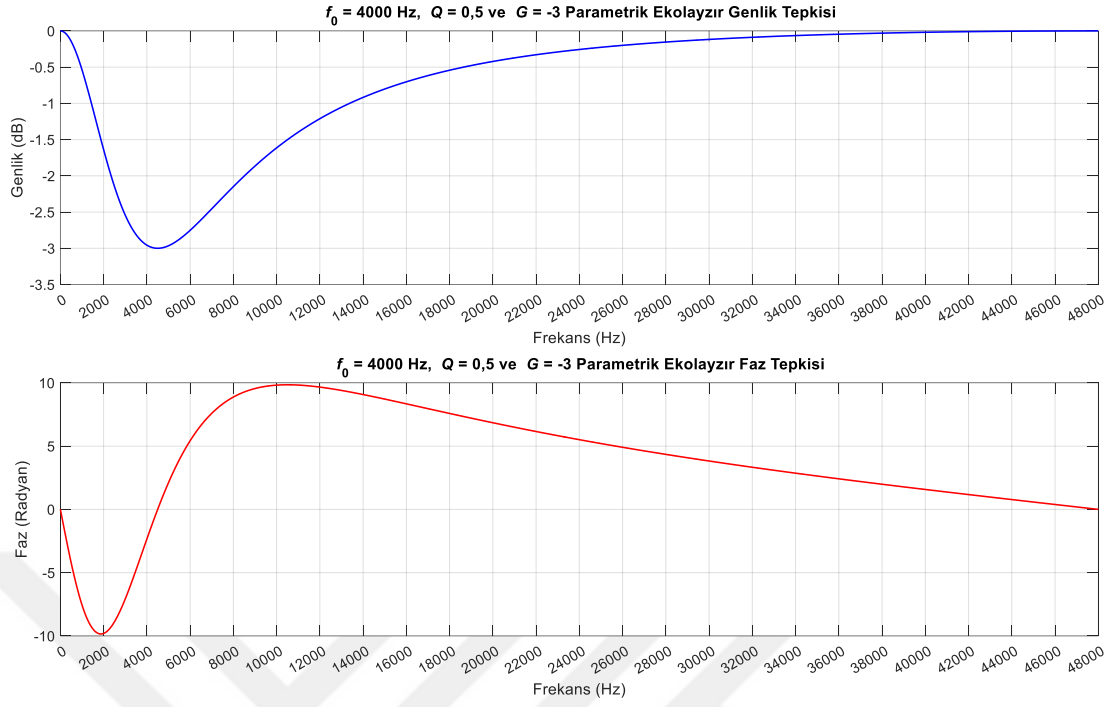
B-ağırlıklandırma işlemi uygulanmış beyaz gürültü işareti, modelleme sürecinde kullanılan giriş sesi olarak tanımlanmıştır. Bu işaret, hoparlörler ve araç içi transfer fonksiyonları üzerinde gerçekleştirilen analizlerde kullanılmak üzere üretilmiş ve sistemin frekans tepkisinin daha hassas bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımıştır.

3.3.2. Parametrik Ekolayzır Filtreler

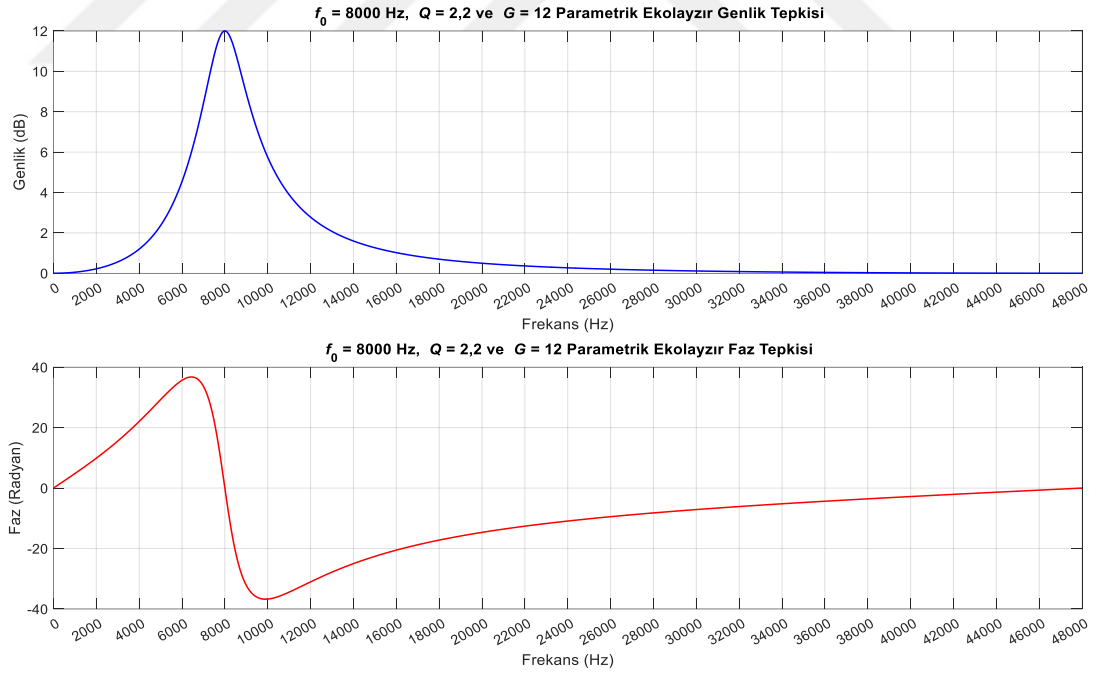
Kullanılan araç içi ses sistemindeki parametrik ekolayzırın benzetime dahil edilebilmesi için MATLAB'deki `fdesign.parmeq` fonksiyonundan yararlanılmıştır. Bu fonksiyon, belirli bir merkez frekansta kazanç ayarlamalarının yapılmasına olanak tanıyarak sistemin akustik performansını optimize etmek için kullanılan bir araçtır. Fonksiyon, merkez frekans (f_0), kalite faktörü (Q), kazanç (G) ve örnekleme frekansı (f_s) parametrelerini kullanarak frekans cevabı oluşturmaktadır.

Filtrenin örnekleme frekansı, araç içi ses sisteminin örnekleme frekansına uygun olarak 96 kHz olarak belirlenmiştir. İlgili fonksiyon hem FIR hem de IIR filtre tasarımına olanak tanımaktadır. Ancak, kullanılan sistem ikinci dereceden IIR filtreleme yöntemine sahip olduğundan, modelleme sürecinde iki dereceli bir IIR parametrik ekolayzır tasarlanmıştır.

Örnek tasarım olarak, Şekil 3.6'da $f_0=4000$ Hz, $Q=0,5$ ve $G=-3$ dB ve Şekil 3.7'de $f_0=8000$ Hz, $Q=2,2$ ve $G=12$ dB olarak belirlenen parametrik ekolayzır filtrelerinin genlik ve faz tepkileri verilmiştir. Bu iki farklı tasarım, merkez frekans, bant genişliği ve kazanç değişimlerinin frekans cevabı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla değerlendirilmiştir.



Şekil 3.6. Parametrik ekolayzır için $f_0=4000 \text{ Hz}$, $Q=0,5$ ve $G=-3 \text{ dB}$ değerleriyle oluşturulan filtre tasarımının genlik ve faz tepkisi.



Şekil 3.7. Parametrik ekolayzır için $f_0=8000 \text{ Hz}$, $Q=2,2$ ve $G=-3 \text{ dB}$ değerleriyle oluşturulan filtre tasarımının genlik ve faz tepkisi.

Şekil 3.6’da görülen filtrede düşük Q değeri, geniş bir bant aralığında daha yayılmış bir kazanç değişimi sağlarken, kazancın negatif olması bu frekans aralığında işaretin zayıflatılmasına neden olmuştur. Şekil 3.7’de ise daha yüksek Q faktörü dar bantlı ve belirgin bir kazanç artışı sağlamıştır. Bu, seçili frekans çevresinde daha keskin bir yükselme oluştururken, faz cevabında da daha belirgin değişikliklere yol açmaktadır. Bu durum, parametrik ekolayzırların esnek frekans ayarlamaları yapabilme yeteneğini göstermektedir.

Literatürde, parametrik ekolayzır tasarımı yapılırken kazanç ve Q faktörü değerlerinin belirli sınırları aşmaması gerektiği belirtilmiştir. DSP uygulamalarında doygunluğu önlemek için kazancın 12 dB’i geçmemesi ve Q faktörünün 2.2’nin altında tutulması gerekmektedir. Yüksek Q faktörü, frekans bileşenlerinde aşırı dar bir filtreleme yaparak istenmeyen çınlama veya faz bozulmalarına yol açabilir. Bu nedenle, araç içi ses sistemlerinde daha yumuşak ve doğal bir akustik elde edebilmek için Q faktörünün optimum seviyede kalması önemlidir (Ramos ve López, 2006).

Araç içi ses sistemlerinde eşit ses yüksekliği konturu prensibi, farklı frekans bantlarında sesin aynı şiddette algılanmasını hedeflemektedir (ISO, 2003). Bu prensibe dayanarak, ideal ses yoğunluğu eğrisi tanımlanmış ve frekans bazında ayarlanması gereken parametrik filtre özellikleri belirlenmiştir.

Bu çalışmada, araç içi ses sistemlerinde ideal frekans cevabını elde edebilmek için 10 adet parametrik ekolayzır filtresi kullanılmıştır. Her bir filtrenin merkez frekansı, kazancı ve Q faktörü, ISO 226:2003 standardına uygun olarak belirlenmiş olup Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. ISO 226:2003 normu eşit ses yüksekliği konturu filtre değerleri

Merkez Frekans Değerleri (Hz)	Kazanç Değerleri (dB)	Q Faktör Değerleri
55	10.4	0.9
71	11.2	0.6
125	-2.4	0.7
250	-2.4	0.7
500	-1.2	0.7
1060	7.5	1.0
1280	2.0	0.9
3220	-10.0	1.0
6400	10.5	1.9
8100	9.5	2.0

Bu çalışmada, araç içi eğlence sistemlerinde ideal ses deneyimi sağlamak amacıyla, mevcut filtre yapılarıyla uyumlu olacak şekilde tasarlanmış 2. dereceden 10 adet parametrik ekolayzır filtresi kullanılmıştır. Filtrelerin tasarımı, Matlab R2021b yazılımı ve DSP System Toolbox kütüphanesinde yer alan fdesign.parmeq fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, parametrik ekolayzır filtrelerinin belirlenen parametreler doğrultusunda optimize edilmesine ve araç içi ses sistemlerinde etkin bir şekilde uygulanmasına olanak tanımaktadır.

3.3.3. Kuvvetlendirici

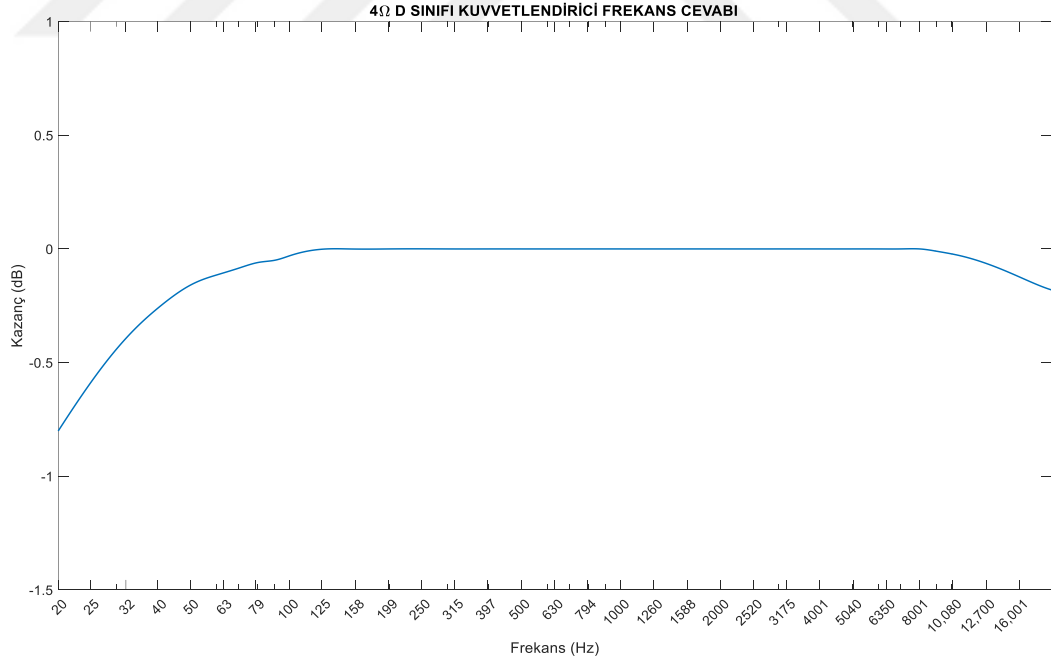
Kuvvetlendiriciler, ses sistemlerinde işaret güçlendirme işlevi gören temel bileşenlerden biridir. Araç içi eğlence sistemlerinde, kuvvetlendiriciler ses işaretinin genliğini artırarak hoparlörlerin daha yüksek ses seviyelerinde çalışmasını ve sesin daha kaliteli bir şekilde üretilmesini sağlar. Bu süreç, işaret-gürültü oranını (SNR) iyileştirerek sesin netliğini artırmakta, düşük seviyeli işaretlerin daha belirgin olmasını sağlamakta ve distorsiyonu (bozulmayı) minimuma indirmektedir.

Araç içi eğlence ve ses sistemlerinde D sınıfı kuvvetlendiriciler yaygın olarak tercih edilmektedir. D sınıfı kuvvetlendiriciler, geleneksel analog kuvvetlendiricilere kıyasla daha yüksek enerji verimliliğine sahip olup daha az ısınarak çalışmaktadır. Bu kuvvetlendiriciler, ses işaretlerini sayısal formatta işleyerek doğrudan güçlendirme işlemi gerçekleştirmekte ve işareti tekrar analog formata dönüştürmeden hoparlörlere

iletmektedir. Bu yöntem, enerji kayıplarını azaltarak daha düşük enerji tüketimiyle yüksek ses seviyelerine ulaşılmasına olanak tanımaktadır. Aynı zamanda, D sınıfı kuvvetlendiriciler geniş bir frekans aralığında dengeli ve tutarlı bir frekans cevabı sağlamaktadır. Bu özellikler, müzik, ses efektleri ve araç içi eğlence uygulamalarında D sınıfı kuvvetlendiricileri ideal bir seçenek hâline getirmektedir (Mei vd., 2022).

Bu çalışmada kullanılan D sınıfı kuvvetlendirici, 4 Ω empedans değerine sahip hoparlörlerle uyumlu olacak şekilde seçilmiştir. Seçilen kuvvetlendirici, araç içi hoparlörlerin optimal performans göstermesini sağlamak amacıyla, araç akustiği ve hoparlör yerleşimi dikkate alınarak tasarlanmıştır.

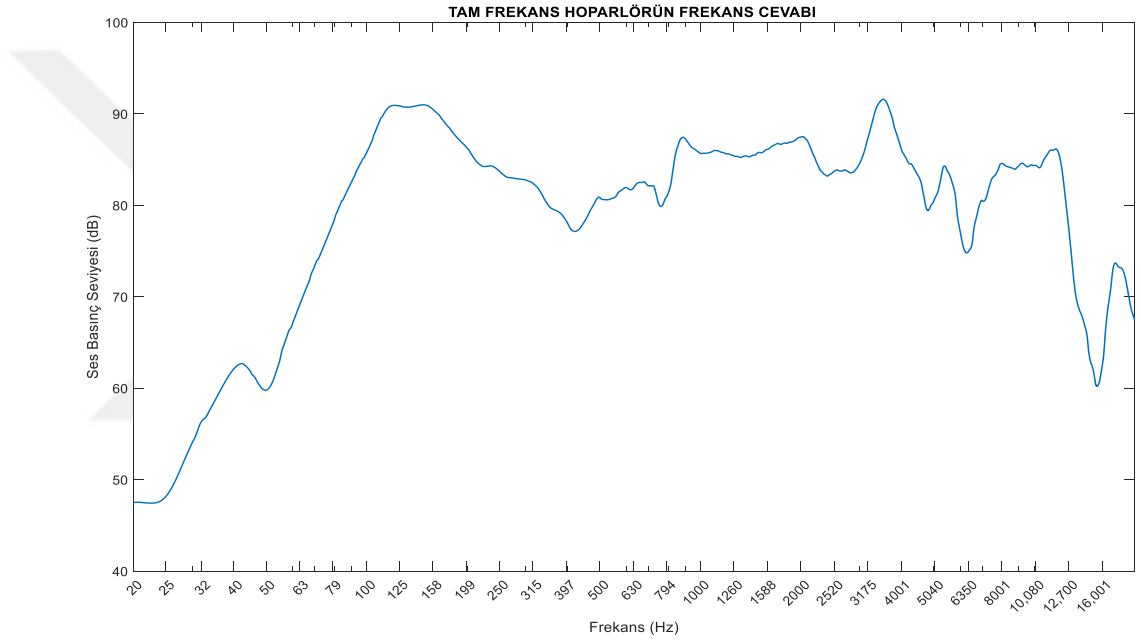
Şekil 3.8’de, kuvvetlendiricinin 4 Ω yük altında gösterdiği frekans cevabı detaylandırılmaktadır. Grafikte, kuvvetlendiricinin düşük, orta ve yüksek frekanslardaki kazanç profili gözlemlenmektedir. Bu frekans cevabı, kuvvetlendiricinin geniş bir frekans spektrumunda stabil bir performans sunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3.8. D sınıfı kuvvetlendirici frekans cevabı.

3.3.4. Hoparlör

Bu çalışmada, geniş frekans aralığında ses üretimi sağlayan tam frekans hoparlör kullanılmıştır. Şekil 3.9’da, bu hoparlörün frekans cevabı grafiksel olarak sunulmaktadır. Hoparlör üreticisi tarafından sağlanan verilere göre, cihazın etkin çalışma frekans aralığı 85 *Hz* ile 12,5 *kHz* arasında değişmektedir. Bu geniş spektrum, hoparlörün hem düşük frekanslı bas sesleri hem de yüksek frekanslı tiz sesleri verimli bir şekilde üretebildiğini göstermektedir.



Şekil 3.9. Tam frekans hoparlörün frekans cevabı.

Hoparlörün geniş frekans aralığı, araç içi eğlence sistemlerinde farklı ses bileşenlerinin doğru ve dengeli bir şekilde yansıtılmasına katkı sağlamaktadır. Bu durum, ses kalitesinin bütünsel olarak iyileştirilmesine olanak tanırken, hoparlörün dinamik aralığının artırılmasıyla daha zengin bir ses deneyimi elde edilmesini sağlamaktadır.

Hoparlörün benzetim ortamına aktarılmasında, üretici firma tarafından sağlanan frekans cevabı eğrisi referans olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, hoparlör ölçümleri laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş ve elde edilen frekans tepkisi, üretici verileri ile

uyumlu bulunmuştur. Bu doğrulama, hoparlörün belirtilen frekans aralığında kararlı bir performans sergilediğini göstermekte olup, modellemenin güvenilirliğini artırmaktadır.

3.4. Tam Frekans Hoparlörün Sistem Çıkışının Modellenmesi ve Optimizasyonu

Bu çalışmada, hoparlör çıkışında ideal ses performansının sağlanması amacıyla giriş işaretinin işlenmesi, filtrelenmesi ve kuvvetlendirici ile hoparlör bileşenlerinin benzetim ortamına entegrasyon süreçleri ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Hoparlör sisteminin çıkışını daha gerçekçi bir şekilde modelleyebilmek için bir benzetim modeli oluşturulmuş, bu model üzerinden deneysel ölçümler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar eşit ses yüksekliği konturu ile kıyaslanmıştır. Benzetim sürecinde, deneysel veriler ve teorik modeller arasındaki ilişkiyi analiz edebilmek amacıyla çeşitli istatistiksel yöntemlerden faydalanılmıştır. Elde edilen bu veriler, filtre parametrelerinin optimizasyonu için GA kullanılarak değerlendirilmiş ve hoparlör çıkışındaki işaretin frekans tepkisinin iyileştirilmesi sağlanmıştır.

3.4.1. Benzetim Modeli

Hoparlör sisteminin benzetim modeli oluşturulurken, temel giriş işareti olarak B ağırlıklandırılmış beyaz gürültü işareti kullanılmıştır. Bu işaret, insan kulağının orta ve yüksek frekanslardaki duyarlılığını yansıtacak şekilde tasarlanmıştır. Modelleme sürecinde, parametrik ekolayzır filtreleri, kuvvetlendirici ve hoparlör bileşenleri sırasıyla sisteme entegre edilmiştir.

Bu entegrasyon süreci, ses işaretinin aşamalı olarak işlenmesini sağlamak amacıyla kaskat bağlantı yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, her bir bileşenin çıkışının bir sonraki bileşenin girişi olarak kullanıldığı, dolayısıyla sistemin modüler olarak modellenmesini sağlayan bir yaklaşımdır. Böylece, giriş işaretinden hoparlör çıkışına kadar tüm süreç, bireysel bileşenlerin etkilerini içerecek şekilde yapılandırılmıştır.

Hoparlör modelinin oluşturulmasında, işaret işleme teorisinin temel kavramlarından biri olan konvolüsyon kritik bir rol oynamaktadır. Konvolüsyon, bir işaretin (giriş işareti) belirli bir sistem tepkisi (ekolayzır filtresi, kuvvetlendirici veya hoparlör cevabı) ile işlenmesini sağlayan matematiksel bir işlemdir. Bu süreçte, giriş işaretinin her bir bileşeni, sistemin dürtü cevabı ile çarpılarak zaman alanında katlanır ve toplamı alınarak çıkış işareti elde edilir.

Konvolüsyon işlemi, Denklem (3.3) ile gerçekleştirilmektedir.

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad (3.3)$$

Burada $y(t)$ zaman alanında çıkış işaretini, $x(t)$ giriş işaretini, $h(t)$ sistem tepkisini (dürtü cevabı) ve τ zaman kaydırmasını temsil etmektedir. Konvolüsyon işlemi, frekans alanında Denklem (3.4) ile gösterilen çarpma işlemine dönüşür.

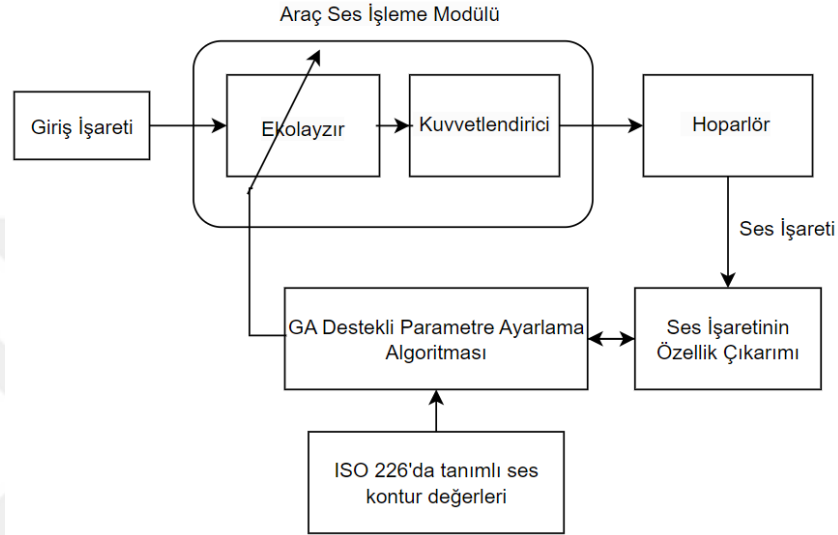
$$Y(f) = X(f)H(f) \quad (3.4)$$

Burada $Y(f)$, $y(t)$ çıkış işaretinin Fourier dönüşümü, $X(f)$, $x(t)$ giriş işaretinin Fourier dönüşümü ve $H(f)$ sistem transfer fonksiyonuna karşılık gelmektedir.

Bu özellik, işaret işleme alanında, özellikle hoparlör ve ekolayzır filtrelerinin tasarımı sırasında, karmaşık işaretlerin daha verimli işlenmesine olanak tanımaktadır. Çalışmada, tüm modelleme işlemleri frekans alanında gerçekleştirildiğinden, konvolüsyon işlemi de bu alanda çarpma işlemi olarak uygulanmıştır (Oppenheim vd., 1996).

Sistem çıkışında oluşacak işaretin modellenmesi için öncelikle, Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de gösterilen giriş işareti, kuvvetlendirici ve hoparlör bileşenlerinin frekans tepkileri MATLAB ortamına aktarılmıştır. Parametrik ekolayzır filtrelerinin frekans cevapları, MATLAB DSP System Toolbox içerisinde yer alan "freqz" fonksiyonu kullanılarak hesaplanmış ve ilgili frekans tepkileri elde edilmiştir.

Gerçek sistemde kullanılan 96 kHz örnekleme frekansı, benzetim ortamında da uygulanarak modelin gerçek dünya koşullarını yansıtmayı sağlanmıştır. Elde edilen frekans cevapları, frekans alanında çarpılmış ve hoparlör çıkışı modellenmiştir. Şekil 3.10, hoparlör modelinde araç içi ses sisteminin temel bileşenlerini ve bu bileşenler arasındaki işaret akışını detaylı bir şekilde göstermektedir.



Şekil 3.10. Hoparlör çıkış işaretinin uygunlaştırılması amacıyla, parametrik ekolayzır filtre parametre optimizasyonunu içeren benzetim modelinin blok diyagramı.

Burada giriş işareti, sistemin başlangıç noktası olup, işlenmesi gereken ses işaretini temsil etmektedir. Bu giriş işareti, on adet parametrik ekolayzır filtresi içeren bir ekolayzır modülüne uygulanmaktadır. Ekolayzırdan çıkan işaret, kuvvetlendirici modülü üzerinden geçerek güçlendirilmekte ve hoparlörlere iletilmektedir. Hoparlör çıkışından elde edilen işaret, eşit ses yüksekliği konturu ile istatistiksel metrikler kullanılarak karşılaştırılmak amacıyla analiz edilir. Bu karşılaştırmadan elde edilen veriler, GA destekli parametre ayarlama algoritmasına iletilir. GA destekli algoritma, hoparlör çıkışının, ISO 226 standardındaki eşit ses yüksekliği konturlarına uymasını sağlamak amacıyla parametrik ekolayzır filtre parametrelerini optimize eder. Böylece, başlangıçta belirlenen ekolayzır parametreleri yerine, algılanan ses kalitesini iyileştiren optimal filtre değerleri elde edilir ve sistemin frekans tepkisi insan işitme duyarlılığına daha uygun hâle getirilir.

3.4.2. Benzetim Performans Ölçütleri

Bu çalışmada, benzetimden elde edilen sonuçların deneysel verilerle karşılaştırılması ve sistem performansının değerlendirilmesi amacıyla istatistiksel analizler uygulanmıştır. Benzetim sonuçlarının ideal frekans tepkisi eğrisine benzerliği analiz edilerek, sistemin doğruluğu ve tutarlılığı değerlendirilmiştir. Bu süreçte, Pearson korelasyon analizi ve RMSE yöntemlerinden yararlanılmıştır.

Pearson korelasyon analizi, iki veri seti arasındaki doğrusal ilişkiyi ölçmek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Bu analiz, iki değişkenin birlikte nasıl değiştiğini belirlemeye yardımcı olur ve -1 ile 1 arasında bir korelasyon katsayısı (r) üretir. Korelasyon katsayısının 1'e yakın olması güçlü pozitif doğrusal ilişkiyi, -1'e yakın olması ise güçlü negatif doğrusal ilişkiyi gösterir. 0'a yakın bir değer ise iki veri seti arasında anlamlı bir ilişki olmadığını ifade eder. Bu çalışmada, elde edilen sonuçlar arasındaki doğrusal ilişkiyi incelemek amacıyla Pearson korelasyon analizi uygulanmıştır. Pearson korelasyon katsayısı, Denklem (3.5) ile hesaplanmaktadır.

$$r = \frac{n \sum(xy) - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (3.5)$$

Burada x ve y veri setlerini, n ise toplam veri noktası sayısını ifade etmektedir.

RMSE, iki veri seti arasındaki farkların büyüklüğünü ölçmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, elde edilen sonuçlar arasındaki sapmaları değerlendirerek hata miktarını nicel (kantitatif) olarak belirler. Düşük RMSE değeri, sonuçların birbirine yakın olduğunu gösterirken, yüksek RMSE değeri daha büyük sapmaların mevcut olduğunu ifade eder. RMSE değeri, Denklem (3.6) ile hesaplanmaktadır.

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (3.6)$$

Bu istatistiksel analizler, eşit ses yüksekliği konturu ile deneysel ve benzetim sonuçları arasındaki uyumu değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Pearson korelasyon analizi, veri setleri arasındaki doğrusal ilişkiyi belirlerken, RMSE analizi bu ilişkinin gücünü nicel olarak ölçmektedir (Ott ve Longnecker, 2016).

3.4.3. Hoparlör Çıkışının Eşit Ses Yüksekliği Konturu ile Uyumun İyileştirilmesi

Bu çalışmada, hoparlör çıkış işaretinin eşit ses yüksekliği konturu ile uyumlu hâle getirilmesi amacıyla, filtre parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, geniş çözüm alanlarında etkili arama yapabilen ve belirli bir probleme özgü olmayan metasezgisel algoritmalar tercih edilmiştir. Metasezgisel algoritmalar, karmaşık problemlerde hızlı ve verimli çözümler sunarak küresel optimuma yakın sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır. Bu çalışmada, filtre parametrelerinin optimize edilerek hoparlör çıkışının eşit ses yüksekliği konturuna uyumunun artırılması sürecinde metasezgisel algoritmalar arasından GA kullanılmıştır.

GA, geniş ve karmaşık çözüm alanlarında sunduğu esneklik ve uyarlanabilirlik sayesinde önemli bir optimizasyon aracı olarak öne çıkmaktadır. Özellikle, çok sayıda frekans bileşeni ve parametre kombinasyonunun bulunduğu araç ses sistemleri gibi optimizasyon problemlerinde etkili bir şekilde çalışmaktadır (Alam vd., 2020).

Bu çalışmada, GA optimizasyon süreci, MATLAB yazılımının Global Optimization Toolbox kütüphanesinde yer alan “optimoptions” ve “ga” fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Popülasyon boyutu 100 birey olarak belirlenmiş ve her iterasyonda 100 farklı çözüm değerlendirilmiştir. Bu yapılandırma, çözüm alanının geniş bir şekilde taranmasını sağlarken, optimizasyon sürecinin verimliliğini artırmıştır. Maksimum iterasyon sayısı 50 nesil olarak sınırlandırılmış olup, bu sayede işlem süresi kontrol altında tutulmuştur.

GA'nın başarısı, çeşitli parametrelerin dikkatli bir şekilde seçilmesine bağlıdır. Bu çalışmada, çaprazlama oranı 0,8 olarak belirlenmiştir. Bu oran, genetik çeşitliliği korurken başarılı özelliklerin bir sonraki nesle aktarılmasını sağlamaktadır. Ayrıca,

mutasyon fonksiyonu olarak üniform mutasyon seçilmiş ve mutasyon oranı 0,2 olarak belirlenmiştir. Bu sayede, algoritmanın yerel minimumlara sıkışmadan daha geniş bir çözüm uzayını keşfetmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışmada, GA uygulanması sırasında seçme fonksiyonu olarak stokastik uniform seçim yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, bireylerin uygunluk değerlerine bağlı olarak seçilme olasılığını artırarak, daha iyi performans gösteren çözümlerin bir sonraki nesilde daha fazla temsil edilmesini sağlamaktadır. Çaprazlama işlemi için aritmetik çaprazlama yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem, ebeveyn bireylerin genetik bilgilerini birleştirerek yeni bireylerin oluşturulmasına katkıda bulunur ve böylece daha iyi çözümlerin bulunmasını kolaylaştırır.

GA'nın uygulanmasında, uygunluk fonksiyonu, hoparlör çıkış işareti ile eşit ses yüksekliği konturu arasındaki benzerliği değerlendirecek şekilde tanımlanmıştır. Bu fonksiyonun hesaplanmasında, Pearson korelasyon katsayısı ve RMSE değerleri kullanılmıştır. GA, doğası gereği uygunluk fonksiyonunu minimize etmeye çalıştığından, korelasyon katsayısı pozitif olduğu durumlarda uygunluk değeri korelasyonun tersi ($1/\text{korelasyon}$) olarak hesaplanmıştır. Eğer korelasyon katsayısı negatif bir değer alırsa, fonksiyona bir ceza değeri eklenmiştir. Bu yaklaşım, algoritmanın korelasyonu artırmaya yönelik evrimleşmesini sağlayarak, uygunluk değerinin korelasyon yükseldikçe azalmasına imkân tanımaktadır. Bunun yanı sıra, RMSE değeri de uygunluk fonksiyonuna dâhil edilmiş, daha düşük RMSE değerleri hedeflenerek hoparlör çıkışının eşit ses yüksekliği konturuna daha yakın olması sağlanmıştır. Bu yöntem, araç içi ses sistemlerinin akustik performansının artırılmasına katkı sunmuştur.

Genotip temsili, hoparlör filtre parametrelerinin bir dizi olarak kodlanması ile gerçekleştirilmiştir. Her bir genotip, merkez frekansı, kazanç ve Q faktörü olmak üzere üç temel parametreyi içeren bir vektör şeklinde modellenmiştir. Bu genetik temsil yapısı, Denklem (3.7) ile matematiksel olarak ifade edilmiştir.

$$\text{genotype} = [f_1, G_1, Q_1, f_2, G_2, Q_2, \dots, f_{10}, G_{10}, Q_{10}] \quad (3.7)$$

Bu çalışmada kullanılan genotipler, ISO 226:2003 standardı tarafından belirlenen ve Çizelge 3.3'te sunulan alt ve üst sınırlar (I_b ve u_b) içinde tanımlanmıştır. Bu sınırlar, filtre parametrelerinin eşit ses yüksekliği konturuna daha yakın olmasını sağlamak amacıyla belirlenmiştir. Birinci filtreden onuncu filtreye kadar tüm alt sınırlar (I_b) ve üst sınırlar (u_b) verilmiştir.

Çizelge 3.3. Genotip filtre parametreleri için alt ve üst sınır değerleri

Merkez Frekans Değerleri (Hz)		Kazanç Değerleri (dB)		Q Faktör Değerleri	
I_b	u_b	I_b	u_b	I_b	u_b
52	64	8.0	12.0	0.7	1.1
64	102	8.0	12.0	0.5	0.8
102	160	-3.5	-0.5	0.8	1.2
200	340	-3.5	-0.5	0.6	0.9
440	640	-2.5	-0.5	0.6	0.9
850	1100	6.0	10.5	0.8	1.2
1100	1400	0.5	4.0	0.8	1.1
2850	4250	-12.0	-8.0	0.8	1.2
5700	6800	8.0	12.0	1.6	2.1
7600	9400	7.5	11.5	1.7	2.2

GA'nın hesaplama karmaşıklığı, popülasyon büyüklüğüne ve nesil sayısına bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada kullanılan parametreler, hesaplama süresini dengeli bir şekilde kontrol altında tutarken, aynı zamanda yeterli genetik çeşitlilik ve optimizasyon performansı sağlamak amacıyla titizlikle seçilmiştir. Bu parametreler, GA'nın esneklik ve uyarlanabilirlik özelliklerini en üst düzeye çıkararak, araç içi ses sistemlerinin frekans tepkisinin optimize edilmesine uygun bir ortam oluşturmuştur. Bu optimizasyon süreci hem sürücüler hem de yolcular için daha yüksek kaliteli ve konforlu bir ses deneyimi sunulmasına katkı sağlamıştır (Başay vd., 2024).

3.5. Sürücü Baş Hizasındaki Çıkışın Modellemesi ve Eşit Ses Yüksekliği Konturu ile Uyumun İyileştirilmesi

Araç içi akustik sistemlerin tasarım ve optimizasyon süreçlerinde, yalnızca hoparlör çıkışına odaklanmak yerine, sürücü baş hizasında deneyimlenen ses seviyesini esas

almak daha gerçekçi ve kullanıcı odaklı bir yaklaşım sunmaktadır. Araç içerisindeki en önemli birey olarak değerlendirilen sürücü, hem ses deneyiminin birincil öznesi hem de araç içi akustiğin dikkat, konfor ve yorgunluk üzerindeki etkilerinin doğrudan muhatabıdır. Bu nedenle, hoparlörün frekans tepkisinin yalnızca çıkış düzeyinde değil, sürücü baş hizasında elde edilen akustik cevap bağlamında eşit ses yüksekliği konturuna uygun hale getirilmesi kritik bir hedef olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada, sürücü baş hizasında ideal ses deneyimini sağlamak amacıyla, araç içi akustik etkiler modellenmiş ve hoparlör çıkışı için oluşturulan benzetim modeline entegre edilmiştir. Daha sonra, benzetim sonuçları, deneysel veriler ve eşit ses yüksekliği konturu arasındaki ilişki istatistiksel analizler ile değerlendirilmiş, kontur ile uyumun iyileştirilmesi sürecinde bu analizlerden yararlanılmıştır. Benzetim modeli ve istatistiksel yöntemler birlikte kullanılarak, filtre parametreleri GA ve PSO algoritmaları yardımıyla optimize edilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.5.1. Araç İçi Akustik Etkinin Modellenmesi ve Benzetim Modelinin Oluşturulması

Sürücü baş hizasında ses dağılımını anlamak ve optimize edebilmek amacıyla, ortamın akustik davranışını tanımlayan bir model geliştirilmiştir. Bu bağlamda, giriş-çıkış ilişkilerinin doğrudan ölçümlere dayalı olarak belirlenmesi nedeniyle, ampirik modelleme yaklaşımı benimsenmiştir. Ampirik modelleme, sistemin fiziksel yapısına dair ayrıntılardan bağımsız olarak, giriş (hoparlör çıkışı ölçümleri) ve çıkış (sürücü baş hizası ölçümleri) arasındaki ilişkiyi frekans bölgesinde oranlayarak araç içi akustik ortamın frekans cevabını elde etmeyi amaçlamaktadır. Bu yöntem sayesinde, hem ölçümlere dayalı bir anlayış geliştirilmiş hem de sistemin daha gerçekçi bir şekilde temsil edilmesi sağlanmıştır.

Modelleme çalışması kapsamında, hoparlör çıkışından sürücü baş hizasına uzanan akustik ortamın davranışı, gerçekleştirilen ölçümler aracılığıyla detaylı bir şekilde karakterize edilmiştir. Ortamın frekans tepkisini farklı senaryolar altında analiz edebilmek amacıyla, rastgele belirlenmiş yirmi beş farklı filtre parametresi

kullanılmıştır. Her bir filtre parametre seti için ölçümler dört kez tekrarlanmış ve elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınarak nihai veriler oluşturulmuştur. Bu yöntem sayesinde, her bir parametre için daha güvenilir sonuçlar elde edilmiştir. Toplanan veriler, hoparlör çıkışı ile sürücü baş hizasındaki ses seviyesi arasındaki ilişkiyi modellemek ve ortamın akustik transfer özelliklerini tanımlamak için bir temel oluşturmuştur.

Araç içi akustik ortamın frekans cevap eğrisi, giriş (hoparlör çıkışı) ile çıkış (sürücü baş hizası) arasındaki orana dayalı olarak Denklem (3.8) ile çıkarılmıştır.

$$H(f) = \frac{\text{Çıkış (Sürücü Baş Hizası)}}{\text{Giriş (Hoparlör Çıkışı)}} \quad (3.8)$$

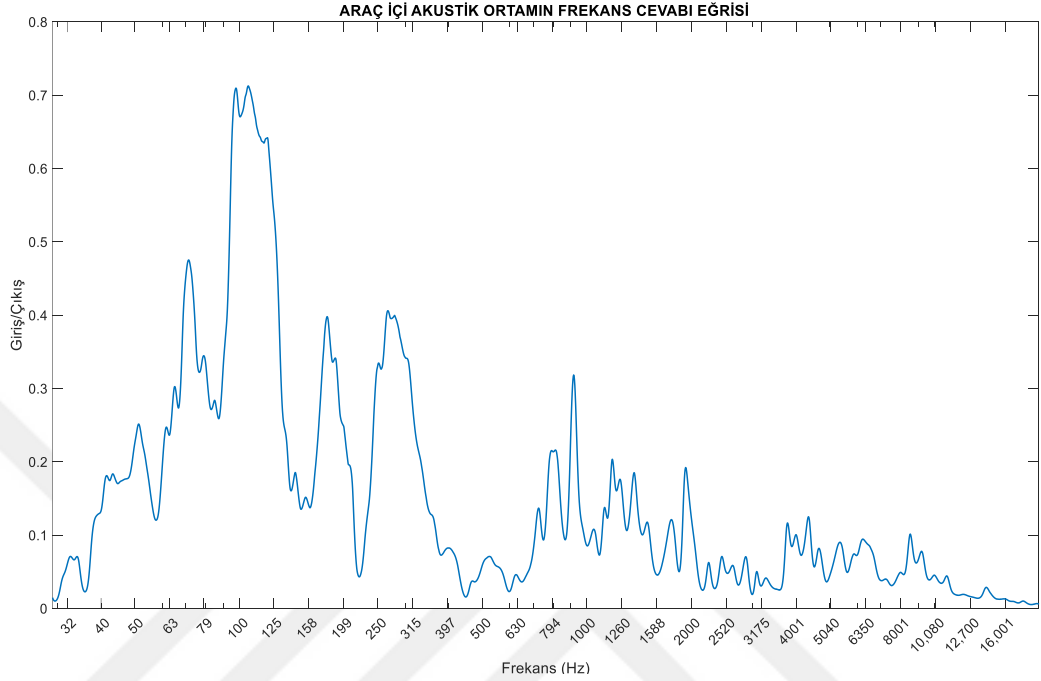
Bu yaklaşım, her bir senaryo için hoparlör ile sürücü baş hizası arasındaki akustik geçişi tanımlayan frekans cevabının elde edilmesini mümkün kılmıştır. Ancak hem giriş hem de çıkış işaretlerinin logaritmik ölçekte elde edilmiş olması nedeniyle, frekans cevabı hesaplanmadan önce veriler lineer ölçeğe dönüştürülmüştür. Desibel ölçümlerinden lineer değerlere geçiş için Denklem (3.9) kullanılmıştır.

$$X_{lineer} = X_{ref} \cdot 10^{X_{dB}/10} \quad (3.9)$$

Burada, X_{lineer} , lineer ölçekteki değeri; X_{dB} , logaritmik ölçekteki dB cinsinden değeri; X_{ref} ise referans değeri ifade etmektedir. Ses basıncı için genellikle referans değer olarak $20\mu Pa$ alınmaktadır.

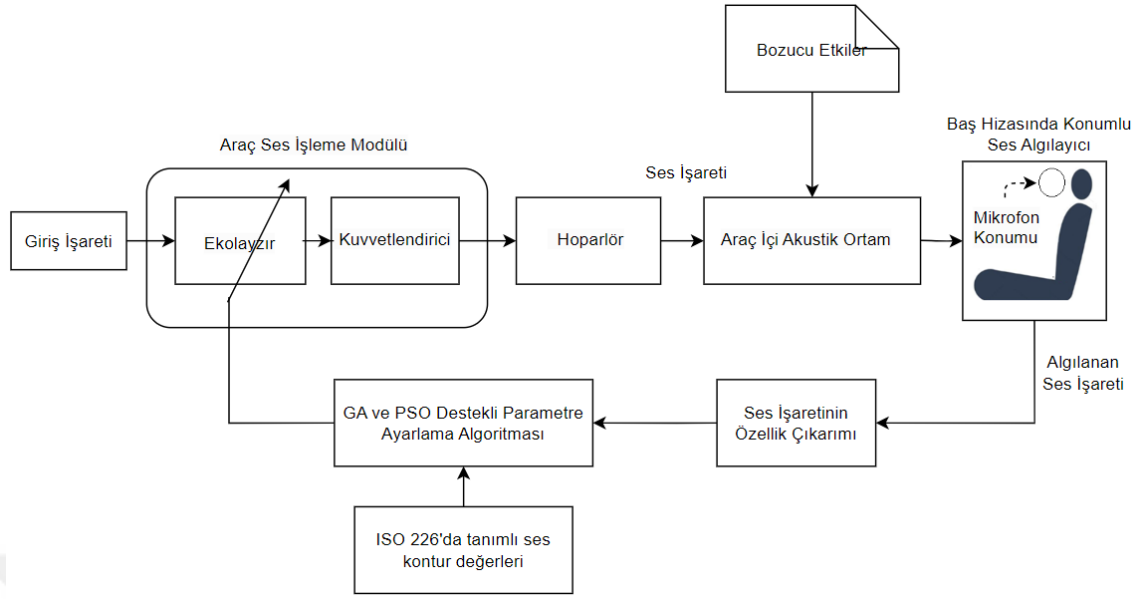
Her bir frekansta yirmi beş farklı parametre kombinasyonu için frekans cevapları hesaplandıktan sonra, genel bir cevap elde etmek amacıyla bu değerlerin geometrik ortalaması alınmıştır. Geometrik ortalama, özellikle oransal ve logaritmik ölçümlerde tercih edilen bir yöntem olup farklı ölçümlerin daha dengeli bir şekilde temsil edilmesini sağlamaktadır. Bu adım, sürücü baş hizasında deneyimlenen ses seviyelerinin hoparlör çıkışı ile ilişkilendirilmesine yönelik ampirik modelin temelini

oluşturmuştur. Elde edilen araç içi akustik ortam frekans cevabı eğrisi, Şekil 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Araç içi akustik ortamın frekans cevabı eğrisi.

Elde edilen frekans cevabı, hoparlör çıkışı ile sürücü baş hizasındaki ses seviyesi arasındaki akustik geçişi modellemek için kullanılmıştır. Frekans bölgesinde çalışıldığından, zaman bölgesindeki konvolüsyon işlemi yerine çarpma işlemi uygulanmış ve frekans cevabı hoparlör çıkışı ile kaskat bağlanarak sürücü baş hizasındaki ses seviyesi hesaplanmıştır. Bu süreç, Şekil 3.12'de grafiksel olarak sunulmaktadır.



Şekil 3.12. Sürücü baş hizasındaki işaretin uygunlaştırılması amacıyla, parametrik ekolayzır filtre parametre optimizasyonunu içeren benzetim modelinin blok diyagramı.

Şekil 3.12, Şekil 3.10'da sunulan hoparlör çıkış modeli üzerine ek olarak, araç içi akustik ortamın etkilerini ve baş hizasında algılanan sesin değerlendirilmesini içeren genişletilmiş bir yapıyı temsil etmektedir. Hoparlörden yayılan ses, araç içi akustik ortamın frekans cevabı ile çarpılarak, araç kabininde oluşan yansıma, absorpsiyon ve çeşitli bozucu etkilerle şekillenmekte, böylece hoparlör çıkışı ile sürücü baş hizasında algılanan ses arasında farklar oluşmaktadır. Bu farkların analiz edilmesi için baş hizasında konumlandırılmış bir mikrofona aracılığıyla algılanan ses işareti kaydedilmekte ve eşit ses yüksekliği konturlarına dayalı istatistiksel metriklerle karşılaştırılmaktadır. Elde edilen veriler, GA ve PSO destekli algoritmalarla iletilerek hoparlör çıkışının optimizasyonunun sağlanması için ekolayzır filtrelerinin parametreleri optimize edilmekte ve böylece algılanan sesin ISO 226 standardına daha uygun hâle getirilmesi hedeflenmektedir. Bu model, hoparlör çıkışı ile gerçek dinleyici konumundaki ses algısı arasındaki farkı minimize etmek amacıyla optimizasyon sürecini genişletmekte ve araç içi akustik ortamın etkilerini doğrudan hesaba katmaktadır.

3.5.2. Araç İçi Akustik Optimizasyonun Benzetim Performans Ölçütleri

Bu çalışmada, sürücü baş hizasında yapılan benzetim sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması ve elde edilen sonuçların eşit ses yüksekliği konturuna benzerliklerinin belirlenmesi amacıyla istatistiksel analizler uygulanmıştır. Hoparlör çıkışına kıyasla, araç içi akustik ortam çok yönlü etkiler nedeniyle daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, performans değerlendirmesinde daha kapsamlı bir analiz sağlamak amacıyla Pearson korelasyon analizi ve RMSE'ye ek olarak karşılıklı bilgi ve spektral uyumluluk analizleri kullanılmıştır.

Karşılıklı bilgi, iki rastgele değişken arasındaki bağımlılık derecesini ölçen bir metriktir. Denklem (3.10), iki değişken arasında paylaşılan bilgiyi göstermektedir. Bağımsız olduklarında spektral uyumluluk değeri sıfır olurken, bağımlılık arttıkça bu değer de yükselir. Korelasyondan farklı olarak, karşılıklı bilgi analizi doğrusal olmayan ilişkileri de yakalayabilme yeteneğine sahiptir.

$$MI(X; Y) = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x, y) \log \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} \quad (3.10)$$

Burada, $MI(X; Y)$, karşılıklı bilgi olarak adlandırılmakta olup $p(x, y)$, X ve Y 'nin ortak olasılık dağılımını, $p(x)$, X 'in marjinal olasılık dağılımını ve $p(y)$ ise Y 'nin marjinal olasılık dağılımını ifade etmektedir.

Spektral uyumluluk, iki işaret arasındaki frekans bileşenlerinin uyumunu ölçerek, frekans alanındaki korelasyonlarını belirleyen bir metriktir. Bu yöntem, işaretlerin aynı frekanstaki bileşenlerinin faz ve genlik açısından ne kadar uyumlu olduğunu değerlendirmek için kullanılır. Denklem (3.11)'de verilen spektral uyumluluk değeri 0 ile 1 arasında değişmekte olup, 1 değeri işaretlerin tamamen uyumlu olduğunu (faz ve genlik senkronizasyonunun sağlandığını), 0 değeri ise uyumsuz olduklarını göstermektedir.

$$C_{xy}(f) = \frac{[S_{xy}(f)]^2}{S_{xx}(f) \cdot S_{yy}(f)} \quad (3.11)$$

$C_{xy}(f)$, spektral uyumluluk olarak adlandırılmakta olup $S_{xy}(f)$: X ve Y işaretleri arasındaki çapraz spektral yoğunluğu; $S_{xx}(f)$ ve $S_{yy}(f)$ ise X ve Y işaretlerinin kendi spektral yoğunluklarını ifade etmektedir (Bendat ve Piersol 2010).

Bu istatistiksel analizler, eşit ses yüksekliği konturu ile deneysel ve benzetim sonuçları arasındaki uyumu değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Karşılıklı bilgi analizi, sonuçlar arasındaki doğrusal olmayan bağımlılıkları değerlendirerek bilgi paylaşımını ölçmüştür. Spektral uyumluluk analizi ise, işaretlerin aynı frekanstaki bileşenlerinin faz ve genlik açısından ne kadar uyumlu olduğunu belirleyerek, frekans alanındaki senkronizasyon seviyesini ortaya koymuştur.

3.5.3. Optimizasyon Algoritmaları ve Yapılandırma Ayarları

Hoparlör çıkışının eşit ses yüksekliği konturuna uyumunu artırmak için gerçekleştirilen filtre parametre optimizasyonunda, sistem performansını iyileştirmek amacıyla GA kullanılmıştır. Ancak, sürücü baş hizasında yapılan analizler, araç içi akustik ortamın karmaşık yapısı ve doğrusal olmayan etkilerinin, optimizasyon sürecinde daha detaylı ve etkin yöntemlerin kullanılmasını gerekli kıldığını göstermiştir. Bu bağlamda, GA'ya ek olarak PSO yöntemi de uygulanmıştır. PSO'nun tercih edilme nedeni, karmaşık ve çok boyutlu arama uzaylarında çözüm yakınsamasını hızlandırma ve küresel optimuma ulaşma kabiliyeti olarak belirlenmiştir. Özellikle araç içi akustik performans analizlerinde, PSO'nun yüksek uyarlanabilirliği ve doğrusal olmayan sistemlerdeki etkinliği göz önünde bulundurulmuştur.

Her iki algoritma da doğaları gereği aynı uygunluk fonksiyonu mantığı ile çalışmaktadır. Bu nedenle, çalışmada GA ve PSO için ortak bir uygunluk fonksiyonu oluşturulmuştur. Kullanılan uygunluk fonksiyonu, sürücü baş hizasında elde edilen çıktı ile eşit ses yüksekliği konturu arasındaki benzerliği değerlendirmektedir. Bu

fonksiyonda, korelasyon, karşılıklı bilgi, spektral uyumluluk ve RMSE değerleri kullanılarak çözümlerin kalitesi belirlenmiştir.

GA'da olduğu gibi, PSO algoritması da doğası gereği uygunluk fonksiyonunu minimize etmeye çalışmaktadır. Bu nedenle, korelasyon değeri pozitif olduğunda uygunluk fonksiyonu sonucu korelasyonun tersi olarak hesaplanmış ($1/\text{korelasyon}$) ve korelasyon negatifse bir ceza değeri eklenmiştir. Bu yöntem, her iki algoritmanın da korelasyon değerlerini artırmasını hedefleyerek, korelasyonun daha pozitif hâle geldikçe uygunluk değerinin azalmasına yardımcı olmaktadır.

Bu çalışmada, karşılıklı bilgi ve spektral uyumluluk analizleri uygunluk fonksiyonuna dahil edilmiştir. Karşılıklı bilgi, sürücü baş hizasındaki çıktı ile eşit ses yüksekliği konturu arasındaki bilgi ortaklığını ölçmektedir; yani iki işaretin ne ölçüde benzer bilgi içerdiğini belirlemektedir. Bu analiz, sürücü baş hizası çıkışının eşit ses yüksekliği konturu ile içerik açısından ne kadar uyumlu olduğunu değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

Spektral uyumluluk analizi ise işaretlerin frekans bileşenleri arasındaki senkronizasyon seviyesini ölçmektedir. Bu analiz sonucunda elde edilen değerlerin ortalaması alınarak, genel değerlendirme sürecine dahil edilmiştir. Hem karşılıklı bilgi hem de spektral uyumluluk analizlerinde yüksek değerler ideal kabul edildiğinden, uygunluk fonksiyonuna karşılıklı bilgi ve spektral uyumluluk değerlerinin tersleri ($1/\text{karşılıklı bilgi}$ ve $1/\text{spektral uyumluluk}$) eklenmiştir. Böylece, bu metriklerin yüksek değerleri ideal sonuçlara daha fazla yaklaşımı yansıttığından, uygunluk fonksiyonunun minimize edilmesi sağlanmıştır.

Buna ek olarak, RMSE değeri de uygunluk fonksiyonuna dahil edilmiştir. RMSE, sürücü baş hizası çıkışı ile eşit ses yüksekliği konturu arasındaki doğrusal hatayı ölçerek, iki işaretin genlik seviyelerinin benzerliğini değerlendirmektedir. Daha düşük RMSE değeri, işaretlerin daha yüksek uyum içinde olduğunu göstermektedir. Bu üç metriğin bir araya getirilmesiyle, sürücü baş hizası çıkışının eşit ses yüksekliği

konturuna daha iyi uyum sağlaması hedeflenmiş ve böylece araç içi ses sistemlerinin performansının artırılması amaçlanmıştır.

GA için, Bölüm 3.4.3'te detayları aktarılan yöntem ve yapılandırma ayarları kullanılmıştır. PSO için ise, MATLAB'ın Global Optimizasyon Araç Kutusu'ndaki `optimoptions` ve `particleswarm` fonksiyonları uygulanmıştır. PSO, 100 parçacıktan oluşan bir sürü büyüklüğü ile yapılandırılmıştır. Bu yapılandırma, her iterasyonda 100 farklı çözümün değerlendirilmesine olanak tanıyarak, çözüm uzayının daha kapsamlı bir şekilde keşfedilmesini sağlamıştır. Algoritmanın maksimum 50 iterasyon boyunca çalışmasına izin verilmiş olup, bu sayede optimal çözüme ulaşmak için yeterli süre tanınırken, hesaplama süresi de kontrol altında tutulmuştur.

PSO'nun başarısı, belirli parametrelerin dikkatli bir şekilde seçilmesine bağlıdır. PSO'da, GA'daki çaprazlama ve mutasyon oranları yerine, parçacıkların hızlarını ve yönlerini ayarlayan atalet ağırlığı ile bilişsel ve sosyal katsayılar kullanılmaktadır. MATLAB'ın `particleswarm` fonksiyonunda, atalet ağırlığı uyarlanabilir bir yöntemle otomatik olarak ayarlanmaktadır. Bu yöntem, parçacıkların mevcut hızlarını dikkate alarak, keşif (çözüm alanının daha geniş bir şekilde araştırılması) ve yakınsama (optimal çözüme odaklanma) arasında bir denge kurulmasını sağlar.

Bilişsel katsayı (c_1) ve sosyal katsayı (c_2) varsayılan olarak 1,49 değerindedir. Bilişsel katsayı, parçacıkların kendi en iyi konumlarına olan güvenini belirlerken, sosyal katsayı ise sürünün en iyi konumuna olan güvenini belirlemektedir. Bu katsayıların dikkatli bir şekilde seçilmesi, çözüm kalitesini artırarak, PSO'nun daha başarılı sonuçlar üretmesine yardımcı olmaktadır. Ek olarak, parçacık hızlarının kontrolsüz bir şekilde artmasını önlemek amacıyla, 0,729 olarak belirlenen bir kısıtlama faktörü kullanılmıştır.

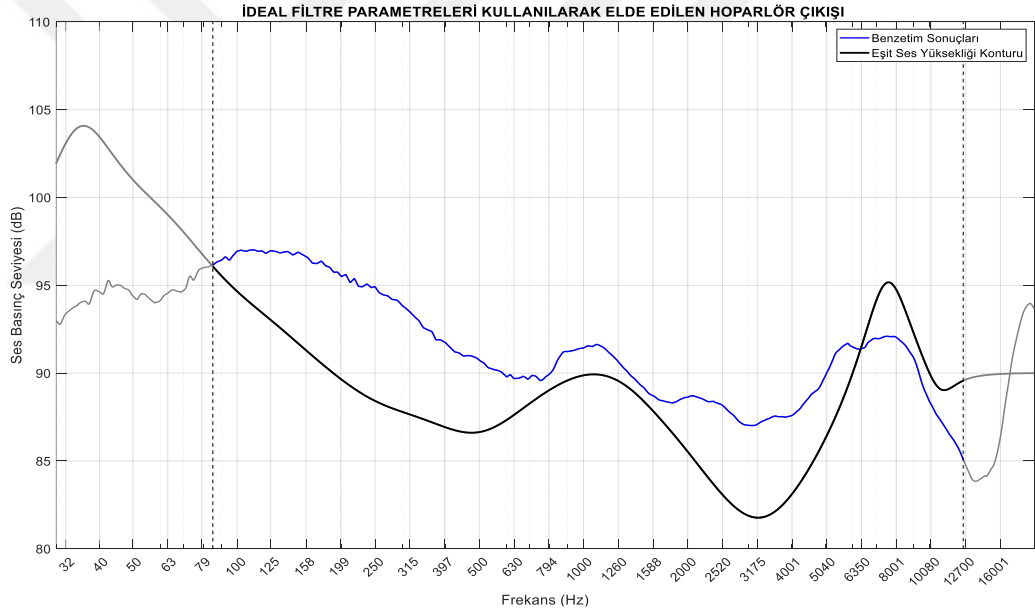
Çözüm vektörünün temsili için, Bölüm 3.4.3'te GA için oluşturulan genotip kullanılmış ve Çizelge 3.3'te verilen değerler algoritmada uygulanmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Genetik Algoritma Kullanarak Hoparlör Çıkışı Ölçümleri ve Analiz

4.1.1. Hoparlör Çıkışı Ölçümleri ve Analizleri

İlk olarak, Çizelge 3.2’de verilen ve eşit ses yüksekliği konturu için standartlarca tanımlanmış parametrik ekolayzır filtre parametreleri, hoparlör çıkışının hesaplanması amacıyla oluşturulan modelleme yazılımına uygulanmıştır. Elde edilen hoparlör çıkış eğrisi, Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Bu grafikte, mavi renk benzetim sonuçlarını, siyah renk ise eşit ses yüksekliği konturunu temsil etmekte olup, hoparlörün etkin çalışma bölgesi olan 85 Hz - 12500 Hz frekans aralığı vurgulanmıştır.

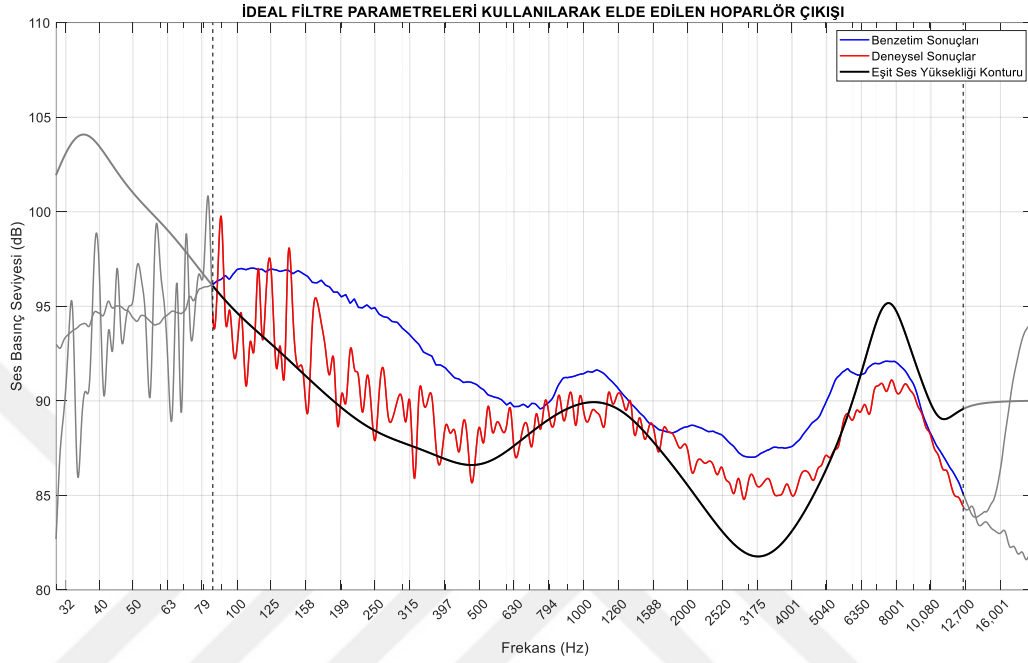


Şekil 4.1. İdeal filtre parametreleri ile elde edilen hoparlör çıkışı benzetim sonuçlarının eşit ses yüksekliği konturu ile karşılaştırılması.

Bunun ardından, Şekil 3.1'de gösterilen deneysel düzenek kurularak test ortamı oluşturulmuştur. Aynı zamanda bu düzenek aracılığıyla, modelleme ve benzetim sonuçlarının gerçek dünya uygulaması ile uyum derecesinin değerlendirilmesi ve benzetim modelinin performansının ölçülmesi amaçlanmıştır.

Test düzeneğinde, aynı filtre parametreleri araç içi eğlence ses sistemine yüklenerek hoparlör çıkışı ölçülmüştür. Benzetim ve deneysel sonuçlar Şekil 4.2'de birlikte

sunulmuş ve eşit ses yüksekliği konturu ile karşılaştırılmıştır. Burada, mavi çizgi benzetim sonuçlarını, kırmızı çizgi deneysel sonuçları ve siyah çizgi eşit ses yüksekliği konturunu temsil etmektedir.



Şekil 4.2. İdeal filtre parametreleri ile elde edilen hoparlör çıkışı için benzetim, deneysel ve eşit ses yüksekliği konturunun karşılaştırılması.

Öncelikle, benzetim modelinin performansını değerlendirmek amacıyla hoparlörün etkin frekans aralığı için deneysel ve benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda Pearson korelasyon analizi ve RMSE hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve benzetim sonuçları arasındaki korelasyon katsayısı 0,9295 olarak bulunmuştur. Bu yüksek korelasyon değeri, benzetim modelinin başarısını ortaya koymakta ve sonuçlar arasındaki güçlü benzerliği göstermektedir. Ancak, kabloların, araç içi eğlence sisteminin ve ses analizörünün bilinmeyen frekans tepkileri modellere dahil edilmemiş olup, bu durum benzerlik oranı üzerinde etkili olmuştur. RMSE değeri ise 2,29 olarak hesaplanmıştır. Deney düzeneğindeki elemanlar ve kabloların neden olduğu zayıflamalar, genlik değerlerinde farklılıklara yol açarak RMSE'yi etkilemiştir. Daha sonra, benzetim ve deneysel sonuçlar eşit ses yüksekliği konturu ile karşılaştırılmıştır. Benzetim ve deneysel sonuçların eşit ses yüksekliği konturu ile olan korelasyon katsayıları sırasıyla 0,6341 ve 0,6715 olarak bulunmuştur. RMSE değerleri

ise sırasıyla 4,88 ve 2,57 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlardan görüldüğü üzere, ideal filtre değerleri uygulanmasına rağmen, eşit ses yüksekliği konturu ile tam anlamıyla yüksek bir benzerlik elde edilememiştir. Şekil 3.9'da verilen hoparlörün frekans cevabında görüldüğü gibi, hoparlör belirli frekanslara karşı daha hassastır. Bu hassasiyet, genlik sapmalarına yol açarak genel sistem performansını etkilemiş ve eşit ses yüksekliği konturuna olan benzerliği azaltmıştır.

4.1.2. Hoparlör Çıkışı İçin Gerçekleştirilen Filtre Optimizasyonu Sonrası Benzetim ve Deney Bulguları

Parametrik ekolayzır filtre parametreleri, GA tabanlı bir optimizasyon yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçların sağlamlığını ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla GA on üç kez çalıştırılmıştır. Her çalıştırmada, en iyi, en kötü ve ortalama uygunluk değerleri analiz edilerek optimizasyon kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

GA temelli optimizasyon çalıştırmalarına ait uygunluk değerleri sonuçları Çizelge 4.1'de özetlenmiştir. Bu tablo, her çalıştırma için elde edilen en iyi, en kötü ve ortalama uygunluk değerlerini göstermektedir. Elde edilen değerler, GA'nın filtre parametrelerini optimize etme konusundaki tutarlılığını ve etkinliğini göstermektedir.

Çizelge 4.1. GA ile hoparlör çıkışı için gerçekleştirilen filtre parametreleri optimizasyonu sonucu elde edilen uygunluk değerleri

Çalıştırma No	En İyi Uygunluk Değeri	En Kötü Uygunluk Değeri	Ortalama Uygunluk Değeri
1	3,7278	6,4818	5,2462
2	3,9119	6,9003	5,2295
3	3,7849	6,8531	5,3337
4	3,1401	5,3548	4,2640
5	3,3135	5,6533	4,4497
6	2,9103	5,2361	4,1722
7	3,6962	5,9486	4,7816
8	2,7229	3,9947	3,3807
9	2,2826	3,8436	3,0773
10	2,9983	4,1829	3,6482
11	2,7693	4,0229	3,3233
12	2,6523	3,8888	3,2189
13	2,6621	3,9380	3,3037

Elde edilen sonuçlar, GA'nın filtre parametrelerini etkili bir şekilde optimize ettiğini göstermektedir. On üç çalıştırma boyunca elde edilen en iyi, en kötü ve ortalama uygunluk değerleri incelendiğinde, algoritmanın çözüm uzayında başarılı bir şekilde arama yapabildiği görülmüştür. En iyi uygunluk değeri olan 2,2826; 9. çalıştırmada elde edilmiş olup, algoritmanın yüksek düzeyde optimize edilmiş çözümler bulma kapasitesine işaret etmektedir. Buna karşılık, en kötü uygunluk değeri olan 6,9; 2. çalıştırmada gözlemlenmiş ve optimizasyon sürecinde belirli bir değişkenlik olduğunu ortaya koymuştur. Genel olarak, bu sonuçlar, algoritmanın tutarlı bir şekilde iyi çözümler üretebildiğini göstermektedir.

Ayrıca, GA'nın performansının güvenilirliğini ve tutarlılığını değerlendirmek amacıyla, uygunluk değerlerinin ortalaması, standart sapması ve varyansı hesaplanarak istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin sonuçları Çizelge 4.2'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.2. GA ile hoparlör çıkışı uygunluk değerlerinin istatistiksel analizi

Metrik	En İyi Uygunluk Değerleri	En Kötü Uygunluk Değerleri	Ortalama Uygunluk Değerleri
Ortalama	3,1209	5,0999	4,1099
Standart Sapma	0,5226	1,1885	0,8421
Varyans	0,2731	1,4126	0,7092

Çizelge 4.2'de sunulan istatistiksel analiz, GA'nın sağlamlığını ve güvenilirliğini ortaya koymaktadır. En iyi, en kötü ve ortalama uygunluk metriklerinde düşük standart sapma ve varyans değerleri, algoritmanın tutarlı ve etkili sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Özellikle düşük en iyi uygunluk değerleri, GA'nın filtre parametrelerini başarıyla optimize ettiğini ve hoparlör çıkışının eşit ses yüksekliği konturu ile yüksek uyum sağladığını göstermektedir. En kötü uygunluk değerlerindeki yüksek varyans, algoritmanın zaman zaman daha az optimal sonuçlar ürettiğini ortaya koysa da genel tutarlılık yüksek kalmaktadır.

Elde edilen parametreler, hoparlör çıkışını hesaplamak amacıyla oluşturulan modelleme yazılımına uygulanmış ve benzetim sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca, optimize edilen filtre parametreleri araç içi eğlence ses sistemine yüklenerek hoparlör çıkışı ölçülmüştür. Tüm ölçümlerde, en iyi uygunluk değerlerini sağlayan filtre parametreleri kullanılmıştır. Modelleme ve algoritmanın performansını değerlendirmek için, hoparlörün etkin çalışma frekans aralığında, benzetim ile eşit ses yüksekliği konturu, deneysel sonuçlar ile eşit ses yüksekliği konturu ve benzetim ile deneysel sonuçlar arasındaki korelasyon katsayısı ve RMSE değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular Çizelge 4.3'te sunulmaktadır.

Çizelge 4.3. GA ile optimize edilen filtre parametreleri sonrası hoparlör çıkışı için istatistiksel analiz sonuçları

Çalıştırma No	Benzetim ve İdeal Kontur		Deneysel ve İdeal Kontur		Benzetim ve Deneysel	
	Corr	RMSE	Corr	RMSE	Corr	RMSE
1	0,9315	3,17	0,9187	2,61	0,9846	1,07
2	0,9076	3,18	0,9302	5,09	0,9636	2,42
3	0,9106	2,49	0,8940	3,51	0,9797	1,42
4	0,9432	2,39	0,9578	1,87	0,9767	1,11
5	0,9199	2,68	0,9277	1,97	0,9816	1,27
6	0,9410	2,35	0,9208	1,58	0,9818	1,76
7	0,9132	2,00	0,8906	2,57	0,9834	2,23
8	0,9448	1,49	0,9279	3,40	0,9826	2,31
9	0,9692	1,17	0,9675	1,34	0,9864	1,00
10	0,9420	1,73	0,9438	4,96	0,9619	3,82
11	0,9538	1,63	0,9442	4,48	0,9798	4,48
12	0,9609	1,54	0,9457	3,44	0,9825	4,30
13	0,9601	1,55	0,9447	3,54	0,9826	4,39

Çizelge 4.3'te sunulan Pearson korelasyon ve RMSE değerleri, modelin ve algoritmanın performansını ortaya koymaktadır. Çizelge 4.2'deki bulgularla tutarlı olarak, en iyi genel performans 9. çalıştırmada elde edilmiştir. Uygunluk, korelasyon ve RMSE değerleri açısından en başarılı sonuçlar bu çalıştırmada gözlemlenmiş olup, optimize edilen filtre parametreleri eşit ses yüksekliği konturuna en yüksek benzerliği sağlamış ve benzetim ile deneysel sonuçlar arasında en iyi uyumu göstermiştir. Benzetim ve deneysel sonuçlar arasındaki farklar ise, kabloların, araç içi eğlence sisteminin ve ses analizörünün bilinmeyen frekans tepkileri gibi modele dahil edilmeyen faktörlerden

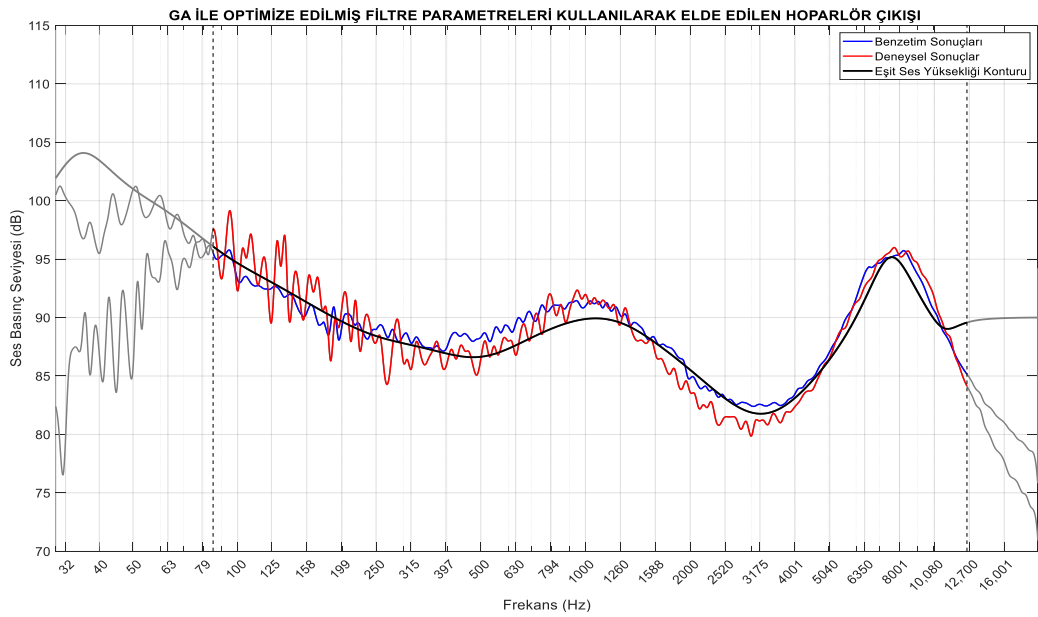
kaynaklanmaktadır. Bu unsurlar, benzetim ve deneysel veriler arasındaki benzerliği belirli bir ölçüde etkilemiştir.

9. çalıştırmada elde edilen optimal filtre parametreleri Çizelge 4.4'te detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.4. 9. çalıştırmada hoparlör çıkışı optimizasyon sonucu ile elde edilen parametrik ekolayzır filtre parametreleri

Merkez Frekans Değerleri (Hz)	Kazanç Değerleri (dB)	Q Faktör Değerleri
58	11,8	0,9
63	11,9	0,7
157	-0,5	1,0
338	-3,2	0,8
589	0,7	0,8
894	6,2	1,1
1163	7,1	0,9
3326	-11,7	0,9
6768	12,1	1,5
7792	11,3	1,6

Benzetim ve deneysel sonuçlar, eşit ses yüksekliği konturu ile birlikte Şekil 4.3'te sunulmuş ve karşılaştırılmıştır. Bu grafikte, mavi çizgi benzetim sonuçlarını, kırmızı çizgi deneysel sonuçları ve siyah çizgi eşit ses yüksekliği konturunu temsil etmektedir.



Şekil 4.3. Optimize edilmiş filtre parametreleri ile elde edilen hoparlör çıkışı için benzetim, deneysel ve eşit ses yüksekliği konturunun karşılaştırılması.

Önceki analizlerde kullanılan Pearson korelasyon analizi ve RMSE hesaplamaları, optimizasyon sonrasında benzetim modeli ve deneysel düzenek için de uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, deneysel ve benzetim verileri arasındaki korelasyon katsayısı 0,9864 olarak hesaplanmış, RMSE değeri ise 1,00 bulunmuştur. Bu analiz, benzetim ve deneysel sonuçların yüksek derecede paralellik gösterdiğini ortaya koymuş, böylece modelin deneysel verilerle tutarlı ve güvenilir olduğunu kanıtlamıştır.

Daha sonra, benzetim ve deneysel veriler eşit ses yüksekliği konturu ile karşılaştırılmıştır. Eşit ses yüksekliği konturu ile benzetim sonuçları arasındaki korelasyon katsayısı 0,9692 olarak hesaplanmış ve RMSE değeri 1,17 bulunmuştur. Eşit ses yüksekliği konturu ile deneysel veriler arasındaki korelasyon katsayısı ise 0,9675 olarak hesaplanmış ve RMSE değeri 1,34 olarak belirlenmiştir. Bulgular, optimizasyon sonucunda belirlenen filtre parametrelerinin uygulanmasıyla eşit ses yüksekliği konturu ile yüksek düzeyde benzerlik elde edildiğini ortaya koymaktadır.

Korelasyon katsayılarının 1'e yakın olması, optimizasyon sonrası hem benzetim hem de deneysel sonuçların eşit ses yüksekliği konturu ile güçlü bir doğrusal ilişkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, modelin doğruluğunun ve güvenilirliğinin arttığını ortaya koymaktadır. RMSE değerlerindeki azalma, optimizasyon sonucunda elde edilen filtre parametrelerinin eşit ses yüksekliği konturuna daha yakın sonuçlar verdiğini ve genlik sapmalarının en aza indirildiğini kanıtlamaktadır. Düşük RMSE değerleri, sistem performansında önemli bir iyileşme sağlandığını ve modelin hata payının azaldığını göstermektedir.

Hoparlör çıkışının iyileştirilmesi sürecinde, Şekil 4.2, ideal filtre parametreleri ile elde edilen hoparlör çıkışını temsil ederken, Şekil 4.3, GA optimizasyonu sonucunda elde edilen optimum hoparlör çıkışını yansıtmaktadır. GA, frekans tepkisini eşit ses yüksekliği konturuna yaklaştırarak belirgin bir iyileşme sağlamıştır. Bu iyileşmenin detayları aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

- 50-100 Hz frekans aralığında eşit ses yüksekliği konturu ile benzerliğin artırılması amacıyla, GA ile merkez frekans ve kazanç değerleri optimize edilmiş ve Şekil 4.3'te de görüldüğü üzere iyileştirilmiştir. 55 Hz ve 71 Hz

merkez frekanslarında kazanç değerleri sırasıyla 10,4 dB ve 11,2 dB iken, GA optimizasyonu sonrasında bu değerler 58 Hz ve 63 Hz frekanslarında 11,8 dB ve 11,9 dB'ye yükseltilmiştir. Ayrıca, Q faktör değerinin 63 Hz'de 0,7'den 0,6'ya düşürülmesi, bu frekans aralığında daha geniş bir bant üzerinde etkili olmasını sağlamıştır.

- 200-500 Hz frekans aralığında, Şekil 4.2'de görüldüğü üzere ilgili frekans aralığında hoparlör çıkış seviyesinin eşit ses yüksekliği konturuna kıyasla yüksek olduğu tespit edilmiştir. 250 Hz'de kazanç değeri -2,4 dB iken, bu değer 338 Hz'de -3,2 dB'ye düşürülerek ayarlanmıştır. Ayrıca, Q faktör değeri 0,7'den 0,8'e yükseltilerek bu frekans aralığında daha dar bir bant üzerinde etkili olması sağlanmıştır.
- 1000-2000 Hz frekans aralığında kazanç artırılmıştır. Bu artışın nedeni, 200-500 Hz ve 3000-4000 Hz frekanslarında uygulanan kazanç azaltımının, 1000-2000 Hz aralığını da etkilemesidir. Şekil 4.3'te gösterildiği üzere, çıkış seviyesi bu doğrultuda dengelenmiştir. 1280 Hz frekansında kazanç değeri 2,0 dB'den, 7,1 dB yükseltilerek çıkış seviyesi optimize edilmiştir.
- 3000-4000 Hz frekans aralığında, Şekil 4.2'de görüldüğü üzere hoparlör çıkış seviyesinin eşit ses yüksekliği konturuna kıyasla yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, kazanç değerlerinin düşürülmesiyle çözülmüş ve Şekil 4.3'te gösterildiği gibi eşit ses yüksekliği konturuna uygun hâle getirilmiştir. Burada, 3220 Hz frekansında kazanç değeri -10,0 dB iken, -11,7 dB'ye düşürülmüştür. Ayrıca, Q faktör değeri 1,0'den 0,9'a düşürülerek bu frekans aralığında daha geniş bir bant üzerinde etkili olması sağlanmıştır.
- 5000 Hz ve üzeri frekanslarda, Şekil 4.2'de görüldüğü üzere hoparlör çıkış seviyesinin eşit ses yüksekliği konturuna kıyasla düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle ilgili frekans aralığında kazanç artırılarak Şekil 4.3'te gösterildiği gibi çıkış seviyesi dengelenmiştir. 6400 Hz ve 8100 Hz merkez frekanslarında kazanç değerleri sırasıyla 10,5 dB ve 9,5 dB iken, GA optimizasyonu sonrasında bu değerler 6768 Hz ve 7792 Hz'de 12,1 dB ve 11,3 dB'ye yükseltilmiştir. Ayrıca, Q faktör değerleri düşürülerek bu frekans aralığında daha geniş bir bant üzerinde etkili olması sağlanmıştır.

Bu sonuçlar, araç içi ses sisteminin performansında önemli bir iyileşme sağlandığını göstermektedir. Hoparlör çıkışının optimizasyon yoluyla eşit ses yüksekliği konturuna daha yakın hâle getirilmesi, sürücüler ve yolcular için daha yüksek kaliteli ve konforlu bir ses deneyimi sunma potansiyeli taşımaktadır. Bu durum, GA tabanlı optimizasyonun, araç içi ses sistemlerinin frekans tepkisini optimize etmek ve gerçek dünya uygulamalarında sistem performansını artırmak için etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır (Başay ve ark. 2024).

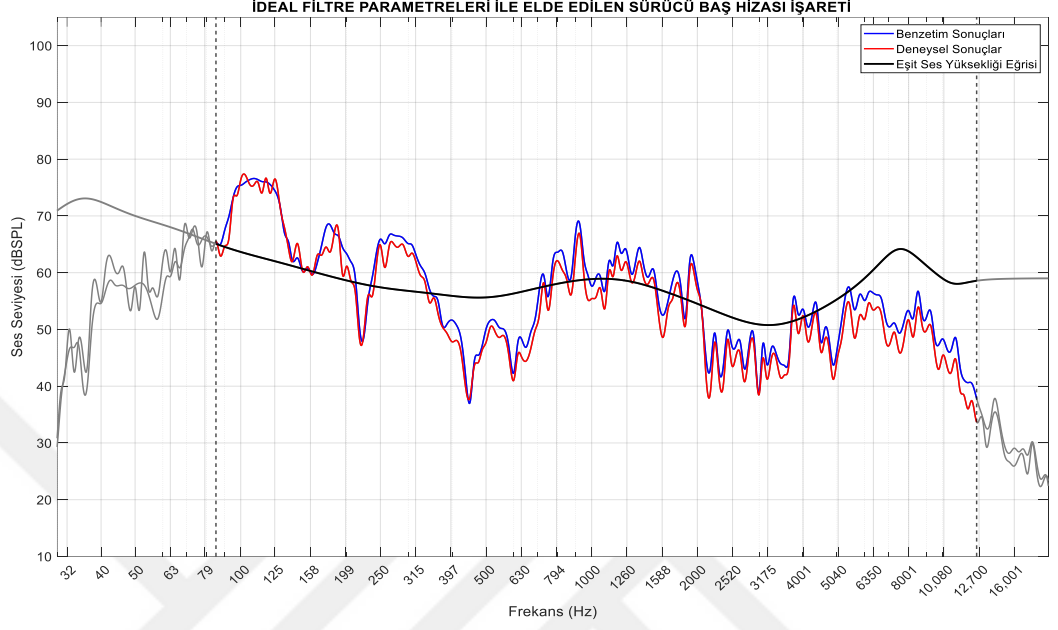
4.2. Sürücü Baş Hızası Benzetim ve Ölçümleri

4.2.1. Sürücü Baş Hızası Ölçümleri ve Analizleri

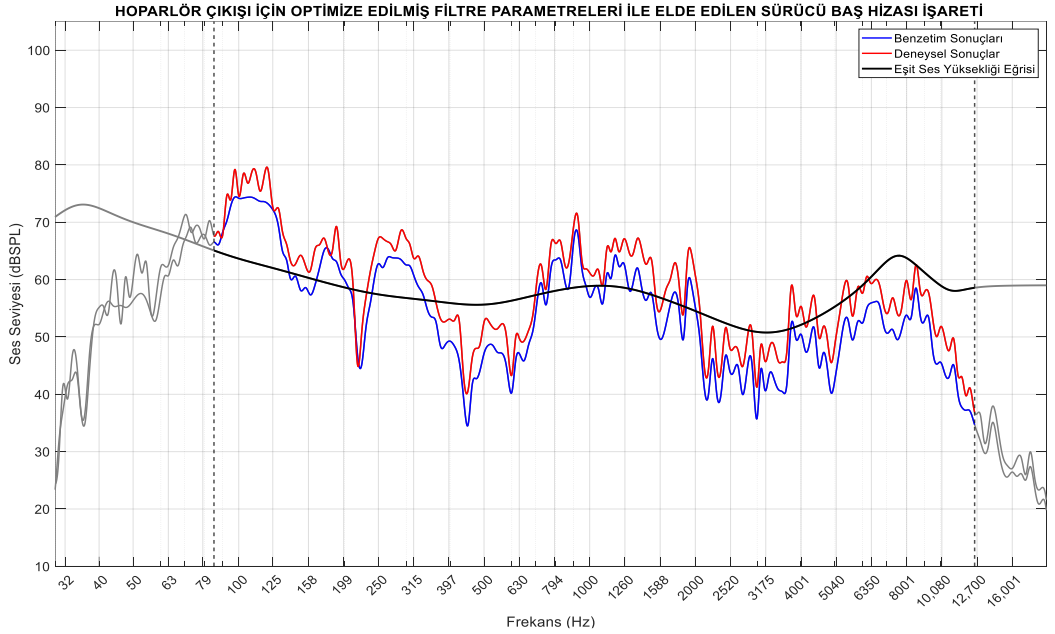
Hoparlör çıkışının eşit ses yüksekliği konturuna uyumunun artırılması amacıyla gerçekleştirilen filtre optimizasyonunun ardından, sürücü baş hızasından ölçümler alınmış ve tutarlılığın sağlanması amacıyla deneyler dört kez tekrarlanarak ortalama değerler hesaplanmıştır. Öncelikle, hoparlör çıkışı için gerçekleştirilen filtre optimizasyonunun sürücü baş hızasındaki akustik performansa etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, modele Bölüm 3.5.1’de açıklanan araç içi akustik ortamın frekans cevabı dahil edilmiştir. Ayrıca, hoparlör çıkış seviyesi 1000 *Hz* frekansında 90 *dB* olarak ayarlanmış ve bu değer referans seviye olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda, hoparlörden yayılan ses işaretinin sürücü baş hızasındaki ölçüm sonuçları analiz edilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda, 1000 *Hz*’de hoparlör çıkış seviyesinin 90 *dB* olmasına karşın, sürücü baş hızasında bu değer 59 *dB* olarak kaydedildiği tespit edilmiştir. Bu durumda, -31 *dB*’lik bir kayıp meydana gelmiş olup, söz konusu kayıp değer benzetim algoritmasına dahil edilmiştir. Bu sayede algoritmanın, gerçek dünya koşullarına daha yakın ve gerçeğe uygun bir şekilde çalışması sağlanmıştır. Böylece, akustik performansın iyileştirilmesine yönelik optimizasyon çalışmaları, tespit edilen kayıpları göz önünde bulunduran benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir.

Önceki bölümlerde belirtilen ideal ve GA ile elde edilen filtre parametreleri kullanılarak benzetimler gerçekleştirilmiş ve sürücü baş hızasından ölçümler alınmıştır. İdeal ve

optimize edilmiş filtre parametrelerine ait benzetim ve ölçüm sonuçları, Şekil 4.4 ve 4.5'te eşit ses yüksekliği konturu ile karşılaştırılarak sunulmuştur.



Şekil 4.4. İdeal filtre parametreleri ile elde edilen sürücü baş hizası akustik performans için benzetim, deneysel ve eşit ses yüksekliği konturunun karşılaştırılması.



Şekil 4.5. Hoparlör çıkışı için optimize edilmiş filtre parametreleri ile elde edilen sürücü baş hizası akustik performans için benzetim, deneysel ve eşit ses yüksekliği konturunun karşılaştırılması.

Önceki performans ölçümlerinde kullanılan Pearson korelasyon analizi ve RMSE hesaplamaları, sürücü baş hizası ölçümlerinden elde edilen veriler doğrultusunda benzetim modeli ve deneysel düzenek için de uygulanmıştır. İdeal filtre parametreleri kullanılarak yapılan analizlerde, deneysel ve benzetim sonuçları arasındaki korelasyon katsayısı 0,9955, RMSE değeri ise 2,80 olarak hesaplanmıştır. Optimize edilmiş filtre parametreleri kullanıldığında ise deneysel ve benzetim sonuçları arasındaki korelasyon katsayısı 0,9965 olup, RMSE değeri 5,50 olarak bulunmuştur. Elde edilen yüksek korelasyon değerleri, modele dahil edilen araç içi akustik ortamın frekans cevabının başarılı bir performans sergilediğini ve araç içi akustik etkilerin belirli bir doğrulukla modellenebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, RMSE değerlerindeki farklılıklar, deneysel koşullardaki değişkenlikler, mikrofon karakteristiği ve anlık çevresel faktörlerin genlik üzerindeki etkileri gibi unsurlardan kaynaklanmaktadır.

Ardından, benzetim ve deneysel sonuçlar eşit ses yüksekliği konturu ile karşılaştırılmıştır. İdeal filtre parametreleri için eşit ses yüksekliği konturu ile benzetim sonuçları arasındaki korelasyon katsayısı 0,4183; RMSE değeri ise 7,02 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, eşit ses yüksekliği konturu ile deneysel sonuçlar arasındaki korelasyon katsayısı 0,4123 olup, RMSE değeri 8,36 olarak bulunmuştur. Optimize edilmiş filtre parametreleri için eşit ses yüksekliği konturu ile benzetim sonuçları arasındaki korelasyon katsayısı 0,5552; RMSE değeri ise 8,68 olarak hesaplanmıştır. İdeal kontur ile deneysel sonuçlar arasındaki korelasyon katsayısı ise 0,5510 olup, RMSE değeri 5,25 olarak belirlenmiştir.

Bu sonuçlar, optimizasyon sonrasında elde edilen filtre parametrelerinin, ideal filtre parametrelerine kıyasla sürücü baş hizasında ölçülen ses seviyesini eşit ses yüksekliği konturuna daha fazla yaklaştırdığını göstermektedir. Bu durum, hoparlör optimizasyonunun araç içi akustik performans üzerinde önemli bir iyileştirme sağladığını kanıtlamaktadır.

4.2.2. Genetik Algoritma ile Sürücü Baş Hızası Çıkışı İçin Gerçekleştirilen Filtre Optimizasyonu Benzetim ve Deney Bulguları

Hoparlör çıkışının eşit ses yüksekliği konturuna uyumunu artıran filtre optimizasyonu, sürücü baş hızasında ideal filtre parametrelerine kıyasla daha yüksek bir performans sağlasa da elde edilen sonuçlar eşit ses yüksekliği konturu ile düşük düzeyde benzerlik sağlandığını göstermektedir. Bu nedenle, sürücü baş hızası için de filtre optimizasyonunun yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda, hoparlör çıkışının iyileştirilmesi sürecinde kullanılan GA yöntemi sürücü baş hızası için de uygulanmıştır. Burada da sonuçların sağlamlığını ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla GA, on üç kez çalıştırılmıştır. Her çalıştırmada, en iyi, en kötü ve ortalama uygunluk değerleri analiz edilerek optimizasyon süreci kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Optimizasyon algoritması çalıştırmalarına ait uygunluk değerleri sonuçları Çizelge 4.5'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.5. GA ile sürücü baş hızası için gerçekleştirilen filtre parametreleri optimizasyonu sonucu elde edilen uygunluk değerleri

Çalıştırma No	En İyi Uygunluk Değeri	En Kötü Uygunluk Değeri	Ortalama Uygunluk Değeri
1	28,8113	38,5137	30,0011
2	29,4216	39,3057	31,0019
3	28,7677	38,3992	29,9225
4	27,9885	37,8661	28,9911
5	29,0197	39,1310	30,0190
6	28,6623	38,2316	29,7337
7	29,3321	39,2014	30,8619
8	28,7318	38,2992	29,8672
9	28,3467	38,1142	29,5731
10	29,1219	39,1997	30,2147
11	28,5116	38,1895	29,7523
12	27,3702	37,3625	28,3743
13	27,8762	37,6987	28,9163

Sonuçlar incelendiğinde en iyi uygunluk değeri 27,3702 olarak 12. çalıştırmada, en kötü uygunluk değeri ise 39,3057 olarak 2. çalıştırmada elde edilmiştir. Bu sonuçlar, optimizasyon sürecindeki değişkenliği ve araç içi akustik etkinin optimizasyon başarımı üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

Hoparlör çıkışı ile sürücü baş hizasında elde edilen uygunluk değerlerinin farklılık göstermesinin başlıca nedeni, araç içi akustik ortamın oluşturduğu frekans cevabıdır. Şekil 3.11'de gösterildiği üzere, hoparlör çıkışından sürücü baş hizasına iletilen ses işareti, araç içi yansımalar, absorpsiyon, difraksiyon ve rezonans etkileri nedeniyle belirgin değişikliklere uğramaktadır. Bu frekans cevabı, belirli frekans bantlarında kazanç artışına veya azalışına sebep olarak hoparlör çıkışında optimize edilen frekans bileşenlerinin sürücü baş hizasında bozulmasına yol açmaktadır. Ayrıca, kullanılan parametrik ekolayzır filtrelerinin sayısal ve aralıksal sınırlamaları nedeniyle, bu bozulmalar filtrelerle tam olarak giderilememektedir. Sonuç olarak, sürücü baş hizası için gerçekleştirilen filtre optimizasyonu, hoparlör çıkışına kıyasla daha yüksek uygunluk değerleriyle sonuçlanmakta ve daha düşük benzerlik düzeylerinde kalmaktadır.

Hesaplanan uygunluk değerlerinin ortalaması, standart sapması ve varyansı hesaplanarak, GA'nın sürücü baş hizasındaki performansının tutarlılığını ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin sonuçları Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

Çizelge 4.6. GA ile sürücü baş hizasındaki uygunluk değerlerinin istatistiksel analizi

Metrik	En İyi Uygunluk Değerleri	En Kötü Uygunluk Değerleri	Ortalama Uygunluk Değerleri
Ortalama	28,6124	38,4240	29,7869
Standart Sapma	0,5940	0,7289	0,6231
Varyans	0,3528	0,5313	0,3883

Sonuçlar, sürücü baş hizası için GA ile gerçekleştirilen filtre optimizasyonunun, hoparlör çıkışı optimizasyonuna kıyasla farklı bir dağılım sergilediğini göstermektedir. En iyi, en kötü ve ortalama uygunluk değerlerinin önemli ölçüde daha yüksek olması, araç içi akustik etkinin hoparlör çıkışı ile sürücü baş hizası arasındaki frekans cevabını değiştirdiğini ve optimizasyon sürecinin bu etkiden etkilendiğini ortaya koymaktadır.

Standart sapma ve varyans değerleri açısından değerlendirildiğinde, en iyi uygunluk değerinin varyansı hoparlör çıkışı için gerçekleştirilen filtre optimizasyonuna göre optimizasyonuna göre daha yüksekken, en kötü ve ortalama uygunluk değerlerinin varyansı daha düşük seviyede kalmıştır. En iyi uygunluk değerinde gözlemlenen bu artış, algoritmanın bazı çalıştırmalarda daha düşük uygunluk değerlerine ulaşabildiğini ancak bu değerlerin değişkenlik gösterdiğini göstermektedir. Öte yandan, en kötü ve ortalama uygunluk değerlerindeki daha düşük varyans, GA'nın sürücü baş hizasında daha kararlı ancak genel olarak yüksek uygunluk değerleri ürettiğini göstermektedir.

Bu sonuçlar, optimizasyon sürecinde GA'nın tutarlı çözümler üretebildiğini, ancak sürücü baş hizasında araç içi akustik etkinin getirdiği sınırlamalar nedeniyle optimizasyon sürecinin belirli bir seviyeye kadar iyileştirme sağlayabildiğini göstermektedir.

Elde edilen parametreler, sürücü baş hizasındaki akustik performansın hesaplanması için oluşturulan modelleme yazılımına uygulanmış ve benzetim sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca, optimize edilen filtre parametreleri araç içi eğlence ses sistemine yüklenerek sürücü baş hizasından ölçümler alınmıştır. Tüm ölçümlerde, en iyi uygunluk değerlerini sağlayan filtre parametreleri kullanılmıştır. Model ve algoritmanın performansını değerlendirmek amacıyla, hoparlörün etkin çalışma frekans aralığında benzetim sonuçları ile eşit ses yüksekliği konturu, deneysel sonuçlar ile eşit ses yüksekliği konturu ve benzetim ile deneysel sonuçlar arasındaki korelasyon, RMSE, karşılıklı bilgi ve spektral uyumluluk analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular izelge 4.7'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.7. GA ile optimize edilen filtre parametreleri sonrası sürücü baş hizası için istatistiksel analiz sonuçları

Çalıştırma No	Benzetim ve İdeal Kontur				Deneyssel ve İdeal Kontur				Benzetim ve Deneyssel			
	Corr	RMSE	MI	C	Corr	RMSE	MI	C	Corr	RMSE	MI	C
1	0,6545	5,28	0,7155	0,7346	0,6273	5,23	0,6954	0,7292	0,8457	4,73	1,7218	0,7763
2	0,6412	5,51	0,7009	0,7211	0,6202	5,50	0,6801	0,7109	0,8410	4,75	1,7005	0,7712
3	0,6555	5,26	0,7166	0,7357	0,6278	5,21	0,6964	0,7306	0,8461	4,73	1,7233	0,7768
4	0,6740	4,98	0,7435	0,7543	0,6370	4,87	0,7160	0,7551	0,8534	4,70	1,7511	0,7849
5	0,6495	5,36	0,7102	0,7296	0,6247	5,32	0,6901	0,7226	0,8438	4,74	1,7143	0,7742
6	0,6580	5,23	0,7193	0,7382	0,6293	5,17	0,6991	0,7339	0,8471	4,72	1,7271	0,7779
7	0,6421	5,47	0,7023	0,7221	0,6211	5,46	0,6823	0,7128	0,8408	4,75	1,7032	0,7708
8	0,6564	5,25	0,7176	0,7365	0,6282	5,20	0,6974	0,7317	0,8465	4,73	1,7246	0,7772
9	0,6655	5,11	0,7274	0,7457	0,6328	5,03	0,7070	0,7438	0,8519	4,69	1,7684	0,7812
10	0,6471	5,39	0,7071	0,7272	0,6236	5,37	0,6875	0,7194	0,8428	4,74	1,7107	0,7731
11	0,6616	5,17	0,7232	0,7418	0,6308	5,10	0,7029	0,7386	0,8485	4,72	1,7325	0,7794
12	0,6887	4,76	0,7522	0,7691	0,6444	4,60	0,7316	0,7745	0,8592	4,68	1,7732	0,7860
13	0,6767	4,94	0,7484	0,7603	0,6384	4,82	0,7189	0,7586	0,8597	4,67	1,7741	0,7882

Çizelge 4.7'de sunulan Pearson korelasyon, RMSE, karşılıklı bilgi ve spektral uyumluluk değerleri, modelin ve algoritmanın performansını değerlendirmek açısından önemli bulgular ortaya koymaktadır. En iyi genel performans, 12. çalıştırmada elde edilmiştir. Bu çalıştırmada, benzetim sonuçları ile eşit ses yüksekliği konturu arasındaki korelasyon en yüksek seviyeye ulaşmış ve RMSE değeri en düşük seviyede hesaplanmıştır. Benzetim ile eşit eşit ses yüksekliği konturu arasındaki korelasyon katsayısı 0,6887 olarak bulunmuş, aynı zamanda en düşük RMSE değeri 4,76 olarak elde edilmiştir. Deneyssel sonuçlar ile eşit ses yüksekliği konturu karşılaştırıldığında ise en düşük RMSE değeri 4,60 olarak hesaplanırken, korelasyon katsayısı 0,6444 seviyesinde gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, optimizasyon sürecinin sürücü baş hizasında ölçülen ses performansına olumlu katkı sağladığını göstermektedir. Karşılıklı bilgi değerleri incelendiğinde, benzetim ve eşit ses yüksekliği konturu arasındaki bilgi paylaşımının 0,7522 olduğu görülmektedir. Deneyssel sonuçlar ile eşit ses yüksekliği konturu arasındaki MI değeri ise 0,7316 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, modelin bilgi içeriği açısından eşit ses yüksekliği konturuna oldukça yakın bir yapı sergilediğini ve optimizasyon sürecinin ses karakteristiğini belirli ölçüde koruyabildiğini göstermektedir. Ayrıca, benzetim ve deneyssel ölçümler arasındaki karşılıklı bilgi miktarının 1,7732 olarak hesaplanması, modelleme sürecinin fiziksel ölçümleri büyük

oranda temsil edebildiğini ortaya koymaktadır. Spektral uyumluluk analizine bakıldığında, benzetim ile eşit ses yüksekliği konturu için 0,7691; deneysel sonuçlar ile eşit ses yüksekliği konturu için 0,7745 ve benzetim ile deneysel ölçümler arasındaki uyumluluk için 0,7860 değeri elde edilmiştir. C değerlerinin birbirine yakın olması, modelin genel spektral karakteristiğinin hem deneysel hem de benzetim ortamında tutarlı kaldığını göstermektedir. Özellikle, deneysel sonuçlar ile eşit ses yüksekliği konturu arasındaki spektral uyumluluk değerinin yüksek olması, modelin optimizasyon sürecinde belirli frekans bantlarında etkili olduğunu ve genel spektral yapıyı büyük ölçüde koruyabildiğini ortaya koymaktadır.

Tüm bu ölçütler birlikte değerlendirildiğinde, benzetim ve deneysel ölçümlerin yüksek oranda uyum sağladığı, ancak eşit ses yüksekliği konturundan belirli sapmalar gösterdiği anlaşılmaktadır. Benzetim ve deneysel sonuçlar arasındaki yüksek uyumluluk, modelleme sürecinin genel doğruluğunu desteklemektedir. Ancak, eşit ses yüksekliği konturuna göre oluşan farklılıklar, araç içi akustik ortamın karmaşık yapısından, modelleme sürecinde ihmal edilen faktörlerden ve kullanılan hoparlörlerin frekans tepkisinden kaynaklanabilir. Özellikle araç içi yansımalar, absorpsiyon ve kabin rezonansları gibi akustik parametrelerin modellemede sınırlı şekilde temsil edilmesi, eşit ses yüksekliği konturu ile tam örtüşmemenin ana nedenlerinden biridir.

Bununla birlikte, sürücü baş hizasında elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlar arasında belirli farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu tutarsızlıklar, araç içi akustik ortamın modellenmesi sırasında tüm fiziksel ve çevresel değişkenlerin birebir temsil edilememesinden ve kullanılan yöntemlerin belirli sınırlamalara sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Çalışmada, hoparlör çıkışı ile sürücü baş hizası arasındaki araç içi akustik ortamın frekans cevabı elde edilmiş olsa da bu cevap belirli deneysel koşullar altında ve sınırlı filtre kombinasyonları uygulanarak hesaplanmıştır.

Özellikle, kullanılan filtrelerin belirli frekans bantlarında kazanç veya faz kayması yaratması, frekans cevabının gerçek araç içi akustik ortamı tam olarak yansıtmasını kısıtlayıcı bir faktör olmuştur. Ayrıca, araç içi yüzey malzemelerinin (koltuk döşemeleri, tavan kaplamaları, yan paneller, cam yüzeyler vb.) frekans bağımlı akustik

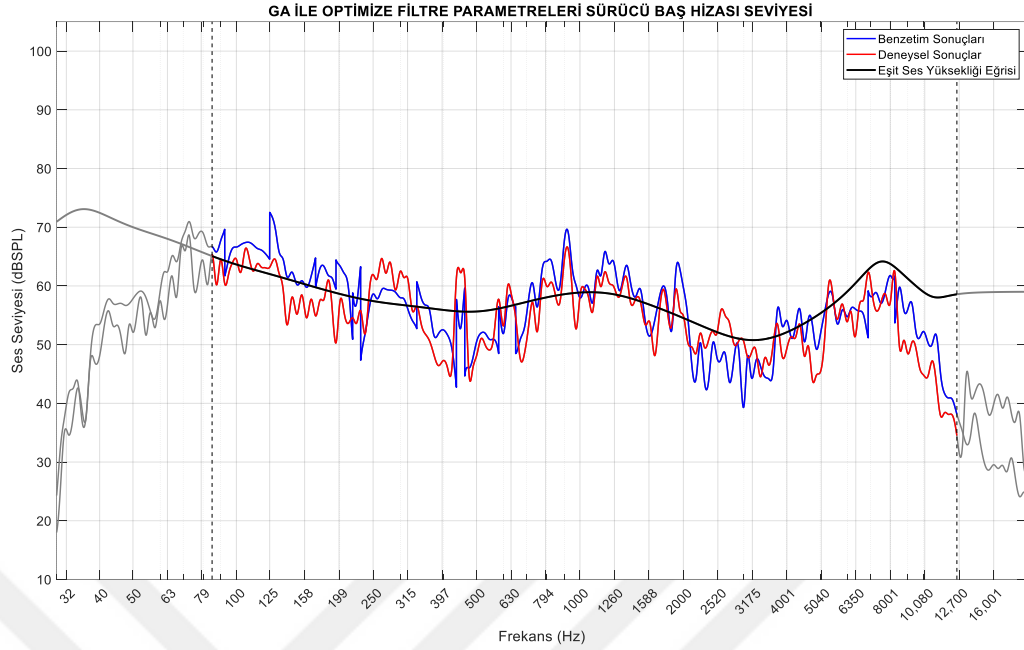
soğurma ve yansıtma özellikleri modelleme aşamasında idealize edilmiştir. Bunun yanı sıra, sıcaklık değişimleri, hava akımı ve araç içi kabin rezonansları gibi faktörler, ölçüm sırasında kaçınılmaz olarak ortaya çıkmış ancak frekans cevabının oluşturulması sürecinde tam olarak dikkate alınamamıştır.

Bu faktörlerin modellenememesi ve araç içi akustik ortam frekans cevabının belirli filtre kombinasyonları altında hesaplanmış olması, benzetim ile deneysel sonuçlar arasında belirli frekans bantlarında farklılıkların oluşmasına neden olmuştur. Ancak, elde edilen sonuçlar genel performans açısından değerlendirildiğinde, modelin sürücü baş hizasında tutarlı ve güvenilir çıktı üretebildiği görülmektedir. Elde edilen optimal filtre parametrelerini detaylandırmak amacıyla, 12. çalıştırmadan elde edilen parametreler Çizelge 4.8'de sunulmuştur.

Çizelge 4.8. Sürücü baş hizası için GA ile optimize edilen parametrik ekolayzır filtre parametreleri

Merkez Frekans Değerleri (Hz)	Kazanç Değerleri (dB)	Q Faktör Değerleri
54	9,8	1,0
65	9,0	0,8
131	-3,4	1,0
324	-1,2	0,6
518	2,9	0,6
853	6,0	1,2
1381	0,7	0,9
3148	-8,6	1,2
7147	10,8	1,2
8522	11,2	1,1

Benzetim ve deneysel sonuçlar Şekil 4.6'da birlikte sunulmuş ve eşit ses yüksekliği konturu ile karşılaştırılmıştır. Burada, mavi çizgi benzetim sonuçlarını, kırmızı çizgi deneysel sonuçları ve siyah çizgi eşit ses yüksekliği konturu temsil etmektedir.



Şekil 4.6. Sürücü baş hızasından GA optimizasyonu sonucunda bulunan filtre parametreleri ile elde edilen benzetim, deneysel ve eşit ses yüksekliği konturunun karşılaştırılması.

Sürücü baş hızasındaki işaretin iyileştirilmesi sürecinde, Şekil 4.5'teki eğri optimize edilmiş hoparlör çıkışını gösterirken, Şekil 4.6'da GA optimizasyonu ile elde edilen yeni hoparlör çıkışı yer almaktadır. Bu iyileştirme sürecinde, benzetim sonuçlarına göre eşit ses yüksekliği konturu ile benzerlik oranı Şekil 4.5'te %55,52 seviyesindeyken, GA optimizasyonu ile bu oran Şekil 4.6'da %68,87'ye yükseltilmiştir. GA, filtre parametrelerini optimize ederek hoparlör çıkışını belirli frekans aralıklarında daha dengeli hale getirmiştir. Yapılan iyileştirmeler, aşağıda detaylandırılmıştır:

- 50-100 Hz frekans aralığında, Şekil 4.5'te görülen düşük frekans bileşenleri için merkez frekans ve kazanç değerleri GA ile optimize edilmiştir. 58 Hz ve 63 Hz merkez frekanslarında kazanç değerleri sırasıyla 11,8 dB ve 11,9 dB iken, GA optimizasyonu sonrasında bu değerler 54 Hz ve 65 Hz frekanslarında 9,8 dB ve 9,0 dB seviyelerine düşürülmüştür. Ayrıca, Q faktör değerinin 54 Hz'de 0,9'dan 1,0'e, 65 Hz'de ise 0,7'den 0,8'e yükseltilmesi, ilgili frekans bileşenlerinin bant genişliğinin daralmasına ve böylece frekans seçiciliğinin artırılmasına olanak sağlamıştır.

- 200-500 *Hz* frekans aralığında, Şekil 4.5'te de görüldüğü üzere kazancın yüksek olması nedeniyle hedef eğriden sapmalar gözlemlenmiştir. 338 *Hz* frekansında kazanç değeri -3,2 *dB* iken, bu değer 324 *Hz* frekansında -1,2 *dB* olarak ayarlanmıştır. Ayrıca, 589 *Hz* frekansındaki fazla kazanç, GA ile merkez frekansı 518 *Hz* olacak şekilde optimize edilmiş ve kazanç 0,7 *dB* seviyesinden 2,9 *dB* seviyesine yükseltilmiştir. Buna ek olarak, *Q* faktör değeri 0,8'den 0,6'ya düşürülerek bu frekans bileşeninin etki alanını genişleterek daha fazla frekans bileşenini kapsamasına olanak sağlamıştır. *Q* faktöründeki bu azalma, ilgili kazanç değişiminin daha geniş bir bant üzerinde dağıtılmasını sağlayarak, belirli bir frekansta aşırı kazanç artışı yerine, geniş bantlı bir iyileştirme sunmuştur.
- 1000-2000 *Hz* frekans aralığında, Şekil 4.5'te de görüldüğü üzere çıkış seviyesi beklenenin üstünde olup, GA optimizasyonu ile düşürülmüştür. 1163 *Hz* frekansında kazanç değeri 7,1 *dB* iken, 1381 *Hz* frekansında 0,7 *dB* olacak şekilde optimize edilmiştir.
- 3000 *Hz* ve üzeri frekanslarda, Şekil 4.5'te de görüldüğü üzere çıkış ile beklenen seviye arasında farklar olup, GA ile optimize edilmiştir. 3326 *Hz* frekansında kazanç değeri -11,7 *dB* iken, 3148 *Hz* frekansında -8,6 *dB* seviyesine yükseltilmiştir. 6768 *Hz* frekansında 12,1 *dB* olan kazanç, 7147 *Hz* frekansında 10,8 *dB*'ye düşürülmüştür. 7792 *Hz* frekansında 11,3 *dB* olan kazanç ise 8522 *Hz* frekansında 11,2 *dB*'ye düşürülmüştür. Ayrıca, *Q* faktöründeki değişimler ile ilgili frekans bileşenlerinin bant genişliği hedeflenen şekilde ayarlanmıştır. 3148 *Hz* frekansında *Q* faktörünün 1,2'ye yükseltilmesi, bu frekans bileşeninin daha dar bir bant aralığında etkili olmasını sağlayarak, spektral seçiciliği artırmıştır. Buna karşılık, 7147 *Hz* frekansında *Q* faktörünün 1,2'ye düşürülmesi, bant genişliğinin artırılmasına neden olmuş ve bu sayede kazanç dağılımı genişletilerek daha yayvan bir frekans tepkisi elde edilmiştir. Aynı şekilde, 8522 *Hz* frekansında *Q* faktörünün 1,1'e düşürülmesi, ilgili frekans bileşeninin daha geniş bir aralıkta etkili olmasını sağlayarak, tiz frekans bölgesinde daha dengeli bir kazanç dağılımına katkıda bulunmuştur.

4.2.3. Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması ile Sürücü Baş Hızası Çıkışı İçin Gerçekleştirilen Filtre Optimizasyonu Benzetim ve Deney Bulguları

GA'ya alternatif olarak, sürücü baş hızasında filtre parametrelerini optimize etmek amacıyla ilk kez PSO uygulanmıştır. Burada da sonuçların sağlamlığını ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla PSO, on üç kez çalıştırılmıştır. Her çalıştırmada, en iyi, en kötü ve ortalama uygunluk değerleri analiz edilerek optimizasyon süreci kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Optimizasyon algoritması çalıştırmalarına ait uygunluk değerleri sonuçları Çizelge 4.9'da özetlenmiştir.

Çizelge 4.9. PSO ile sürücü baş hızası için gerçekleştirilen filtre parametreleri optimizasyonu sonucu elde edilen uygunluk değerleri

Çalıştırma No	En İyi Uygunluk Değeri	En Kötü Uygunluk Değeri	Ortalama Uygunluk Değeri
1	27,4153	41,3249	30,2125
2	27,1869	40,9367	29,7543
3	28,6743	42,1426	30,8614
4	26,9619	39,7618	28,7226
5	25,8703	38,7115	27,2390
6	29,0121	42,8328	30,9367
7	28,2307	41,7663	30,6841
8	27,9736	41,5782	30,3997
9	25,9657	39,0159	27,8248
10	26,3971	39,2588	28,3481
11	26,8462	40,0113	28,4223
12	27,1281	40,7791	29,3149
13	26,8935	40,3423	28,5117

Sonuçlar incelendiğinde, en iyi uygunluk değeri 25,8703 olarak 5. çalıştırmada, en kötü uygunluk değeri ise 42,8328 olup, 6. çalıştırmada elde edilmiştir. Bu sonuçlar, optimizasyon sürecindeki değişkenliği ve araç içi akustik etkinin optimizasyon başarımı üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

Hoparlör çıkışı ile sürücü baş hızasında elde edilen uygunluk değerleri arasındaki farklılık, daha önce de vurgulandığı gibi, araç içi akustik ortamın oluşturduğu frekans cevabından kaynaklanmaktadır. Şekil 3.11'de gösterilen araç içi akustik ortamın frekans cevabının, belirli frekans bantlarında kazanç değişimlerine neden olduğu ve hoparlör

çıkışında optimize edilen frekans bileşenlerinin sürücü baş hizasında tam olarak korunamadığı daha önce tartışılmıştır. Benzer şekilde, PSO algoritması kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmaları da aynı eğilimi göstermiş ve sürücü baş hizasında elde edilen uygunluk değerleri, hoparlör çıkışına kıyasla daha yüksek kalmıştır. Bu durum, optimizasyonda kullanılan yöntemle bakılmaksızın, araç içi akustik etkinin belirleyici bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

Hesaplanan uygunluk değerlerinin ortalaması, standart sapması ve varyansı bulunarak, PSO'nun sürücü baş hizasındaki performansının tutarlılığını ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin sonuçları Çizelge 4.10'da sunulmuştur.

Çizelge 4.10. PSO algoritması ile sürücü baş hizasındaki uygunluk değerlerinin istatistiksel analizi

Metrik	En İyi Uygunluk Değerleri	En Kötü Uygunluk Değerleri	Ortalama Uygunluk Değerleri
Ortalama	27,2735	40,6529	29,3255
Standart Sapma	0,9709	1,2685	1,2358
Varyans	0,9426	1,6091	1,5273

Sonuçlar, sürücü baş hizası için PSO ile gerçekleştirilen filtre optimizasyonunun, GA ile yapılan optimizasyona kıyasla farklı bir dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır. En iyi uygunluk değerinin GA'ya göre daha düşük olması, PSO'nun bazı çalıştırmalarda daha iyi çözümler üretebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, en kötü uygunluk değerinin daha yüksek olması, PSO'nun çözüm uzayında daha geniş bir aralıkta sonuçlar ürettiğini ve optimizasyon sürecindeki değişkenliğin GA'ya kıyasla daha fazla olduğunu göstermektedir.

Standart sapma ve varyans değerleri incelendiğinde, PSO'nun en iyi, en kötü ve ortalama uygunluk değerleri açısından GA'ya göre daha yüksek değişkenlik sergilediği görülmektedir. En iyi uygunluk değerinin varyansının 0,9426 olması, PSO'nun bazı çalıştırmalarda yüksek performanslı çözümler üretebildiğini ancak bu çözümlerin tutarlılığının GA'ya kıyasla daha düşük olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, en

kötü ve ortalama uygunluk değerlerindeki yüksek varyans, optimizasyon sürecinde çözümler arasındaki farkın daha belirgin olduğunu ve PSO'nun GA'ya kıyasla daha geniş bir çözüm uzayını keşfetmeye eğilimli olduğunu göstermektedir.

Bu sonuçlar, GA'nın sürücü baş hizasında daha kararlı ve tutarlı çözümler üretebildiğini, ancak PSO'nun daha geniş bir çözüm aralığını keşfetme eğiliminde olduğunu ve belirli çalıştırmalarda daha iyi sonuçlar üretebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, PSO'nun daha değişken bir optimizasyon süreci sunduğu ve çözüm kalitesindeki dalgalanmaların GA'ya kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum, PSO'nun optimizasyon sürecinde yerel minimumlara sıkışma olasılığını azaltmasına rağmen, her çalıştırmada benzer kaliteye sahip çözümler üretemeyebileceğini göstermektedir.

Elde edilen parametreler, sürücü baş hizası akustik performansını hesaplamak için oluşturulan modelleme yazılımına uygulanmış ve benzetim sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca, filtre parametreleri araç içi eğlence ses sistemine entegre edilerek sürücü baş hizasından ölçümler alınmıştır. Tüm ölçümlerde, en iyi uygunluk değerlerini sağlayan filtre parametreleri uygulanmıştır. Model ve algoritmanın performansını değerlendirmek amacıyla, hoparlörün etkin çalışma frekans aralığında benzetim sonuçları ile eşit ses yüksekliği konturu, deneysel sonuçlar ile eşit ses yüksekliği konturu ve benzetim ile deneysel sonuçlar arasındaki korelasyon, RMSE, karşılıklı bilgi ve spektral uyumluluk hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular Çizelge 4.11'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.11. PSO ile optimize edilen filtre parametreleri sonrası sürücü baş hizası için istatistiksel analiz sonuçları

Çalıştırma No	Benzetim ve İdeal Kontur				Deneysel ve İdeal Kontur				Benzetim ve Deneysel			
	Corr	RMSE	MI	C	Corr	RMSE	MI	C	Corr	RMSE	MI	C
1	0,6845	4,82	0,7486	0,7622	0,6496	4,52	0,7289	0,7704	0,8594	4,64	1,7946	0,7886
2	0,6903	4,72	0,7602	0,7693	0,6512	4,36	0,7338	0,7756	0,8598	4,57	1,8013	0,7892
3	0,6591	5,11	0,7204	0,7396	0,6284	5,22	0,6984	0,7409	0,8527	4,73	1,7884	0,7810
4	0,6992	4,69	0,7712	0,7702	0,6593	4,29	0,7411	0,7806	0,8617	4,25	1,8048	0,7902
5	0,7111	4,59	0,7933	0,7751	0,6779	4,04	0,7725	0,7912	0,8661	4,23	1,8134	0,7913
6	0,6503	5,32	0,7128	0,7301	0,6257	5,27	0,6934	0,7257	0,8543	4,72	1,7829	0,7752
7	0,6657	5,04	0,7277	0,7447	0,6362	4,94	0,7146	0,7512	0,8587	4,67	1,7904	0,7879
8	0,6751	4,96	0,7503	0,7592	0,6389	4,79	0,7233	0,7592	0,8632	4,24	1,8096	0,7907
9	0,7091	4,65	0,7801	0,7731	0,6712	4,12	0,7692	0,7887	0,8669	4,22	1,8148	0,7949
10	0,7014	4,64	0,7793	0,7717	0,6674	4,19	0,7569	0,7836	0,8581	4,68	1,7899	0,7862
11	0,7002	4,62	0,7782	0,7709	0,6638	4,23	0,7492	0,7825	0,8652	4,23	1,8123	1,7909
12	0,6929	4,70	0,7746	0,7697	0,6591	4,31	0,7396	0,7796	0,8591	4,65	1,7922	0,7880
13	0,6999	4,67	0,7779	0,7704	0,6611	4,26	0,7488	0,7814	0,8601	4,25	1,8012	0,7901

Çizelge 4.11'de sunulan Pearson korelasyon, RMSE, karşılıklı bilgi ve spektral uyumluluk değerleri, modelin ve algoritmanın performansını değerlendirmek açısından önemli bulgular ortaya koymaktadır. En iyi genel performans, 5. çalıştırmada elde edilmiştir. Bu çalıştırmada, benzetim sonuçları ile eşit ses yüksekliği konturu arasındaki korelasyon en yüksek seviyeye ulaşmış ve RMSE değeri en düşük seviyede hesaplanmıştır. Benzetim ile eşit ses yüksekliği konturu arasındaki korelasyon katsayısı 0,7111 olarak bulunmuş, aynı zamanda en düşük RMSE değeri 4,59 olarak elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar ile eşit ses yüksekliği konturu karşılaştırıldığında ise en düşük RMSE değeri 4,04 olarak hesaplanırken, korelasyon katsayısı 0,6779 seviyesinde gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, PSO'nun belirli çalıştırmalarda yüksek doğruluk sağlayabildiğini ve deneysel ölçümler ile eşit ses yüksekliği konturu arasındaki korelasyonu GA'ya kıyasla daha iyi koruduğunu göstermektedir. Karşılıklı bilgi değerleri incelendiğinde, benzetim ve eşit ses yüksekliği konturu arasındaki bilgi paylaşımının 0,7933 olduğu görülmektedir. Deneysel sonuçlar ile eşit ses yüksekliği konturu arasındaki MI değeri ise 0,7725 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, PSO'nun GA'ya kıyasla daha yüksek bilgi paylaşımı sağlayabildiğini ve modelin bilgi içeriğini daha iyi koruyabildiğini göstermektedir. Ayrıca, benzetim ve deneysel ölçümler arasındaki karşılıklı bilgi miktarının 1,8134 olarak hesaplanması, PSO'nun

optimizasyon sürecinde fiziksel ölçümleri büyük ölçüde temsil edebildiğini ve benzetim ile deneysel sonuçlar arasındaki bilgi paylaşımını GA'ya kıyasla daha iyi koruduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, MI değerlerindeki genel değişkenlik dikkate alındığında, PSO'nun belirli çalıştırmalarda daha başarılı sonuçlar üretmesine rağmen, genel kararlılığının GA'ya kıyasla daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Spektral uyumluluk analizine bakıldığında, benzetim ile eşit ses yüksekliği konturu için 0,7751, deneysel sonuçlar ile eşit ses yüksekliği konturu için 0,7912 ve benzetim ile deneysel ölçümler arasındaki uyumluluk için 0,7913 değeri elde edilmiştir. C değerlerinin GA'ya kıyasla daha yüksek olması, PSO'nun belirli frekans bantlarında daha etkili bir optimizasyon gerçekleştirdiğini ve genel spektral yapıyı GA'ya göre daha iyi koruyabildiğini ortaya koymaktadır. Deneysel sonuçlar ile eşit ses yüksekliği konturu arasındaki spektral uyumluluk değerinin yüksek olması, PSO'nun fiziksel ölçümler ile hedef eğri arasındaki spektral farkı azaltmada GA'ya kıyasla daha başarılı olduğunu göstermektedir.

Ölçütler beraber değerlendirildiğinde GA optimizasyonunda olduğu gibi burada da, benzetim ve deneysel ölçümlerin yüksek oranda uyum sağladığı, ancak eşit ses yüksekliği konturundan belirli sapmalar gösterdiği anlaşılmaktadır. Benzetim ve deneysel sonuçlar arasında görülen yüksek benzerlik, modelleme sürecinin başarılı bir performans sergilediğini desteklemektedir. Ancak, eşit ses yüksekliği konturuna göre oluşan farklılıklar, araç içi akustik ortamın karmaşık yapısından, modelleme sürecinde ihmal edilen faktörlerden ve kullanılan hoparlörlerin frekans tepkisinden kaynaklanabilir. Özellikle araç içi yansımalar, absorpsiyon ve kabin rezonansları gibi akustik parametrelerin modellemede sınırlı şekilde temsil edilmesi, eşit ses yüksekliği konturu ile tam örtüşmemenin ana nedenlerinden biridir.

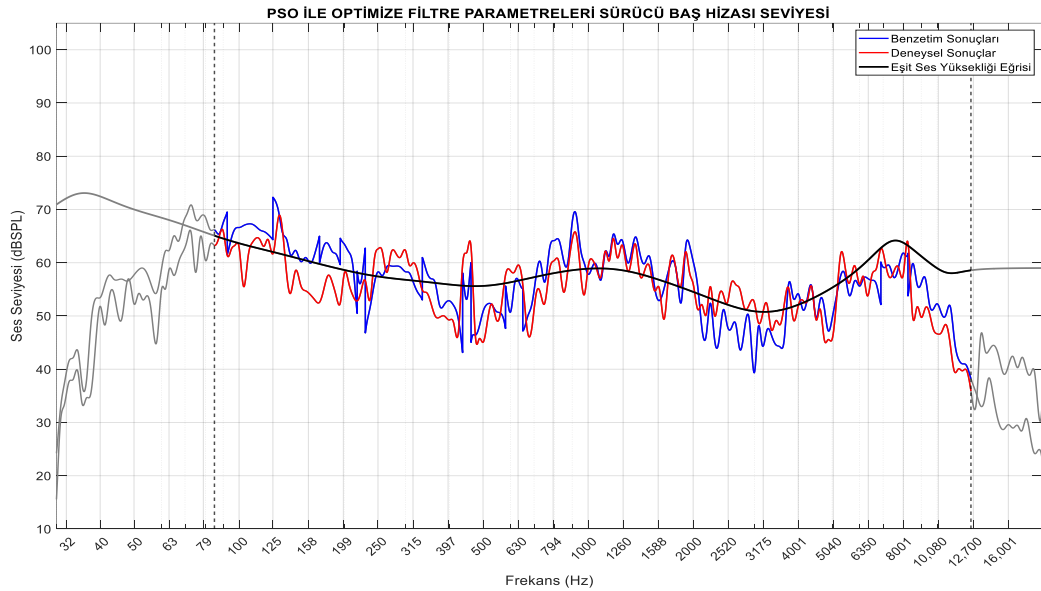
PSO optimizasyonunda da GA optimizasyonunda olduğu gibi, sürücü baş hizasında elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlar arasında belirli farklılıklar gözlemlenmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, bu farklılıklar araç içi akustik ortamın modellenmesi sırasında tüm fiziksel ve çevresel değişkenlerin birebir temsil edilememesinden ve araç içi akustik ortam frekans cevabının belirli deneysel koşullar altında sınırlı filtre kombinasyonları ile hesaplanmış olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak, genel performans açısından değerlendirildiğinde, PSO optimizasyonu ile elde edilen

sonuçların da tutarlı ve güvenilir çıktı ürettiği görülmektedir. Elde edilen optimal filtre parametrelerini detaylandırmak amacıyla, 5. çalıştırmadan elde edilen parametreler Çizelge 4.12'de sunulmuştur.

Çizelge 4.12. Sürücü baş hizası için PSO ile optimize edilen parametrik ekolayzır filtre parametreleri

Merkez Frekans Değerleri (Hz)	Kazanç Değerleri (dB)	Q Faktör Değerleri
53	9,0	1,1
64	8,3	0,8
160	-3,5	0,8
204	-0,5	0,7
486	4,5	0,6
1072	6,0	1,1
1377	0,5	1,0
3560	-8,2	1,1
7726	12,0	1,0
8635	11,7	1,1

Benzetim ve deneysel sonuçlar, Şekil 4.7’de de birlikte sunulmuş olup eşit ses yüksekliği konturu ile kıyaslanmıştır. Grafikte mavi çizgi benzetim sonuçlarını, kırmızı çizgi deneysel sonuçları ve siyah çizgi eşit ses yüksekliği konturunu göstermektedir.



Şekil 4.7. Sürücü baş hizasından PSO optimizasyonu sonucunda bulunan filtre parametreleri ile elde edilen benzetim, deneysel ve eşit ses yüksekliği konturunun karşılaştırılması.

Sürücü baş hizasındaki işaretin iyileştirilmesi sürecinde, Şekil 4.5'teki eğri optimize edilmiş hoparlör çıkışını gösterirken, Şekil 4.7'de PSO ile elde edilen yeni hoparlör çıkışı yer almaktadır. Bu süreçte, eşit ses yüksekliği konturuna yakınsama oranı Şekil 4.5'te %55,52 olarak hesaplanmışken, PSO optimizasyonu sonucunda Şekil 4.7'de %71,11 seviyesine yükselmiştir. PSO, hoparlörün filtre parametrelerini optimize ederek belirli frekans aralıklarında daha dengeli bir çıkış elde edilmesini sağlamıştır. Yapılan iyileştirmeler, aşağıda detaylandırılmıştır:

- 50-100 *Hz* frekans aralığında, Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, hoparlör çıkışında düşük frekans bileşenleri hedef eğrinin üzerinde kalmış ve PSO optimizasyonu ile bu bölgedeki fazla kazanç azaltılmıştır. 58 *Hz* ve 63 *Hz* merkez frekanslarında kazanç değerleri sırasıyla 11,8 *dB* ve 11,9 *dB* iken, PSO ile bu değerler 53 *Hz* ve 64 *Hz*'de 9,0 *dB* ve 8,3 *dB* seviyelerine düşürülmüştür. Bu azalma, ilgili frekans bileşenlerinin eşit ses yüksekliği konturuna daha iyi uyum sağlamasını ve spektral dengenin korunmasını sağlamıştır. Ayrıca, *Q* faktör değerinin 53 *Hz*'de 0,9'dan 1,1'e, 64 *Hz*'de ise 0,7'den 0,8'e yükseltilmesi, bu frekans aralığında daha dar bir bant üzerinde etkili olmasını sağlamıştır.
- 200-500 *Hz* frekans aralığında, Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, hoparlör çıkışı bu frekans aralığında hedef eğrinin altında kalmış ve PSO optimizasyonu ile eksik frekans bileşenleri güçlendirilerek spektral denge sağlanmıştır. Başlangıçta 338 *Hz*'de -3,2 *dB* iken, parçacık sürü optimizasyonu ile 204 *Hz*'de -0,5 *dB* seviyesine yükseltilmiştir. Bu artış, orta frekans bölgesinde zayıf kalan bileşenlerin hedef eğri ile daha iyi örtüşmesini sağlamıştır. Bunun yanı sıra, başlangıçta 589 *Hz*'de 0,7 *dB* iken, PSO ile 4,5 *dB* seviyesine yükseltilmiştir. Bu değişim, orta frekans bileşenlerinin eksikliğini gidererek eşit ses yüksekliği konturuna uyumu artırmış ve hoparlör çıkışının daha dengeli hale getirilmesine katkı sağlamıştır. Ayrıca, *Q* faktör değerleri azaltılarak bu frekans bölgesinde daha geniş bantlı bir etki oluşturulmuştur.
- 1000-2000 *Hz* frekans aralığında, Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, bu frekans aralığında hoparlör çıkışı hedef eğri ile belirli bölgelerde uyumsuzluk göstermekte olup, PSO optimizasyonu ile fazla kazanç düşürülerek spectral denge sağlanmıştır. Başlangıçta 1163 *Hz*'de kazanç değeri 7,1 *dB* iken, PSO optimizasyonunda 1377 *Hz*'de 0,5 *dB* seviyesine düşürülmüştür. Bu değişim,

ilgili frekans bileşenlerinin aşırı kazanç farklarını minimize ederek eşit ses yüksekliği konturuna daha iyi uyum sağlamasına katkı sunmuştur. Ayrıca, Q faktör değerinin artması, bu frekans aralığında daha dar bir bant üzerinde etkili olmasını sağlamıştır.

- 3000 Hz üzeri frekanslarda, Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, üst frekans bölgesinde belirli frekanslarda fazla kazanç bulunmakta olup, PSO optimizasyonu ile bu bölgede dengeli bir yapı elde edilmiştir. Başlangıçta, 3326 Hz'de -11,7 dB olarak belirlenmişken, PSO algoritması ile 3560 Hz'de -8,2 dB seviyesine yükseltilmiştir. Bu değişim, üst frekans bölgesinde fazla kazanç kayıplarının önüne geçerek spektral bütünlüğün korunmasına yardımcı olmuştur. Buna ek olarak, 6768 Hz frekansında 12,1 dB olan kazanç, PSO optimizasyonunda 7726 Hz'de 12,0 dB'ye düşürülerek daha kontrollü hale getirilmiştir. Bu ayarlama, tiz frekanslardaki kazanç farklarını azaltarak daha doğal bir ses karakteristiği sağlanmasına yardımcı olmuştur. Ayrıca, 7792 Hz'de başlangıçta 11,3 dB iken, PSO optimizasyonunda 8635 Hz'de 11,7 dB'ye yükseltilmiştir. Bu artış, üst frekans bileşenlerinin hedef eğriyle daha iyi örtüşmesini sağlamıştır. Q faktör değerlerinde yapılan değişiklikler, üst frekans bölgesinde bant genişliğinin kontrol edilmesine katkı sunmuştur. 3560 Hz'de Q faktörünün 1,1'e yükseltilmesi, belirli bir frekans bileşeninin daha dar bir bant aralığında etkili olmasını sağlamıştır. Buna karşılık, 7726 Hz ve 8635 Hz frekanslarında Q faktörünün sırasıyla 1,0 ve 1,1 olarak optimize edilmesi, bant genişliğinin artırılmasını ve kazanç dağılımının daha geniş bir alana yayılmasını sağlamıştır.

PSO'nun sürücü baş hizasında elde ettiği %71,11'lik başarı oranının, GA'nın sağladığı %68,87'lik orana kıyasla daha yüksek olması, optimizasyon mekanizmalarının akustik sistemlerdeki farklı etkilerinden kaynaklanmaktadır. PSO, bireylerin hem kendi deneyimlerinden hem de topluluğun en iyi çözümünden yararlanarak problem uzayında daha etkin bir arama gerçekleştirmektedir. Bu özellik, yerel ve küresel optimumlar arasındaki dengeyi daha iyi kurmasını sağlamış ve eşit ses yüksekliği konturuna daha yüksek bir yakınsama oranı ile sonuçlanmıştır. PSO ve GA arasındaki akustik performans farkları, aşağıda detaylandırılmıştır:

- 200-500 *Hz* frekans aralığında, Şekil 4.7’de PSO ile elde edilen kazanç profili, GA optimizasyonuna kıyasla eşit ses yüksekliği konturuna daha yakın bir seyir izlemektedir. GA ile gerçekleştirilen optimizasyonda, bu frekans bölgesinde belirli kazanç dalgalanmaları gözlemlenirken, PSO’nun daha dengeli bir optimizasyon sağladığı görülmektedir. Bu durum, PSO’nun bu frekans aralığında daha kontrollü ve istikrarlı bir parametre güncellemesi gerçekleştirdiğini göstermektedir.
- 1000-2000 *Hz* frekans aralığında, GA ile elde edilen sonuçlarda belirli frekanslarda ani kazanç değişimleri görülürken, PSO optimizasyonunda bu tür dalgalanmaların azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.7’de, Şekil 4.6’ya kıyasla PSO ile bu bölgedeki kazanç seviyelerinin daha düzenli olduğu ve frekans cevabının daha tutarlı bir şekilde optimize edildiği belirlenmiştir. Bu fark, PSO’nun arama sürecinde küresel ve yerel en iyi çözümler arasında daha etkili bir denge sağlayabilmesiyle ilişkilendirilmektedir.
- 3000 *Hz* ve üzerindeki frekanslarda, PSO optimizasyonu ile elde edilen eğrinin GA’ya kıyasla daha dengeli olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.6’da GA ile elde edilen sonuçlar, bu frekans aralığında ani kazanç değişimleri içerirken, PSO ile gerçekleştirilen optimizasyonda bu değişimlerin azaldığı ve daha sürekli bir frekans cevabı elde edildiği belirlenmiştir. GA’nın çaprazlama ve mutasyon süreçlerine bağlı rastgelelik içeren doğası, bu tür yüksek frekanslarda daha büyük değişkenliklere neden olabilirken, PSO’nun parçacık hareketlerini önceki en iyi çözümlere göre güncellemesi, bu bölgede daha kararlı bir optimizasyon sağlamıştır.

Genel olarak, GA’nın yerel minimumlara sıkışma olasılığının daha yüksek olduğu ve optimizasyon sürecinin rastgele mutasyonlara bağımlı olması nedeniyle belirli frekans bölgelerinde daha büyük değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Buna karşılık, PSO daha dengeli bir arama mekanizmasına sahip olduğundan, özellikle orta ve yüksek frekans aralıklarında GA’ya kıyasla daha istikrarlı ve eşit ses yüksekliği konturuna daha yakın sonuçlar üretmiştir.

PSO, akustik sistemlerde çok boyutlu optimizasyon gereksinimlerini karşılamak için yerel ve küresel optimumlar arasında daha etkili bir denge kurarak, sürücü baş hizasındaki hoparlör çıkışını daha başarılı bir şekilde optimize etmiştir. Özellikle 200-500 *Hz* aralığındaki düşük frekanslarda ve 3000 *Hz* ve üzerindeki yüksek frekanslarda, PSO'nun daha hassas bir optimizasyon yapması, eşit ses yüksekliği konturuna daha yüksek bir yakınsama oranı olan %71,11'in elde edilmesini sağlamıştır.

Bu farklılık, Şekil 4.7'deki eğrinin, Şekil 4.6'daki GA ile optimize edilen eğriye kıyasla eşit ses yüksekliği konturuna daha yakın olmasıyla açıkça görülmektedir. PSO'nun, frekans bileşenlerinin dengelemesinde GA'ya kıyasla daha kararlı sonuçlar üretmesi, hoparlör çıkışının daha istikrarlı ve hedeflenen akustik cevapla daha uyumlu olmasını sağlamıştır.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, SUV tipi bir aracın hoparlör çıkışında ve sürücü baş hizasında algılanan sesin, eşit ses yüksekliği konturuyla daha uyumlu hale getirilmesi amacıyla ekolayzır filtre parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, ilk olarak hoparlör çıkışı, araç içi akustik ortam ve sürücü baş hizasında algılanan ses karakteristikleri incelenmiş, benzetim ve deneysel ölçümler kullanılarak araç içi akustik model oluşturulmuştur.

Çalışmada, 1/1 oktav bantlarında tanımlanan eşit ses yüksekliği konturu baz alınarak on farklı parametrik ekolayzır modeli oluşturulmuş ve hoparlör çıkışı için işaret işleme temelli hesaplama teknikleri uygulanmıştır. Aynı filtre ayarları araç içi eğlence sistemine aktarılmış, deneysel ve benzetim sonuçları karşılaştırılarak modelin güvenilirliği doğrulanmıştır.

Hoparlör çıkışının eşit ses yüksekliği konturuyla uyumluluğunu değerlendirmek için korelasyon ve RMSE analizleri gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sürecinde, GA kullanılarak parametrik ekolayzır filtrelerinin merkez frekansı, kazanç değeri ve Q faktörü optimize edilmiş ve toplamda on üç çalıştırma gerçekleştirilerek farklı filtre parametreleri analiz edilmiştir.

Hoparlör çıkışının eşit ses yüksekliği konturuna uygunluğunun artırılması için gerçekleştirilen filtre optimizasyonunun ardından, oluşturulan benzetimin araç içi akustik doğruluğu ve kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, sürücü baş hizasındaki akustik performans detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Araç içi yansıma, absorpsiyon ve yönelim gibi akustik etkiler nedeniyle hoparlör çıkışı ile sürücü baş hizasında algılanan sesin farklılık gösterdiği belirlenmiş ve araç içi akustik ortamın frekans cevabı çıkarılmıştır. Bu doğrultuda, yirmi beş farklı rastgele filtre konfigürasyonu kullanılarak hoparlör çıkışı ölçümleri ve sürücü baş hizası ölçümleri oranlanarak akustik ortamın frekans cevabı elde edilmiş ve modelleme sürecine entegre edilmiştir.

Baş hizasındaki frekans tepkisinin ideal eşit ses yüksekliği konturuyla uyumunu daha kapsamlı değerlendirmek amacıyla, korelasyon ve RMSE analizlerine ek olarak, karşılıklı bilgi ve spektral uyumluluk analizleri de gerçekleştirilmiştir. Bu ölçütler, benzetim modelinin doğruluğunu artırmak ve metasezgisel algoritmaların uygunluk fonksiyonunu iyileştirmek amacıyla kullanılmıştır.

Son olarak, araç içi akustik ortamın frekans cevabının entegrasyonu ile geliştirilen benzetim ortamında, hoparlör ve sürücü baş hizasındaki çıkışların eşit ses yüksekliği konturu ile uyumunun artırılması amacıyla GA ve PSO algoritmaları ile filtre parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Her iki algoritma da on üç kez çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar hem benzetim hem de deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır.

5.1. Genetik Algoritma İle Hoparlör Çıkışı İçin Gerçekleştirilen Filtre Optimizasyonu ve Elde Edilen Sonuçlar

Hoparlör çıkışının eşit ses yüksekliği konturuna uyumunun artırılması amacıyla frekans tepkileri ve giriş işareti Matlab ortamına aktarılmıştır. Bu modeller frekans alanında tanımlandığından, zaman alanındaki konvolüsyon işleminin frekans alanındaki karşılığı olan çarpma işlemi uygulanmış ve bu yöntemle hoparlör çıkışı hesaplanmıştır. Aynı filtre ayarları araç içi eğlence sistemine uygulanmış, deneysel ölçümler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar benzetim verileriyle karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Optimal akustik performansın sağlanması amacıyla, her bir parametrik ekolayzırın merkez frekansı, kazancı ve Q faktörü GA ile optimize edilmiştir. Filtre parametreleri, eşit ses yüksekliği konturuyla yüksek düzeyde benzerlik sağlayacak şekilde belirlenmiş ve optimizasyon süreci sonrasında elde edilen parametreler araç içi eğlence sistemine uygulanarak deneysel veriler elde edilmiştir. Çalışmanın etkinliği, Matlab ortamında gerçekleştirilen benzetim sonuçları ile deneysel verilerin korelasyon ve RMSE analizleri kullanılarak detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

İlk olarak, eşit ses yüksekliği konturlarına göre belirlenen parametrik ekolayzır filtre parametreleri modele uygulanmış ve hoparlör çıkışı hesaplanmıştır. Daha sonra, aynı filtre parametreleri test düzeneğinde uygulanarak hoparlör çıkışı ölçülmüş ve elde edilen benzetim ile deneysel sonuçlar analiz edilmiştir. Yapılan değerlendirmede, Pearson korelasyon katsayısı 0,9295 ve RMSE değeri 2,29 olarak hesaplanmış olup, bu bulgular benzetim ve deneysel sonuçların yüksek derecede benzer olduğunu göstermektedir. Ancak, modele dahil edilmeyen bileşenler ile test düzeneğinden kaynaklanan bazı zayıflamalar, korelasyon katsayısı ve RMSE hesaplamalarını etkilemiştir.

Elde edilen sonuçlar, eşit ses yüksekliği konturu ile karşılaştırılmıştır. Benzetim ve deneysel sonuçların Pearson korelasyon katsayıları sırasıyla 0,6341 ve 0,6715, RMSE değerleri ise 4,88 ve 2,57 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, ideal filtre değerleri kullanılmış olmasına rağmen, hoparlör çıkışı ile eşit ses yüksekliği konturu arasındaki benzerliğin düşük kaldığını göstermektedir. Hoparlörün belirli frekanslara karşı daha duyarlı olması, genliklerde sapmalara yol açarak sistemin genel performansını etkilemiş ve eşit ses yüksekliği konturuna olan benzerliği azaltmıştır.

Yapılan analizler ve testlerin ardından, on parametrik ekolayzır filtresinin parametreleri, GA tabanlı bir optimizasyon algoritması kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçların güvenilirliğini artırmak amacıyla GA on üç kez çalıştırılmış ve her çalıştırmada optimizasyon süreci kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. En iyi, en kötü ve ortalama uygunluk değerleri analiz edilerek hesaplanan parametreler hem modelleme yazılımına hem de test düzenine uygulanarak ölçümler gerçekleştirilmiştir.

GA çalıştırmalarının sonuçları, algoritmanın filtre parametrelerini optimize etmede tutarlı ve etkili bir performans sergilediğini göstermektedir. Özellikle dokuzuncu çalıştırma, en iyi genel performansı sağlamış olup, en iyi uygunluk değeri 2,2826; en kötü uygunluk değeri 3,8436 ve ortalama uygunluk değeri 3,0773 olarak hesaplanmıştır.

Benzetim sonuçları ile eşit ses yüksekliği konturu arasındaki Pearson korelasyon katsayısı 0,9692, RMSE değeri ise 1,17 olarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçların eşit ses yüksekliği konturu ile karşılaştırılmasında ise 0,9675 Pearson korelasyon katsayısı

ve 1,34 RMSE değeri elde edilmiştir. Bu metrikler, dokuzuncu çalıştırmada optimize edilen filtre parametrelerinin eşit ses yüksekliği konturuna en yüksek benzerliği sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, benzetim ve deneysel sonuçlar arasındaki korelasyon katsayısı 0,9864, RMSE değeri ise 1,00 olarak hesaplanmıştır. Bu durum deneysel ve benzetim sonuçlarının yüksek benzerlik sağladığını göstermekte olup, modellemenin başarısını ortaya koymaktadır.

Başlangıç değerleri ile optimizasyon sonrası elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, GA'nın hoparlör çıkışı üzerindeki iyileştirici etkisi açıkça görülmektedir. Benzetim sonuçları için Pearson korelasyon katsayısı 0,6341'den 0,9692'ye çıkarak %52,84'lük bir artış sağlamıştır. Ayrıca, RMSE değeri 4,88'den 1,17'ye düşerek %76,02 oranında iyileşme kaydedilmiştir. Deneysel sonuçlar açısından ise Pearson korelasyon katsayısı 0,6715'ten 0,9675'e yükselerek %44,08'lik bir gelişim sağlarken, RMSE değeri 2,57'den 1,34'e düşerek %47,86'lık bir iyileşme elde edilmiştir.

Bu sonuçlar, önerilen optimizasyon yönteminin gerçek dünya uygulamalarına uyarlanabilirliğini artırmanın yanı sıra, sistemin daha hassas ve tutarlı bir şekilde ayarlanmasına da olanak tanımaktadır.

5.2. Genetik Algoritma İle Sürücü Baş Hızası İçin Gerçekleştirilen Filtre Optimizasyonu ve Elde Edilen Sonuçlar

Hoparlör çıkışı için gerçekleştirilen filtre optimizasyonunun sürücü baş hizasında sağladığı iyileşmeyi değerlendirmek amacıyla, öncelikle hoparlör çıkışında kullanılan standart parametrik ekolayzır filtre ayarları sürücü baş hizasında uygulanmış ve sistem performansı analiz edilmiştir. Benzetim ve deneysel ölçümler ideal ses konturu ile karşılaştırılmış, korelasyon katsayıları sırasıyla 0,4183 ve 0,4123; RMSE değerleri ise benzetim için 7,02, deneysel ölçümler için 8,36 olarak hesaplanmıştır.

Daha sonra, hoparlör çıkışı için GA ile optimize edilen filtre parametreleri sürücü baş hizasında uygulanarak sistem performansı tekrar değerlendirilmiştir. Bu aşamada, benzetim ve deneysel ölçümler eşit ses yüksekliği konturu ile karşılaştırılmış ve

korelasyon katsayıları sırasıyla 0,5552 ve 0,5510; RMSE değerleri ise benzetim için 8,68, deneysel ölçümler için 5,25 olarak hesaplanmıştır.

Bu bulgular, hoparlör çıkışı için gerçekleştirilen filtre optimizasyonu sonrasında elde edilen parametrelerin, standart parametrik ekolayzır ayarlarına kıyasla sürücü baş hizasında daha yüksek doğruluk sağladığını göstermektedir. Ancak, hoparlör çıkışı için yapılan optimizasyonun sürücü baş hizasında belirli bir iyileşme getirmesine rağmen, özellikle belirli frekans bantlarında sapmaların devam ettiği gözlemlenmiştir.

Bu farklılığın temel nedenlerinden biri, hoparlör çıkışı ile sürücü baş hizası arasındaki akustik ortamın, yansımalar, absorpsiyon ve difraksiyon gibi faktörlerden dolayı belirgin değişiklikler göstermesidir. Hoparlör çıkışında filtre optimizasyonu sonrası iyileştirilen frekans bileşenleri, araç içi akustik ortamın etkisiyle sürücü baş hizasında farklı bir frekans cevabı oluşturmakta ve bu da optimizasyon sürecinin doğrudan aktarılmasını zorlaştırmaktadır.

Bu doğrultuda, araç içi akustik ortamın frekans cevabının belirlenmesi ve modelleme sürecine dahil edilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu amaçla, sistem rastgele 25 farklı filtre konfigürasyonu ile test edilmiş ve her bir deneyde hoparlör çıkışı ile sürücü baş hizasında alınan ölçümler oranlanarak frekans cevabı elde edilmiştir. Böylece, hoparlör çıkışı ile sürücü baş hizası arasındaki akustik etkileşim, benzetim modeline entegre edilerek daha gerçekçi bir optimizasyon ortamı sağlanmıştır.

Bu geliştirilmiş modelleme sürecinin ardından, GA kullanılarak parametrik ekolayzır filtre ayarları yeniden optimize edilmiştir. Algoritma on üç farklı çalıştırmada test edilmiş ve her çalıştırma sonucunda en iyi, en kötü ve ortalama uygunluk değerleri hesaplanmıştır. Özellikle 12. çalıştırmada elde edilen 27,3702 en iyi uygunluk değeri, optimizasyon sürecinde önemli bir iyileşme sağlandığını ortaya koymaktadır. Ortalama uygunluk değeri 29,7869; en kötü çalıştırma sonucu ise 39,3057 ile 2. çalıştırmada gözlemlenmiştir.

Optimizasyon süreci tamamlandıktan sonra, benzetim ve deneysel sonuçlar tekrar analiz edilmiştir. Benzetim ve eşit ses yüksekliği konturu arasındaki korelasyon katsayısı 0,6887'ye, deneysel ve eşit ses yüksekliği konturu arasındaki korelasyon katsayısı ise 0,6444 seviyesine yükselmiştir. Benzetim ve deneysel veriler arasındaki korelasyon katsayısı 0,8592 olarak hesaplanmıştır. RMSE analizlerinde, benzetim ve deneysel sonuçlar ile eşit ses yüksekliği konturu arasında sırasıyla 4,76; ve 4,60 değerleri elde edilmiştir. Benzetim ve deneysel sonuçlar arasındaki RMSE değeri ise 4,68 olarak hesaplanmıştır. Benzetimler ve deneysel ölçümler arasındaki bu sonuçlar modelleme sürecinin fiziksel ölçümleri büyük ölçüde temsil edebildiğini göstermektedir.

Karşılıklı bilgi analizi sonuçlarına göre, eşit ses yüksekliği konturu ile benzetim arasındaki bilgi paylaşımı 0,7522; eşit ses yüksekliği konturu ile deney arasındaki bilgi paylaşımı ise 0,7316 olarak hesaplanmıştır. Benzetim ile deney arasındaki karşılıklı bilgi miktarı ise 1,7732 olarak bulunmuştur. Bu değerler, modelin fiziksel ölçümleri büyük ölçüde yansıtabildiğini ve benzetim ile deneysel ölçümler arasında yüksek oranda bilgi aktarımı sağlandığını göstermektedir. Ancak, eşit ses yüksekliği konturu ile benzetim ve deney arasındaki karşılıklı bilgi miktarının daha düşük olması, belirli frekans bileşenlerinde modelin hedef eğriyle tam örtüşmediğini ve akustik transfer sürecinde kayıpların oluştuğunu göstermektedir.

Spektral uyumluluk analizine göre, eşit ses yüksekliği konturu ile benzetim arasındaki spektral uyumluluk değeri 0,7691; eşit ses yüksekliği konturu ile deney arasındaki uyumluluk değeri ise 0,7745 olarak hesaplanmıştır. Benzetim ile deneysel veriler arasındaki spektral uyumluluk katsayısı 0,7860 olarak bulunmuştur. Spektral uyumluluk değerlerinin birbirine yakın olması, modelin genel spektral karakteristiğinin hem benzetim hem de deney ortamında tutarlı kaldığını göstermektedir. Ancak, eşit ses yüksekliği konturu ile spektral uyumluluk değerlerinin tam eşleşme sağlayamaması, optimizasyon sürecinin belirli frekans aralıklarında hala iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Başlangıç değerleriyle karşılaştırıldığında, benzetim sonuçlarının korelasyon katsayısı %64,68 oranında artış göstererek 0,4183'ten 0,6887'ye yükselmiştir. RMSE değeri

%32,19 oranında azalarak 7,02'den 4,76'ya düşmüştür. Deneysel sonuçlar açısından, korelasyon katsayısı %56,31 oranında artarak 0,4123'ten 0,6444'e yükselmiş, RMSE değeri ise %45,00 oranında azalarak 8,36'dan 4,60'a gerilemiştir.

Sonuçlar olarak araç içi akustik ortamın frekans cevabının modele dahil edilmesinin optimizasyon sürecinin etkinliğini artırdığı ve hoparlör çıkışından sürücü baş hizasına iletilen sesin daha doğru modellenmesine katkıda bulunduğu ortaya konmuştur.

Optimizasyon sonrası, eşit ses yüksekliği konturu ile uyum artmıştır. Ancak bu iyileşme sınırlı düzeyde kalmıştır. Bunun başlıca nedenleri, araç içi akustik ortamın karmaşıklığı, modelleme sürecinde ihmal edilen faktörler, hoparlörlerin frekans tepkisi ve sınırlı filtre kombinasyonlarıdır. Özellikle, araç içi yansımalar, absorpsiyon ve kabin rezonansları gibi akustik parametrelerin modellemede yetersiz temsil edilmesi, eşit ses yüksekliği konturuyla tam örtüşmeyi engelleyen temel faktörlerden biridir.

5.3. Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması İle Sürücü Baş Hızası İçin Gerçekleştirilen Filtre Optimizasyonu ve Elde Edilen Sonuçlar

Alternatif bir optimizasyon yöntemi olarak PSO kullanılmış ve parametrik ekolayzır filtre parametreleri doğrudan sürücü baş hizasındaki akustik ölçümlere göre optimize edilmiştir.

PSO optimizasyonu kapsamında, 13 farklı çalıştırma gerçekleştirilmiş ve her çalıştırmada en iyi, en kötü ve ortalama uygunluk değerleri hesaplanarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda, en iyi uygunluk değeri 25,8703 ile 5. çalıştırmada elde edilmiştir. En kötü sonuç 42,8328 olarak 6. çalıştırmada gözlemlenirken, ortalama uygunluk değeri 29,3255 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, PSO'nun sürücü baş hizasında ek bir performans artışı sağladığını göstermektedir.

PSO optimizasyonunun ardından, benzetim ve deneysel veriler tekrar analiz edilmiştir. Benzetim ve eşit ses yüksekliği konturu arasındaki korelasyon 0,7111 seviyesine ulaşırken, deneysel ve eşit ses yüksekliği konturu arasındaki korelasyon 0,6779 olarak

hesaplanmıştır. Benzetim ve deneysel veriler arasındaki uyum ise %86,61 seviyesine çıkmıştır. RMSE analizlerinde, benzetim ve deneysel sonuçlar ile eşit ses yüksekliği konturu arasında sırasıyla 4,59 ve 4,04 değerleri elde edilmiştir. Benzetim ve deneysel sonuçlar arasındaki RMSE değeri ise 4,23 olarak hesaplanmıştır.

Karşılıklı bilgi analizi sonuçlarına göre, eşit ses yüksekliği konturu ile benzetim arasındaki bilgi paylaşımı 0,7933; eşit ses yüksekliği konturu ile deney arasındaki bilgi paylaşımı ise 0,7725 olarak hesaplanmıştır. Benzetim ile deney arasındaki karşılıklı bilgi miktarı ise 1,8134 olarak bulunmuştur. Bu değerler, PSO optimizasyonunun modelin bilgi içeriğini koruduğunu ve fiziksel ölçümler ile benzetim arasındaki bilgi paylaşımını artırabildiğini göstermektedir. Ancak, belirli frekans bileşenlerinde modelin hedef eğriyle tam örtüşmemesi nedeniyle bilgi paylaşımında bazı kayıpların yaşandığı görülmektedir.

Spektral uyumluluk analizine göre, eşit ses yüksekliği konturu ile benzetim arasındaki spektral uyumluluk değeri 0,7751, eşit ses yüksekliği konturu ile deney arasındaki uyumluluk değeri ise 0,7912 olarak hesaplanmıştır. Benzetim ile deneysel veriler arasındaki spektral uyumluluk katsayısı 0,7913 olarak bulunmuştur. Bu değerlerin yüksek olması, PSO'nun spektral yapıyı koruyarak belirli frekans bantlarında daha başarılı bir optimizasyon sunduğunu göstermektedir. Özellikle, deneysel sonuçlar ile eşit ses yüksekliği konturu arasındaki spektral uyumluluğun yüksek olması, fiziksel ölçümler ile hedef eğri arasındaki spektral farkın azaldığını ortaya koymaktadır.

Başlangıç değerleri ile karşılaştırıldığında, benzetim sonuçlarının korelasyon katsayısı %70,00 artış göstererek 0,4183'ten 0,7111'e yükselmiştir. Deneysel sonuçlarda ise %64,42'lik bir iyileşme sağlanmış ve korelasyon katsayısı 0,4123'ten 0,6779'a çıkmıştır. RMSE değeri ise %34,62 oranında azalarak 7,02'den 4,59'a düşmüştür.

Sonuç olarak, PSO optimizasyonu sürücü baş seviyesinde önemli bir performans artışı sağlamış ve eşit ses yüksekliği konturu ile uyumun artırılmasında katkıda bulunmuştur. Bununla birlikte, GA optimizasyonunda olduğu gibi, araç içi akustik ortamın doğrusal olmayan yapısı, yüzey malzemelerinin frekans bağımlı yansıtma ve soğurma özellikleri

ile araç içi rezonans etkileri nedeniyle, yalnızca belirli bir seviyeye kadar iyileştirme sağlanabilmiştir.

5.4. Genetik Algoritma ve Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritmasının Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

GA ve PSO optimizasyonları sonucunda, her iki yöntem de sürücü baş hizasında eşit ses yüksekliği konturuna yakınsama sağlamış, ancak PSO'nun GA'ya kıyasla daha yüksek doğruluk sunduğu belirlenmiştir. Özellikle, PSO ile optimize edilen filtre parametreleri, sürücü baş hizasında eşit ses yüksekliği konturuyla daha yüksek korelasyon ve daha düşük RMSE değerleri sağlamıştır.

PSO optimizasyonu, GA'ya kıyasla korelasyon katsayısında %3,25 oranında bir iyileşme sağlamış ve RMSE değerini %3,57 oranında azaltmıştır. Deneysel ölçümler açısından ise PSO, GA'ya kıyasla korelasyonu %5,20 artırmış ve RMSE değerini %12,17 oranında düşürmüştür. Bu veriler, PSO'nun sürücü baş hizasında frekans cevabını daha kararlı bir şekilde optimize ettiğini ve eşit ses yüksekliği konturuna daha fazla yakınsama sağladığını göstermektedir.

Karşılıklı bilgi miktarı açısından değerlendirildiğinde, PSO optimizasyonunun GA'ya kıyasla benzetim ve eşit ses yüksekliği konturu arasındaki karşılıklı bilgiyi %5,46, deneysel ve eşit ses yüksekliği konturu arasındaki karşılıklı bilgiyi ise %5,58 oranında artırdığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, benzetim ve deneysel veriler arasındaki karşılıklı bilgi miktarında %2,27 oranında bir artış sağlanmıştır. Bu sonuçlar, PSO'nun modelin bilgi içeriğini daha iyi koruyabildiğini ve optimizasyon sürecinde fiziksel ölçümler ile benzetim arasındaki bilgi kaybını minimize ettiğini göstermektedir.

Spektral uyumluluk analizinde ise PSO'nun GA'ya kıyasla benzetim ve eşit ses yüksekliği konturu arasındaki spektral uyumluluğu %0,78; deneysel ve eşit ses yüksekliği konturu arasındaki uyumluluğu %0,87; benzetim ve deneysel ölçümler arasındaki uyumluluğu ise %1,04 oranında artırdığı hesaplanmıştır. Bu veriler, PSO'nun

spektral yapıyı daha başarılı bir şekilde koruduğunu ve belirli frekans bantlarında daha yüksek optimizasyon başarımı sunduğunu ortaya koymaktadır.

GA'nın, optimizasyon sürecinde rastgele mutasyon ve çaprazlama işlemlerine bağlı olması nedeniyle, bazı çalıştırmalarda yerel minimumlara sıkışabildiği gözlemlenmiştir. Buna karşılık, PSO'nun küresel ve yerel en iyi çözümler arasında daha dengeli bir optimizasyon gerçekleştirmesi, özellikle orta ve yüksek frekans aralıklarında daha tutarlı bir iyileştirme sağlamasına katkıda bulunmuştur.

Sonuç olarak, GA ve PSO'nun performans karşılaştırması, her iki algoritmanın da filtre parametreleri optimizasyonunda etkin çözümler sunduğunu, ancak PSO'nun sürücü baş hizasında daha başarılı sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır. PSO, daha düşük RMSE ve daha yüksek korelasyon değerleri ile araç içi akustik performansın iyileştirilmesi açısından daha etkili bir optimizasyon yöntemi olarak öne çıkmaktadır.

5.5. Gelecek Çalışmalar

Gelecek çalışmalarda, ekolayzır filtre parametreleri optimizasyonunun farklı hoparlör tipleri ve dinleyici pozisyonları için genişletilmesi hedeflenmektedir. Özellikle, yolcu ve arka koltuk pozisyonlarında gerçekleştirilecek ölçümlerle, tüm dinleme bölgelerinde daha homojen bir ses dağılımı sağlanması amaçlanmaktadır.

Buna ek olarak, araç içindeki tüm hoparlörlerin birlikte çalıştığı çoklu hoparlör sistemleri için filtre optimizasyon süreçleri geliştirilecektir. Hoparlörler arası faz ilişkileri ve çapraz konuşma etkileri dikkate alınarak, çoklu hoparlör sistemlerinde daha dengeli bir frekans tepkisi elde edilmesi sağlanacaktır.

Ayrıca, gerçek zamanlı adaptif optimizasyon sistemlerinin geliştirilmesi planlanmaktadır. Sıcaklık, yol koşulları ve iç mekân değişimlerine duyarlı, dinamik ortam koşullarına anlık tepki veren bir optimizasyon algoritması ile araç içi ses deneyiminin daha esnek hale getirilmesi hedeflenmektedir.

Son olarak, araç içi akustik ortamın frekans cevabının daha geniş bir frekans aralığında iyileştirilmesi ve kullanılan modelleme yöntemlerinin doğruluğunun artırılması üzerine çalışmalar yapılacaktır.

Bu çalışmalar, filtre parametrelerinin optimizasyonunun yalnızca sürücü baş hizasında değil, araç içindeki tüm dinleme pozisyonlarında etkili olmasını sağlayarak, araç içi ses sistemlerinin genel performansını artıracaktır.



KAYNAKLAR

- Aksoy, F., & Yılmaz, S. (2020). Araçlarda kabin içi sesleri etkileyen parametrelerin testlerle incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(2), 165–178. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17828.60802>
- Alam, T., Qamar, S., Dixit, A., & Benaida, M. (2020). Genetic algorithm: Reviews, implementations, and applications. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2007.12673>
- Allard, J. F., & Atalla, N. (2009). Acoustic impedance at normal incidence of fluids: Substitution of a fluid layer for a porous layer. In *Propagation of sound in porous media: Modelling sound absorbing materials* (2nd ed., pp. 15–27). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470747339>
- Bae, C., Wahid, N., Chung, Y. Y., Yeh, W.-C., Bergmann, N. W., & Chen, Z. (2014). Effective audio classification algorithm using swarm-based optimization. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 10(1), 151–167.
- Başay, V., Coşkun, O., & Yılmaz, G. (2023). Araç multimedya sisteminde ses kalitesini etkileyen parametrelerin analizi. 9. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi, 29 Nisan - 1 Mayıs, İstanbul, Türkiye. <https://www.muhendislikveteknolojiyonetimikongresi.org/>
- Başay, V., Coşkun, O., & Yılmaz, G. (2024). Optimization of parametric equalizer filters in in-vehicle audio systems with a genetic algorithm. *Applied Sciences*, 14(14), 6283. <https://doi.org/10.3390/app14146283>
- Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (2010). *Random data: Analysis and measurement procedures* (4th ed.). Wiley.
- Enggaard, L. J. M. (2007). *Advanced loudspeaker modelling* (Master's thesis). Aalborg University, Department of Acoustics.
- Everest, F. A., & Pohlmann, K. C. (2009). *Master handbook of acoustics* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Fernandez-Vazquez, A., Rosas-Romero, R., & Rodriguez-Asomoza, J. (2007). A new method for designing flat shelving and peaking filters based on allpass filters. 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2007), 2604–2608.
- Gerges, S. N. Y. (2012). *Vehicle noise, vibration, and sound quality*. SAE International.
- Golla, S. T. (2016). *Acoustical tuning of car audio system* (Master's thesis). Indian Institute of Technology Hyderabad, Department of Mechanical and Aerospace Engineering.
- González Villegas, J. (2020). *Content-driven automatic equalization for audio* (Master's thesis). Tampere University, Tampere, Finland.
- G.R.A.S. Sound & Vibration. (2024, November 23). *146AE – CCP free-field microphone set*. <https://www.grasacoustics.com/products/measurement-microphone-sets/constant-current-power-ccp-2/product/771-146ae>
- Head Acoustics. (2017). *Frequency weighting of airborne sound signals* (Application Note 12/17). Head Acoustics.
- Howard, D. M., & Angus, J. A. S. (2009). *Acoustics and psychoacoustics* (4th ed.). Oxford, UK: Focal Press. <https://doi.org/10.4324/9780080922506>
- International Organization for Standardization. (1997). *ISO 266: Acoustics – Preferred frequencies*. ISO.

- International Organization for Standardization. (2003). ISO 226:2003; Acoustics: Normal equal-loudness-level contours. ISO.
- International Organization for Standardization. (2017). ISO 5128: Acoustics — Measurement of noise inside motor vehicles (4th ed.). ISO.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *In Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks* (Vol. 4, pp. 1942–1948). IEEE.
- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (1999). *Fundamentals of acoustics* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Kuttruff, H. (2009). *Room acoustics* (5th ed.). Spon Press. <https://doi.org/10.1201/9781482266455>
- Li, Z.-O., Li, C.-W., & Chien, Y.-R. (2014). A particle swarm optimization-based support vector machine for digital communication equalizers. *WSEAS Transactions on Signal Processing*, 10(4), 95–105.
- Lyons, R. G. (2011). *Understanding digital signal processing* (3rd ed.). Prentice Hall.
- McCarthy, B. (2012). *Sound systems: Design and optimization: Modern techniques and tools for sound system design and alignment*. Routledge.
- Mei, S., Hu, Y., Xu, H., & Wen, H. (2022). The Class D audio power amplifier: A review. *Electronics*, 11(20), 3244.
- Mishima, Y., & Kajikawa, Y. (2012). Automatic parameter adjustment method for audio equalizer employing interactive genetic algorithm. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 95(11), 2036–2040.
- Mijwil, M. M., & Abttan, R. A. (2020). Applying genetic algorithm to optimization second-order bandpass MGMFB filter. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 28(4), 1413–1425. <https://doi.org/10.47836/pjst.28.4.15>
- NXP Semiconductors. (2020). SAF400x, SAF777x audio user manual (Rev. 01.24). NXP Semiconductors.
- Oppenheim, A. V., Willsky, A. S., & Nawab, S. H. (1996). *Signals and systems* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Ott, R. L., & Longnecker, M. (2016). *An introduction to statistical methods and data analysis*. Cengage Learning.
- Paulraj, M. P., Yaacob, S., & Andrew, A. M. (2010, May 21–23). Vehicle noise comfort level indication: A psychoacoustic approach. *In Proceedings of the 2010 6th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications* (pp. 1–5). IEEE.
- Pepe, G., Gabrielli, L., Squartini, S., & Cattani, L. (2021, January 18–21). Gravitational search algorithm for IIR filter-based audio equalization. *In Proceedings of the 2020 28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)* (pp. 496–500). IEEE.
- Pepe, G., Gabrielli, L., Squartini, S., & Tripodi, C. (2022). Deep optimization of parametric IIR filters for audio equalization. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 30, 1136–1149.
- Pickles, J. O. (2012). *An introduction to the physiology of hearing* (4th ed.). Brill Academic Publishers.
- Pioneer Hill Software LLC. (2024, November 23). SpectraPLUS - Sound & vibration analysis software. <https://www.spectraplus.com>

- Prince, S., & Kumar, K. S. (2019). A novel Nth-order IIR filter-based graphic equalizer optimized through genetic algorithm for computing filter order. *Soft Computing*, 23(8), 2683–2691.
- Prince, S., & Kumar, K. R. S. (2007). A novel nth-order IIR filter-based graphic equalizer optimized through genetic algorithm for computing filter order.
- Ramos, G., & López, J. J. (2006). Filter design method for loudspeaker equalization based on IIR parametric filters. *Journal of the Audio Engineering Society*, 54(12), 1162–117.
- Reed, M. P., Ebert, S. M., Jones, M. L. H., & Park, B. D. (2021). Occupant dynamics during crash avoidance maneuvers. US National Highway Traffic Safety Administration.
- Rimell, A., & Hawksford, M. (1995, February). The application of genetic algorithms to digital audio filters. Paper presented at the 98th Convention of the Audio Engineering Society, Paris, France.
- Rósciszewska, T., Miśkiewicz, A., Rogala, T., Rudzki, T., & Fidecki, T. (2012). Concert hall sound clarity: A comparison of auditory judgments and objective measures. *Archives of Acoustics*, 37(1), 41–46.
- Shakoor, A., Abbas, S., & Abbas, Z. (2019). Optimization of design parameters of low pass filter using genetic algorithm.
- Sutton, T. J., Elliott, S. J., McDonald, A. M., & Saunders, T. J. (1994). Active control of road noise inside vehicles. *Noise Control Engineering Journal*, 42(3), 137–147.
- Taş, F. (2010). Ticari bir taşıtta iç akustik araştırması ve iyileştirme yöntemleri (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Upadhyay, R. K. (2023). Digital signal processing: From theory to practical applications. Mangalayatan University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Aligarh, Uttar Pradesh, India.
- Vairetti, G., De Sena, E., Catrysse, M., Jensen, S. H., Moonen, M., & Van Waterschoot, T. (2018). An automatic design procedure for low-order IIR parametric equalizers. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 26(11), 2001–2012.
- von Tuerckheim, F., & Münch, T. (2014, October 9–12). Automated sound optimization of car audio systems using binaural measurements and parametric IIR filters. In *Audio Engineering Society Convention 137*. Audio Engineering Society.
- Winer, E. (2017). *The audio expert: Everything you need to know about audio*. Routledge.
- Woo, L. (2002). EEE305, EEE801 Part A: Digital signal processing (Chapter 3: Introduction to digital filters). University of Newcastle upon Tyne, School of Electrical, Electronic & Computer Engineering.
- Yi, S., & Zou, S. (2018). Genetic algorithm theory and its application. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 11(1), 32–45.
- Zhang, L., Lim, C. P., Yu, Y., & Jiang, M. (2022). Sound classification using evolving ensemble models and particle swarm optimization. *Applied Soft Computing*, 123, 108978.
- Zwicker, E., & Fastl, H. (2007). *Psychoacoustics: Facts and models* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68888-4>