

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KÜÇÜK MÜZİK HACİMLERİNDE ALÇAK FREKANS SES ALANININ
DALGA BAZLI SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ (FEM) İLE ANALİZİ VE
BİR TASARIM YAKLAŞIMI**

DOKTORA TEZİ

Dilara KELLE

Mimarlık Fakültesi Mimarlık Anabilim Dalı

Yapı Bilimleri Programı

NİSAN 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KÜÇÜK MÜZİK HACİMLERİNDE ALÇAK FREKANS SES ALANININ
DALGA BAZLI SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ (FEM) İLE ANALİZİ VE
BİR TASARIM YAKLAŞIMI**

DOKTORA TEZİ

**Dilara KELLE
(502132413)**

Mimarlık Fakültesi Mimarlık Anabilim Dalı

Yapı Bilimleri Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sevtap YILMAZ

NİSAN 2023

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**THE ANALYSIS OF SMALL MUSIC ROOMS WITH WAVE BASED FINITE
ELEMENT METHOD (FEM) AND A DESIGN APPROACH**



Ph.D. THESIS

**Dilara KELLE
(502132413)**

Department of Architecture

Construction Sciences Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Sevtap YILMAZ

APRIL 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 502132413 numaralı Doktora Öğrencisi Dilara KELLE, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KÜÇÜK HACİMLERİN DALGA BAZLI SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ (FEM) İLE ANALİZİ VE BİR TASARIM YAKLAŞIMI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı: **Prof. Dr. Sevtap YILMAZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. Can KARADOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Neşe YÜĞRÜK AKDAĞ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Alpin KÖKNEL YENER
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Konca ŞAHER
Kadir Has Üniversitesi

Teslim Tarihi : 28.12.2022
Savunma Tarihi : 18.04.2023





Geçmişe, geleceğe ve kendime,



ÖNSÖZ

Bu çalışmada öncelikle ölçüm ve anket çalışmalarını kapsayan saha çalışmaları ile küçük müzik hacimlerine ilişkin kriterler belirlenmiş, fiziksel koşullar ile müzisyen izlenimi ilişkisi tanımlanmıştır. Sonrasında dalga bazlı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak parametrik analiz çalışması yapılmış, belirlenen kriterler kullanılarak bir tasarım yaklaşımı geliştirilmiştir.

Öncelikle yüksek lisans ve doktora çalışmalarım boyunca bilgisi, tecrübesi ve davranışlarıyla bana rehber olan sevgili tez danışmanım Prof. Dr. Sevtap YILMAZ'a verdiği emekler için çok teşekkür ederim. Lisans ve yüksek lisans eğitimimde ders aldığım, akustik ile tanışmama vesile olan ve en önemlisi bu konuda yol almak istememi sağlayan sevgili hocam Dr. Öğr. Üyesi Nurgün TAMER BAYAZIT'a çok teşekkür ederim. Tez izleme jürim Prof. Dr. Neşe YÜGRÜK AKDAĞ'a ve Prof. Dr. Can KARADOĞAN'a bana değerli vakitlerini ayırdıkları ve katkılarıyla çalışmamı her zaman daha öteye taşımamı sağladıkları için minnettarım.

Doktora sürecinin en keyifli kısmı olan müzisyenlerle yaptığım anket çalışmalarım boyunca bana yol gösteren sevgili hocam Prof. Dr. Can KARADOĞAN'a, iletişim ve organizasyon konusunda bana destek olan Laçın ŞAHİN'e, ve en çok da icraları, fikirleri, katkıları ve hoş sohbetleri ile anket sürecini tamamlamamı sağlayan değerli MIAM öğrencileri ve akademisyenlerine teşekkürü bir borç bilirim. Onlar sayesinde akustik teorilerden sıyrılıp, gerçekte ne ile uğraştığımı ve ne amaç ile yola çıktığımı anladım.

Çalıştığım konulardaki Türkçe kaynak sayısı göz önünde bulundurulduğunda, tezimi kendi anadilimde doğru kelimelerle yazabilmemi sağlayan TAKDER'e "Akustik Terimler Sözlüğü" nü literatürümüze kazandırdığı için teşekkür ederim.

Hayata bakışı, çalışma disiplini, azmi ile bana yol gösteren, üzüldüğümde, sevindiğimde yanımda olan sevgili dostlarım ve çalışma arkadaşlarım Ayça ŞENTOP DÜMEN'e ve Hakika SEZGİN'e, teşekkür ederim, iyi ki varsınız.

Beni kızları bilen ve her zaman el üstünde tutan, hep yanımda olduklarını bildiğim Afyon'daki sevgili ailem Nurten KELLE ve Musa KELLE'ye, kardeşim bildiğim Cansu KELLE'ye teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olduğunu hissettiren, hiçbir zaman desteğini ve ilgisini esirgemeyen annem Hülya TEKE'ye, konuşmadan dahi beni anlayabilen, en zor zamanlarımda bile yüzümü güldürebilen kardeşim İlayda ERCİYEŞTEPE'ye, azmi ve disiplini ile bana örnek olan babam İrfan TEKE'ye, bu süreçte ve her zaman yanımda oldukları için teşekkür ederim.

Son olarak, hayata bakışımı şekillendiren, iyi günümde ve kötü günümde elimi tutan, yanımda hep güvende ve emin hissettiğim, yol arkadaşım, eşim Ulaş KELLE ve şu dünyada varlığına şükrettiğim, her gün yeni bir şeyler öğrendiğim canım oğlum Ali KELLE, iyi ki varsınız ve iyi ki hayatımdasınız. Size bakıp, nefes alıp yola devam ettim.

Doktora zorlu ve insanın sınındığı bir süreç. Bu süreci tamamlayabilecek güçte, sabırda ve azimde olduğum, hiçbir problemi zor olarak kabul etmediğim ve basite indirgeyerek her zaman bir çözüm yolu bulabildiğim için bir teşekkür de kendime etmek isterim.

Yapılan çalışmanın, bu konuda yapılacak sonraki çalışmalara rehber olmasını ümit ederim. Her zaman öğrencisi olduğum üniversitem İTÜ ile gurur duydum. Yollarımızın bir daha kesişmesi dileğiyle...

Nisan 2023

Dilara KELLE
(İç Mimar)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xv
SEMBOLLER	xvii
ÇİZELGE LİSTESİ	xix
ŞEKİL LİSTESİ	xxi
SUMMARY	xxxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı	2
1.2 Çalışmanın Kapsamı	3
1.3 Çalışmanın Ana Hattı ve Kullanılan Yöntemler	4
1.4 Literatür Araştırması	8
1.4.1 Küçük müzik hacimleri ile ilgili yapılan çalışmalar	8
1.4.1.1 Küçük müzik hacimlerinin ölçümüne ilişkin yapılan çalışmalar	8
1.4.1.2 Küçük müzik hacimlerinde müzisyen izlenimine ilişkin yapılan çalışmalar	9
1.4.1.3 Benzetim yöntemine (Dalga Bazlı Sonlu Elemanlar Yöntemi) ilişkin yapılan çalışmalar	15
1.4.1.4 Küçük müzik hacimlerinin tasarım yöntemine ilişkin yapılan çalışmalar	18
1.4.2 Çalışmada kullanılan standartlar	25
1.4.2.1 ISO 23591:2021 Prova odaları ve mekanları için akustik kalite ölçütleri (Acoustic quality criteria for music rehearsal rooms and spaces) ...	25
1.4.2.2 TS EN ISO 3382-1:2010 Akustik- Odaların akustik parametrelerinin ölçülmesi -Bölüm 1: Gösteri mekanları (ISO 3382-1-2009)	34
1.4.2.3 TS EN ISO 3382-2:2009 Akustik- Odaların akustik parametrelerinin ölçülmesi- Bölüm 2: Sıradan odalarda reverberasyon süresi (ISO 3382-2-2008)	35
1.4.2.4 TS EN ISO 16283-1:2014 Akustik- Yapıların ve yapı elemanlarının ses yalıtımı için sahada yapılacak ölçümler- Bölüm 1: Hava ile yayılan sesin yalıtımı (ISO 16283-1:2014)	35
2. KÜÇÜK HACİMLERDE SES ALANI OLUŞUMU VE AKUSTİK DEĞERLENDİRME PARAMETRELERİ	37
2.1 Kapalı Hacimlerde Ses Alanı Oluşumu	38
2.1.1 Durağan dalga ve mod oluşumu	40
2.1.2 Sesin yayımı ve ses kaynağının dalga teorisine göre tanımlanması (Nokta kaynaklar)	44
2.1.3 Sınır koşullarının dalga teorisine göre tanımlanması	45
2.2 Küçük Müzik Hacimlerinde Ses Alanı Değerlendirme Akustik Parametreleri	49
2.2.1 Nesnel değerlendirme akustik parametreleri	50

2.2.1.1 Reverberasyon süresi (Reverberation Time, T_{60}).....	50
2.2.1.2 Erken düşme süresi (Early Decay Time, EDT).....	53
2.2.1.3 Netlik (Clarity, C_{80}) ve merkez zaman (Center Time, TS)	53
2.2.1.4 Ses güçlülüğü (Strength, G)	54
2.2.1.5 İlk gecikme aralığı (Initial Time Delay Gap, ITDG)	56
2.2.1.6 Yankı ölçütü ve renklenme	57
2.2.1.7 Mod dağılımı ve Q-faktörü	59
2.2.1.8 Modal düşme süresi (Modal Decay Time).....	62
2.2.2 Küçük hacimlerde öznel değerlendirme parametreleri	63
2.2.2.1 Yansımaların algılanabilirliği	66
2.2.2.2 Reverberans ve netlik.....	68
2.2.2.3 Uzamsal algı ve varlık.....	69
2.3 Küçük Hacimlerde Ses Alanını Etkileyen Fiziksel Parametreler.....	69
2.3.1 Oda hacmi ve boyutları	69
2.3.2 Enstrümanların karakteristik özellikleri.....	70
2.3.2.1 Telli enstrümanlar	74
2.3.2.2 Ahşap üflemlerli çalgılar	76
2.3.2.3 Bakır üflemlerli çalgılar.....	79
2.3.2.4 Vokal	82
2.3.3 Küçük hacimlerde akustik düzenleme sistemleri ve ses alanına etkileri ..	85
2.3.3.1 Sesin sönümlenmesi ve sönümleyici sistemler	86
2.3.3.2 Sesin saçılması ve saçıcı sistemler	88
3. SES ALANLARININ ÖLÇÜM İLE MEVCUT DURUMLARININ ANALİZİ	91
3.1 Metodoloji ve Kapsam	92
3.2 Ölçüm Sonuçlarının Nesnel Parametreler ile Değerlendirilmesi	97
3.2.1 Birikimli izgesel düşüş (Cumulative Spectral Decay, CSD)	97
3.2.2 Erken düşme süresi (Early Decay Time, EDT) ölçüm sonuçları.....	101
3.2.3 Reverberasyon süresi (Reverberation Time, T_{30}) ölçüm sonuçları.....	102
3.2.4 Netlik indeksi (Clarity index, $C_{20}-C_{50}-C_{80}$) ve merkez zaman (Center time, Ts) ölçüm sonuçları.....	103
3.2.5 Destek _{erken} (Early Support, ST_{early}) ölçüm sonuçları	106
3.2.6 Bas oranı (Bass Ratio, BR) ölçüm sonuçları.....	106
3.2.7 İlk gecikme aralığı (Initial Time Delay Gap, ITDG) ölçüm sonuçları ...	107
3.2.8 Güçlülük (Sound Strength, G) hesaplama sonuçları	108
3.2.9 Kalite faktörü (Q-Faktör) ve modal düşme süresi ölçüm sonuçları.....	109
3.2.10 Köşe ölçümlerinin nesnel değerlendirmeye etkisi	111
3.3 Tartışma ve Sonuç	112
4. KÜÇÜK HACİMLERDE MÜZİSYENLERİN ÖZNEL TERCİHLERİ VE ENSTRÜMAN ÖZELLİKLERİ İLE İLİŞKİSİ.....	115
4.1 Metodoloji ve Kapsam	116
4.1.1 Anket yönteminin belirlenmesi	116
4.1.2 Örneklemenin belirlenmesi.....	117
4.1.3 Anket formunun hazırlanması.....	118
4.1.4 Verilerin analizinde kullanılan yöntemler.....	120
4.1.4.1 Nicel analiz yöntemleri	121
4.1.4.2 Nitel analiz yöntemleri.....	122
4.2 İstatistikî Analiz Sonuçları	122
4.2.1 Nicel analiz sonuçları.....	122
4.2.2 Nitel analiz sonuçları	126

4.3 Nesnel Akustik Parametreler ve Öznel Değerlendirme İlişkisi.....	132
4.4 Tartışma ve Sonuçlar.....	133
5. DALGA BAZLI SONLU ELEMANLAR SİMÜLASYON YÖNTEMİ KULLANILARAK KÜÇÜK HACİMLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TASARIMINA YÖNELİK YAKLAŞIM ÖNERİSİ	137
5.1 Metodoloji ve Kapsam	138
5.1.1 Analizlerde kullanılan nesnel değerlendirme parametreleri ve ölçütler .	138
5.1.2 Kapsam.....	141
5.1.3 Parametrik analiz çalışması.....	144
5.2 Benzetim Ortamının Tanımlanması ve Hesap Yöntemleri	150
5.2.1 Sınır koşullarının tanımlanması	153
5.2.2 Kaynak ögesinin tanımlanması	157
5.2.3 Ayırıklaştırma	160
5.3 Benzetim ve Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması	161
5.4 Anket ve Ölçüm Çalışmalarında Kullanılan Hacimlerin Modal Analizi	162
5.4.1 Hacimlerin Schroeder frekansı (f_{kritik}).....	163
5.4.2 Modal yoğunluk ve mod aralıkları.....	163
5.4.3 Hacimlerin frekans tepkisi ve mod yoğunluğu ilişkisi.....	164
5.5 Parametrik Analiz Çalışması ve Sonuçları.....	171
5.5.1 Çalışma 1: Geometrinin ses alanına etkisi	171
5.5.2 Çalışma 2: Kaynak ve alıcı konumunun ses alanına etkisi	173
5.5.3 Çalışma 3: Yayım karakterinin ses alanına etkisi	173
5.5.4 Çalışma 4: Kaynak ses gücünün ses alanına etkisi	176
5.5.5 Çalışma 5: Oda sönümlenmesinin ses alanına etkisi	176
5.5.6 Çalışma 6: Yüzey form ve empedansının ses alanına etkisi	181
5.6 Tartışma ve Sonuçlar.....	187
6. SONUÇLAR	193
6.1 Ölçüm Çalışmasına İlişkin Bulgular	194
6.2 Anket Çalışmasına İlişkin Bulgular	196
6.3 Benzetim Çalışmasına İlişkin Bulgular.....	197
6.4 Tasarım Yaklaşımına İlişkin Bulgular	198
6.5 Çalışmanın İleride Yapılacak Çalışmalarda Kullanılabilirliği	200
KAYNAKLAR	203
EKLER	213
ÖZGEÇMİŞ.....	225



KISALTMALAR

ASW	: Algısal Ses Kaynağı Genişliği (Apparent Source Width)
BR	: Bas Oranı (Bass Ratio)
C	: Netlik (Clarity)
CPS	: Birim Saniyedeki Devir (Cycle per Second)
CPU	: Merkezi İşlem Birimi (Central Processing Unit)
D	: Belirginlik (Definition)
dB	: Desibel
DRR	: Direkt Reverberant Düzeyi Oranı (Direct to Reverberant Level Ratio)
EC	: Yankı Ölçütü (Echo Criteria)
EDT	: Erken Düşme Süresi (Early Decay Time)
FDFEM	: Frekans Tanım Alanında Sonlu Elemanlar Yöntemi
FEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
F_s	: Schroeder Frekansı
G	: Ses Güçlülüğü (Sound Strength)
Gİ	: Genel İzlenim (Overall Impression)
HRTF	: Kafa Aktarım Fonksiyonu (Head Related Transfer Function)
IACC	: Kulaklar Arası Çapraz İlinti (Interaural Cross Correlation)
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu (International Organization for Standardization)
ITDG	: İlk Gecikme Aralığı (Initial Time Delay Gap)
JND	: Fark Eşiği, Ancak Fark Edilebilir Fark (Just Noticeable Difference)
LEV	: Dinleyicinin Hacimce Kuşatılmışlığı (Listener Envelopment)
LF	: Erken Yanal Enerji Oranı (Lateral Fraction)
LG, GLL	: Gecikmiş Yanal Ses Güçlülüğü (Late Lateral Sound Strength)
Lp(r)	: r Mesafesinde Ses Basınç Düzeyi
Lw	: Ses Gücü Düzeyi
MSV	: Uzamsal Varyansın Ortalaması (Mean of Spatial Variance)
MT	: Modal Düşme Süresi (Modal Decay Time)

Q	: Kalite Faktörü (Quality Factor)
QRD	: Quadratic Residue Diffuser
SI	: Uzamsallık (Spatial Impression)
SNR	: Sinyal-Gürültü Oranı
SPL	: Ses Basınç Düzeyi (Sound Pressure Level)
ST_{erken}	: Erken Destek (Early Support)
ST_{geç}	: Geç Destek (Late Support)
T, RT	: Reverberasyon Süresi (Reverberation Time)
TDFEM	: Zaman Tanım Alanında Sonlu Elemanlar Yöntemi
TR	: Tiz Oranı (Treble Ratio)
TS	: Merkez Zaman (Center Time)
VSA	: Uzamsal Ortalamanın Varyansı (Variance of Spatial Average)

SEMBOLLER

Q	: Yönelme çarpanı
α	: Ses yutma katsayısı
R	: Ses yansıtma katsayısı
c	: Sesin hızı (m/s)
δ	: Sönümleme koşulu
B_w	: Modal bant genişliği
p	: Ses basıncı (Pa)
ω	: Açısal frekans (rad/s)
k	: Dalga sayısı
ρ	: Ortam yoğunluğu
$L_{p,s}$	: S alıcı noktasındaki ses basınç düzeyi (dB)
$L_{p,ref}$	: En iyi uyum eğrisi değeri (best fit line)
Z_{re}	: Özgül akustik gerçel kısmı
Z_{im}	: Özgül akustik sanal kısmı
i	: $\sqrt{-1}$
$\Delta\tau$	: Yansıma gecikme süresi (ms)
Z_n	: Normalize empedans
Z_s	: Sınır empedansı
L	: Odanın uzunluğu (m)
W	: Odanın eni (m)
H	: Odanın yüksekliği (m)
$p, q, \text{ ve } r$	: Tam sayılar 0, 1, 2, 3...
r	: Kaynağa olan mesafe (m)
Q	: Hacimsel hız (m ³ /s)
V	: Hacim (m ³)
t	: Zaman (s)
χ	: Faz açısı (°)
f_c	: Mod frekansı (Hz)



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Prova odaları ve röprodüksiyon odaları kapsamında yapılan özenel değerlendirme çalışmalarına ait çalışmanın amacı, araştırma yöntemi, analiz yöntemi ve katılımcı sayısı.....	13
Çizelge 1.2 : Konser salonları kapsamında yapılan özenel değerlendirme çalışmalarına ait çalışmanın amacı, araştırma yöntemi, analiz yöntemi ve katılımcı sayısı	14
Çizelge 1.3 : Dağınıklığın değerlendirilmesine ilişkin araştırma ve standartlar (Zhang ve Lee 2021)	22
Çizelge 1.4 : Alçak sesli müzik icrası için tasarlanan prova odalarının özellikleri (International Standard Organization 2021)	26
Çizelge 1.5 : Yüksek sesli müzik icrası için tasarlanan prova odalarının özellikleri (International Standard Organization 2021)	27
Çizelge 1.6 : Yükseltilmiş sesli müzik icrası için tasarlanan prova odalarının özellikleri (International Standard Organization 2021)	28
Çizelge 1.7 : Bağlantıda kullanılacak a ve b sabitlerinin, net hacim fonksiyonu olarak Reverberasyon süresine göre değerleri (International Standard Organization 2021)	29
Çizelge 1.8 : Farklı enstrümanların ses gücü düzeyi ve ses gücü bilgileri (International Standard Organization 2021)	32
Çizelge 2.1 : Enstrüman bazında talep edilen reverberasyon süreleri (Kleiner 2014)	52
Çizelge 2.2 : Dietsch ve Kraak yankı ölçütü (Kuttruff 2009).....	58
Çizelge 2.3 : En çok kullanılan hacimlerin özenel değerlendirmelerinde en çok kullanılan terimler ve tanımları (Long 2006)	64
Çizelge 3.1 : Odaların 1/1 Oktav bantta SNR değerleri	97
Çizelge 4.1 : Ankette kullanılan enstrümanların sınıflandırılması ve katılımcı dağılımı	118
Çizelge 4.2 : Stüdyo odasında özenel değerlendirmeler arası Spearman sıra korelasyonu (*p<0.05, **p<0.01). Gİ: Genel İzlenim	124
Çizelge 4.3 : Prova odasında özenel değerlendirmeler arası Spearman sıra korelasyonu (*p<0.05, **p<0.01). Gİ: Genel İzlenim	125
Çizelge 4.4 : Stüdyo odasındaki katılımcıların sözel yorumları ve yorumların kodlanması	127
Çizelge 4.5 : Kodlanan atıflar ve grup bazında kullanım sıklığı (n%)	128
Çizelge 4.6 : Prova odasındaki katılımcıların sözel yorumları ve yorumların kodlanması	129
Çizelge 4.7 : Kodlanan atıflar ve grup bazında kullanım sıklığı (n%)	130
Çizelge 4.8 : Katılımcıların hacmin performans etkisine ilişkin yorumları	131

Çizelge 5.1 : Yüzey ve kaynak özelliklerine bağlı parametrik analiz çalışması ve COMSOL benzetiminde tanımlanan değişkenler	146
Çizelge 5.2 : Benzetimde kabul edilen parametreler ve değerleri	150
Çizelge 5.3 : Stüdyo odasında kullanılan ses yutucu sistemlerin 1/1 oktav bantta empedans ve ses yutma katsayısı bilgisi.....	156
Çizelge 5.4 : Ölçüm ve FEM sonuçlarının karşılaştırılmasında EDT ve T_{20} parametrelerine ait mutlak hata ve hata yüzdesi değerleri.....	162
Çizelge 5.5 : Stüdyo odası ve prova odasında 1/3 oktav bantta mod dağılımı.....	164
Çizelge 5.6 : Sönümlü oda ve sönümsüz odanın nesnel parametreler ile karşılaştırılması.....	177
Çizelge 5.7 : Farklı yüzey tiplerinin MSV, VSA ve düşme süresi parametrelerinin standart sapma değerlerinin karşılaştırılması.....	185
Çizelge A.1 : MIAM Stüdyo odası L1 ve L2 kaynak noktaları için alıcı noktaları 1/1 oktav bantta ölçüm sonuçları	215
Çizelge A.2 : MIAM Stüdyo odası L1 ve L2 kaynak noktaları için alıcı noktaları 1/1 oktav bantta ölçüm sonuçları	216
Çizelge A.3 : Prova odası L1 ve L2 kaynak noktaları için alıcı noktaları 1/1 oktav bantta ölçüm sonuçları	217
Çizelge A.4 : Prova odası L1 ve L2 kaynak noktaları için alıcı noktaları 1/1 oktav bantta ölçüm sonuçları	218
Çizelge A.5 : Stüdyo odası SNR ölçüm sonuçları	219
Çizelge A.6 : Prova odası SNR ölçüm sonuçları	219
Çizelge B.1 : Anket formu - sayfa 1	221
Çizelge B.2 : Anket formu - sayfa 2	222
Çizelge C.1 : Referans hacimde 63 Hz 1/1 oktav bandı için MSV ve VSA ölçütlerinin hesaplanması.....	224

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	: Çalışmanın özet akış şeması.....	7
Şekil 1.2	: Sonlu elemanlar (Finite Element, FE) ve geometrik akustik (Geometrical Acoustic, GA) yöntemlerinde model tanım farklılıkları (Aretz ve Vorländer 2012).....	17
Şekil 1.3	: Modal bölge ve dağınık ses alanı bölgesi ayrımı (Kuttruff 2009)	19
Şekil 1.4	: En iyi uyum eğrisinin optimizasyon işleminde kullanılması (Cox vd. 2004)	23
Şekil 1.5	: Odanın frekans tepkisi a) akustik düzenleme olmadan, b) ortalama bir akustik düzenleme ile, c) optimize edilmiş akustik düzenleme (R. Bistafa vd. 2012).....	24
Şekil 1.6	: Farklı müzik tipleri için net hacme göre olması gereken reverberasyon süresi aralığı (T_{orta}) (International Standard Organization 2021)	30
Şekil 1.7	: Alçak sesli müzik için frekansa bağlı reverberasyon süresi değişimi tolerans aralığı (p : T_{orta} tolerans yüzdesi-% ve f oktav bandın merkez frekansı-Hz) Kesikli eğri ile belirtilen değerler resital odaları için tanımlanmıştır (International Standard Organization 2021).	30
Şekil 1.8	: Yüksek sesli müzik için frekansa bağlı reverberasyon süresi değişimi tolerans aralığı (p : T_{orta} tolerans yüzdesi-% ve f oktav bandın merkez frekansı-Hz) Kesikli eğri ile belirtilen değerler resital odaları için tanımlanmıştır (International Standard Organization 2021).	30
Şekil 1.9	: Hacim ve reverberasyon süresinin bir fonksiyonu olarak ses güçlülüğünün hesaplanması (International Standard Organization 2021).....	31
Şekil 1.10	: İdeal boyut oranı için standartta belirtilen regresyon eğrisi (International Standard Organization 2021).....	33
Şekil 1.11	: Köşe mikrofon konumu gösterimi. d mesafesi 0,3 ile 0,4 m arasında olmalıdır (TS EN ISO 16283-1 2014).	36
Şekil 2.1	: Hacimlerde Schroeder frekans bölgelerine göre sesin davranışı (Davis vd. 2013).....	38
Şekil 2.2	: Uyarı şeklindeki ses dalgasının zamana bağlı geometrik ilerleyişi (Zaman ilerleyişi soldan sağa verilmiştir.) (Heutschi 2016).....	39
Şekil 2.3	: Uyarı şeklindeki ses dalgasının düzgün bir yüzeyden yansımaları (Heutschi 2016).....	40
Şekil 2.4	: Uyarı şeklindeki ses dalgasının saçılması (Heutschi 2016)	40
Şekil 2.5	: Uyarı şeklindeki ses dalgasının kenarda kırılması (Heutschi 2016)	40
Şekil 2.6	: S noktasından çıkan sesin tek bir duvar yüzeyinden yansımaları ve sanal I kaynağından gelen bir ses gibi düşünülmesi (Everest ve Pohlmann 2009)	41
Şekil 2.7	: S noktasındaki ses basıncı sanal imgelerin ve diğer yansıma noktalarından gelen sonsuz yansımaların toplamından oluşmaktadır (Everest ve Pohlmann 2009).....	41

Şekil 2.8 : Kapalı hacimlerde a) eksenel, b) teğet ve c) eğik modların ışınsal yolla görselleştirilmesi (Newell 2008).....	42
Şekil 2.9 : a) teğetsel modun basınç değişimi eş eğri gösterimi b) eğik modun yüzey basınç dağılımı gösterimi (Newell 2008).....	43
Şekil 2.10 : Teorik olarak yayım yapan a) monopol, b) dipol, c) quadrupol ses kaynaklarının ses basınç düzeyi yönelme örüntüleri (Russell vd. 1998).....	44
Şekil 2.11 : a) Düzlemsel dalga b) küresel dalga yansıma diyagramları (Kuttruff 2009).....	48
Şekil 2.12 : Çeşitli malzeme modellerinin sanal ve gerçek normalize empedans verileri (Mondet vd. 2017).....	49
Şekil 2.13 : Çeşitli malzeme modellerinin sanal ve gerçek normalize empedans verileri (Mondet vd. 2017)	49
Şekil 2.14 : Erken düşme süresi ve reverberasyon süresinin azalım eğrisine bağlı elde edilmesi (Barron 2010)	51
Şekil 2.15 : Sesin algılanmasında eş yükseklik düzeyi eğrileri (Meyer 2009).....	55
Şekil 2.16 : 70-200-1000 Hz'de algılanır farklılık gösterimi (Backus, 1969).....	56
Şekil 2.17 : ITDG süresinin gösterimi (Davis vd. 2013).....	56
Şekil 2.18 : Sinyal tepkisinin ilk 400 ms (en üstteki grafik) kısmı, oluşum fonksiyonu $t\tau$ (orta grafik) ve mutlak farkı $\Delta t_s(\tau)\Delta\tau$, $\Delta\tau =5ms$ (alt grafik) vermektedir (Kuttruff 2009).	59
Şekil 2.19 : Frekans cevabının Q -faktörü üzerinden değerlendirilmesi (Noxon 1986).....	60
Şekil 2.20 : Q faktörünün hesaplanması (Fazenda ve Wankling 2008)	60
Şekil 2.21 : İki komşu mod arasındaki optimum frekans aralığı (Fazenda ve Wankling 2008)	61
Şekil 2.22 : Modal düşme süreleri uyarım tipine bağlı algı eşiği bölgeleri (B. Fazenda vd. 2015).....	63
Şekil 2.23 : Öznel değerlendirmelerin mekân ve kaynak ilişkisi sıralaması (Rumsey 2002)	65
Şekil 2.24 : Öznel değerlendirmelerde ana kategoriler ve ilişkili oldukları alt kategoriler verilmiştir (Kaplanis vd. 2014).....	66
Şekil 2.25 : Direkt sese göre gelen yansımanın süresine ve düzeyine bağlı oluşturduğu öznel etki değerlendirmesi (Barron 1971)	68
Şekil 2.26 : İdeal boyut oranı için standartta belirtilen regresyon eğrisi (International Standard Organization 2021).....	70
Şekil 2.27 : Orkestra enstrümanlarının dinamik aralığına bağlı olarak ses gücü düzeyleri (Meyer 2009)	71
Şekil 2.28 : Piyano notaları ve müzik ölçeği ile ilişkilendirilmiş enstrümanların frekans spektrumları (Everest ve Pohlmann 2009).....	72
Şekil 2.29 : Çellonun frekansa bağlı yönelme karakteri (Meyer 1971).....	73
Şekil 2.30 : Enstrümanların monopol yayım yaptığı frekans aralıkları (Ziemer 2014)	74
Şekil 2.31 : Kemanın temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967)	74
Şekil 2.32 : Kemanın plan ve kesit düzleminde çeşitli frekanslarda yönelme özelliği (Pätynen ve Lokki 2010).....	74
Şekil 2.33 : Kontrbasın temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967)	75
Şekil 2.34 : Kontrbasın plan ve kesit düzleminde çeşitli frekanslarda yönelme özelliği (Pätynen ve Lokki 2010).....	75
Şekil 2.35 : Piyanonun temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967).....	76

Şekil 2.36 : Gitarın temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967).....	76
Şekil 2.37 : Flütün plan ve kesit düzleminde çeşitli frekanslarda yönelme özelliği (Pätynen ve Lokki 2010).....	77
Şekil 2.38 : Obuanın temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967)	78
Şekil 2.39 : Obuanın plan ve kesit düzleminde çeşitli frekanslarda yönelme özelliği (Pätynen ve Lokki 2010).....	78
Şekil 2.40 : Klarinetin plan ve kesit düzleminde çeşitli frekanslarda yönelme özelliği (Pätynen ve Lokki 2010).....	78
Şekil 2.41 : Fagotun temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967).....	79
Şekil 2.42 : Fagotun plan ve kesit düzleminde çeşitli frekanslarda yönelme özelliği (Pätynen ve Lokki 2010).....	79
Şekil 2.43 : Saksafonun temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967)	80
Şekil 2.44 : Trompetin temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967)	80
Şekil 2.45 : Trompetin plan ve kesit düzleminde çeşitli frekanslarda yönelme özelliği	81
Şekil 2.46 : Tubanın temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967).....	81
Şekil 2.47 : Tubanın plan ve kesit düzleminde çeşitli frekanslarda yönelme özelliği (Pätynen ve Lokki 2010).....	81
Şekil 2.48 : Kornonun plan ve kesit düzleminde çeşitli frekanslarda yönelme özelliği (Pätynen ve Lokki 2010).....	82
Şekil 2.49 : İnsan sesinin temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967)	83
Şekil 2.50 : Enstrümanların yükselme – durgun hal – alçalma karakterleri verilmiştir. A: tezeneli (çekmeli) çalgılar, B: vurmali telli çalgılar, C: yayli telli çalgılar, D: org, E: üflemeli çalgılar, F: perküsyon çalgıları, G: davul, H: insan sesi (sesli harf) (Olsson 1967).	83
Şekil 2.51 : Yüzey sistemlerinin uzam-zaman etkileşimi (Kuttruff 2009).....	86
Şekil 2.52 : Gözenekli malzemenin duvar yüzeyinde uygulanışı a) arkasında hava boşluğu olmadan b) arkasında hava boşluğu ile (Kuttruff, 1973)	86
Şekil 2.53 : Tipik a) membran tip b) Helmholtz rezonatörü (Cox ve D’Antonio 2004)	87
Şekil 3.1 : Ölçüm düzeneğini oluşturan ekipmanlar (Bayazit 2006).....	93
Şekil 3.2 : DIRAC yazılımı ölçüm arayüzü.....	94
Şekil 3.3 : Ölçüm sırasında çekilen fotoğraflar a) stüdyo odası b) prova odası	95
Şekil 3.4 : Stüdyo odası planı ve ölçüm sırasında alıcı ve kaynak noktalarının yerleşimi.....	96
Şekil 3.5 : Prova odası planı ve ölçüm sırasında alıcı ve kaynak noktalarının yerleşimi.....	96
Şekil 3.6 : Stüdyo odası ölçümünde hoparlör L1 konumunda iken 6 alıcı noktasında zamana bağlı ve frekansa bağlı ses basınç düzeyi değişimi a) şelale modeli b) spektogram gösterimi.....	99
Şekil 3.7 : Prova odası ölçümünde hoparlör L1 konumunda iken 4 orta alıcı 2 köşe alıcı noktasında zamana bağlı ve frekansa bağlı ses basınç düzeyi değişimi a) şelale modeli b) spektogram gösterimi	100
Şekil 3.8 : Stüdyo odası ve prova odası EDT ölçümü karşılaştırması.....	102
Şekil 3.9 : Stüdyo odası ve prova odası T ₃₀ ölçümü karşılaştırması	103
Şekil 3.10 : Stüdyo odası ve prova odası netlik indeksi (C ₂₀) değerleri.....	104
Şekil 3.11 : Stüdyo odası ve prova odası netlik indeksi (C ₅₀) değerleri.....	104
Şekil 3.12 : Stüdyo odası ve prova odası netlik indeksi (C ₈₀) değerleri.....	105
Şekil 3.13 : Stüdyo odası ve prova odası merkez zaman (TS) değerleri	105
Şekil 3.14 : Stüdyo odası ve prova odası destek (ST _{erken}) ölçümü karşılaştırması .	106

Şekil 3.15 :	a) Stüdyo odasında L1 kaynak durumu için M6 alıcı konumunda ve b) prova odasında L1 kaynak durumu için M2 alıcı konumunda enerji-zaman eğrileri	108
Şekil 3.16 :	Reverberasyon süresine ve hacme bağlı olarak değişen ses güçlülüğü (G) değerleri	109
Şekil 3.17 :	Her iki hacimde frekans tepkisi ve frekans tepkisinden elde edilen Q- faktörü karşılaştırması	110
Şekil 3.18 :	Her iki hacimde ölçüm sonuçlarından elde edilen modal düşme sürelerinin karşılaştırılması (Fazenda'nın çalışması baz alınarak çizilmiştir.).....	111
Şekil 3.19 :	Prova odasına ait EDT ortalama ve standart sapma değerinin, ortalaması alınan alıcı noktalarının konumuna göre 1/1 oktav bantta değişimi ...	112
Şekil 4.1 :	Öznel değerlendirme ölçeği (Barron 1971).....	119
Şekil 4.2 :	Her iki odada öznel parametrelerin ortalama değerleri	123
Şekil 4.3 :	Kodlanan atıflar ve grup bazında kullanım sıklığı (n%)	131
Şekil 5.1 :	Küçük hacimlerin değerlendirilmesi ve tasarımına yönelik önerilen modelin akış şeması	141
Şekil 5.2 :	Stüdyo odasının a) plan ve b) kesiti	143
Şekil 5.4 :	a) Yutucu sistem (mevcut durum) b) yansıtıcı sistem c) kama d) QRD e) yarı silindir f) hibrit (kama+panel tip yutucu)	147
Şekil 5.5 :	Kenar açılara bağlı olarak iki üçgenin merkezinden oluşan saçılma düzeyi a)50° b)80° c)85° (Cox ve D'Antonio 2004).....	148
Şekil 5.6 :	QRD sistemin tasarım frekansına ve kuyu sayısına (n=5) göre boyutlarının hesaplanması (Collison 2010).....	149
Şekil 5.7 :	Yarı silindirik (1m genişlik) saçıcı tipine ait a) saçılan ses basınç düzeyi b) zaman tepkisi c) frekans tepkisi (Cox ve D'Antonio 2004).....	149
Şekil 5.8 :	Frekans tanım alanı ve zaman tanım alanı şematik gösterimi (Meyer 2009)	151
Şekil 5.9 :	Düzgün bir dörtgende merkeze yerleştirilen Gauss sinyalinin ses ortamında oluşturduğu dar zaman aralıklarında ses basıncı değişimi	153
Şekil 5.10 :	Parke kaplamalı yükseltilmiş döşeme sistemin a) ses yutma katsayısı b) ses yansıtma katsayısı c) kompleks empedans gerçel kısmı d) kompleks empedans sanal kısmı	155
Şekil 5.11 :	Kullanılan yutucu sistemlerin katman detayları a) duvar yutucusu 1 b) duvar yutucusu 2 c) duvar yutucusu 3 d) tavan yutucusu.....	155
Şekil 5.12 :	Hibrit yüzey sisteminin a) ses yutma katsayısı b) ses yansıtma katsayısı c) kompleks empedans gerçel kısmı d) kompleks empedans sanal kısmı	157
Şekil 5.13 :	TD-FEM analizinde kullanılan modüle edilmiş Gauss sinyalinin a) dalga formu b) frekans spektrumu.....	158
Şekil 5.14 :	Gauss sinyalinin zamana bağlı ilerleyişi ve ses basıncı değişimi (Pa) plan düzleminde iki boyutlu gösterimi (Papadakis 2017)	159
Şekil 5.15 :	Gauss sinyalinin zamana bağlı ilerleyişi ve eş yüzey ile ses basıncı değişiminin üç boyutlu gösterimi (Papadakis 2017).....	159
Şekil 5.16 :	Benzetim çalışmasında kullanılan sayısal model a) stüdyo odası b) prova odası	161
Şekil 5.17 :	Ölçüm ve FEM sonuçlarının karşılaştırılmasında EDT ve T ₂₀ parametrelerine ait mutlak hata ve hata yüzdesi değerleri.....	162
Şekil 5.18 :	Hacimlerin mod dağılım analizi a) Stüdyo odası b) Prova odası	164

Şekil 5.19 : 98 Hz’de her bir hacimdeki ses basınç düzeyi dağılımı (SPL, dB) a) Stüdyo odası b) Prova odası.....	165
Şekil 5.20 : Stüdyo odasında rijit sınır koşulu ile kaynak L1 konumundayken M1 M3 ve M6 alıcı konumlarında elde edilen frekans tepkisinin mod dağılımı ile karşılaştırması.....	166
Şekil 5.21 : Stüdyo odası mod analizi sonucu elde edilen ses basıncı (Pa) dağılımı eş yüzey gösterimi.....	167
Şekil 5.22 : L1 kaynak konumunda iken 52 Hz, 102 Hz, 135 Hz ve 191 Hz’de ses basıncı (Pa) dağılımı ve alıcı noktalarının konumu	168
Şekil 5.23 : Prova odasında rijit sınır koşulu ile kaynak L1 konumundayken M2, M3 ve M4 alıcı konumlarında elde edilen frekans tepkisinin mod dağılımı ile karşılaştırması	169
Şekil 5.24 : Prova odası modal analiz sonucu elde edilen ses basıncı (Pa) dağılımının eş yüzey gösterimi	170
Şekil 5.25 : L1 kaynak konumunda iken 64 Hz, 102 Hz, 135 Hz ve 191 Hz ‘de ses basıncı (Pa) dağılımı ve alıcı noktalarının konumu	171
Şekil 5.26 : Stüdyo odası düzenli biçim ve düzensiz biçim plan şemalarına göre 1/3 oktav bantta mod sayısı dağılımı	172
Şekil 5.27 : Düzgün ve düzgün olmayan geometrilerin aynı frekanslarda ses basıncı (Pa) dağılımı eş yüzey gösterimi	172
Şekil 5.28 : Kaynak noktası L1 konumunda iken alıcı noktaları M6 ve M köşe ’ye ait frekans tepkisi karşılaştırması.....	173
Şekil 5.29 : L1 kaynak konumu için monopol ve dipol kaynak tipine göre M1 alıcı noktasında frekans tepkisi karşılaştırması	174
Şekil 5.30 : L1 kaynak konumu için monopol ve dipol kaynak tipine göre M6 alıcı noktasında frekans tepkisi karşılaştırması	175
Şekil 5.31 : 76 Hz ve 173 Hz’de oluşan mod frekanslarında basınç dağılımı (Pa) ve yayım özelliğine bağlı değişen SPL (dB) dağılımı.....	175
Şekil 5.32 : L1 kaynak konumunda ve M6 alıcı noktasında ses gücüne bağlı değişen frekans tepkisi	176
Şekil 5.33 : 125 Hz’de L1 kaynak konumunda zamana bağlı ses basıncı (Pa) değişimi (Izgara sistem yüksekliği 1.2 m alınmıştır)	177
Şekil 5.34 : Stüdyo odasında sönümlenmenin etkisiyle değişen MSV ve VSA ölçütleri	178
Şekil 5.35 : Stüdyo odası kaynak konumu L1 ve alıcı noktası M6 için frekans tepkisi karşılaştırması	179
Şekil 5.36 : Stüdyo odası kaynak konumu L1 ve alıcı noktası M6 için Q değeri karşılaştırması, Q1- sönümsüz (Q1) ve (Q2) sönümlü	180
Şekil 5.37 : Sönümsüz oda ve mevcut durum L1 kaynak konumu ve M6 alıcı konumu için Modal Düşme Süresi (s) karşılaştırması	180
Şekil 5.38 : 125 Hz’de L1 kaynak konumu ile M6 alıcı konumunda yansımaların bağlı yansıma düzeyine ve geliş zamanına göre algılanabilirliği (Barron’un grafiği baz alınmıştır).....	181
Şekil 5.39 : Yüzey tiplerine bağlı olarak değişen EDT parametresinin 63 Hz, 125 Hz ve 250 Hz’de 6 (M1-M6) alıcı noktasında ortalama ve standart sapma değerleri	182
Şekil 5.40 : Yüzey tiplerine bağlı olarak değişen T_{30} parametresinin 63 Hz, 125 Hz ve 250 Hz’de 6 (M1-M6) alıcı noktasında ortalama ve standart sapma değerleri	183

Şekil 5.41 : Yüzey tiplerine bağlı olarak değişen T_{60} parametresinin 63 Hz, 125 Hz ve 250 Hz’de 6 (M1-M6) alıcı noktasında ortalama ve standart sapma değerleri	184
Şekil 5.42 : Kaynak L1 ve alıcı M6 konumu için varyasyona bağlı Modal Düşme Süresi değişimi.....	186
Şekil 5.43 : Stüdyo o dasında farklı yüzey tiplerinin yansıma analizi (Barron’un grafiği baz alınmıştır.).....	187



KÜÇÜK MÜZİK HACİMLERİNDE ALÇAK FREKANS SES ALANININ DALGA BAZLI SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ (FEM) İLE ANALİZİ VE BİR TASARIM YAKLAŞIMI

ÖZET

Küçük müzik hacimleri, iyi bir akustik konforun sağlanması durumunda motivasyonun, etkinliğin, verimliliğin ve performansın artmasının sağlandığı, çalma, çalışma, prova, kayıt ve dinleme gibi eylemlerin gerçekleştirildiği ortamlardır. Pek çok müzik öğrencisi ya da müzisyen için prova odaları, kayıt odaları, dinleme alanları gibi odalar, akustik konforun ön planda olduğu, sessiz ve enstrümanla uyumlu bir şekilde oluşturulmuş akustik çalışma ortamlarıdır.

Küçük müzik hacimlerinde oluşan ses alanı, hacim boyutlarına bağlı olarak, alçak frekanslarda oluşan rezonansların etkisiyle büyük ölçüde değişime uğramaktadır. Kaynaktan çıkan direkt ses ile yakın yüzeylerden yansıyan ses dalgasının etkileşiminin sonucu olarak hacim içerisinde dağınık olmayan bir ses alanı oluşmaktadır. Oda rezonansları beraberinde ses alanında tını değişimi, eşit olmayan ses dağılımı, renklenme, hacim tepkisindeki düzensizlikler gibi akustik kaliteyi etkileyen pek çok sorun oluşturmaktadır. Çözüm olarak yaygın bir şekilde mod kontrolü için kullanılan geniş bant yutucu sistemlerin etkisiyle yansıma düzeyinde total bir azalma sağlanarak modların algılanabilirliği azaltılmaktadır. Fakat reverberasyon süresindeki bu azalım beraberinde erken yararlı yansımaları da azaltarak hacimde yetersiz ses düzeyi, tını değişimi, mekânsal izlenimin ya da varlık hissinin azalması ve desteğin azalması gibi akustik kusurlara neden olmaktadır.

Reverberasyon, ses alanında fiziksel ve algısal olarak değerlendirmede öncül ve kapsayıcı bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Aynı zamanda hacimlerin akustik ortamının tasarımında ve değerlendirilmesinde kullanılan standart ve yönergelerde optimum koşullar reverberasyon parametresi ile ifade edilmektedir. İyi bir akustik ortam için bu parametrelerin optimum değerlerinin sağlanması ve bu amaçla fiziksel tasarımda hacim, boyut, oran, geometri, form, malzeme gibi tasarım elemanlarının ses alanı üzerindeki etkisinin bilinmesi gerekmektedir. Küçük hacimlerin analizi ve tasarımına yönelik ortaya konan başlıca hipotezler aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Küçük müzik hacimlerinin değerlendirilmesinde reverberasyon süresi yeterli değildir. Bu nedenle optimum performans için spektral içeriğin ve zamana bağlı değişimin rezonans algısı ile ilişkili olarak değerlendirildiği bir tasarım yaklaşımı kullanılmalıdır.
- Odanın fiziksel özelliklerine bağlı olarak ses alanı dağınıklığı istatistiksel ve algı ile ilişkili olarak değerlendirilerek yüzey tasarımı kararı verilebilir.

Ortaya konan hipotezlerin sınanması sırasında çalışmaya yön veren araştırma soruları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Küçük hacimlerin tasarımında ve değerlendirilmesinde etkin akustik parametreler ve ilgili standartlar nelerdir? (Bölüm 2)

2. Küçük hacimlerde elde edilen nesnel değerler ISO 23591:2021 standardında belirtilen değerleri karşılıyor mu? Akustik kusurlar nelerdir? (Bölüm 3)
3. Küçük hacimlerde öznel parametreler arası ilişkiler nasıl değişmektedir? Odanın akustik koşullarının müzisyen izlenimindeki etkisi nedir? (Bölüm 4)
4. Kaynak ve hacim ilişkisinde kaynak özelliklerinin ve hacim özelliklerinin ses alanına etkileri nelerdir? (Bölüm 5)
5. Ortam fiziksel koşullarına bağlı olarak algı ile ilişkili bir değerlendirme ve tasarım yaklaşımı kurgulanabilir mi? (Bölüm 5)

Bu çalışmada küçük müzik hacimleri ve alçak frekanslarda oluşan akustik kusurlara yönelik bir tasarım yaklaşımı önerisi sunulmaktadır. Dolayısıyla, çalışmanın amacı doğrultusunda, Schroeder teorisine uygun olarak rezonansların etkin olduğu alçak frekans sorunlarının değerlendirildiği ve buna yönelik bir tasarım yaklaşımı oluşturulduğu için, 300 m³ altında hacme sahip iki oda seçilmiş ve analizler 50-350 Hz aralığında yapılmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde tezin amacı ve kapsamı doğrultusunda literatür çalışmalarına ve ilgili standartlara yer verilmiştir. İkinci bölümünde, kapalı hacimlerde oluşan ses olaylarına ilişkin dalga teorisi ve bu teorilere bağlı olarak ortam, kaynak ve sınır koşulları özellikleri incelenmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, saha çalışması kapsamında yapılan hacim akustiği ölçümleri ile ilgili TS EN ISO 3382-1:2010 ve TS EN ISO3382-2:2009 standartlarından yararlanılmıştır. Ölçüm çalışması sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

1. Rezonansların etkisiyle elde edilen ani uyarı yanıtı alıcı konumları arası farklılık göstermektedir. Dolayısıyla ilgili nesnel akustik parametrelerinde standart sapma yüksek çıkmıştır.
2. Azalım eğrisinin erken kısmında geç kısmına göre sapma daha fazladır.
3. Oktav bantlardaki sapmalara bakıldığında modal alandan yayınlık alana geçiş, Schroeder teorisine göre ampirik olarak hesaplanan kritik frekanstan daha yüksek çıkmıştır.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, müzisyenlerin rezonans etkin bir hacimdeki izlenimlerinin değerlendirilmesi amacıyla performans dayalı yüz yüze anket çalışması yürütülmüştür. Elde edilen veriler ölçüm sonuçları ve ilgili standart ISO 23591:2021 ile karşılaştırılarak fiziksel koşulların izlenimler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Müzisyenlerle yapılan anket çalışmasından elde edilen veriler istatistiki olarak nicel veri analizi ve nitel veri analizi ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

1. Genel izlenimlerde en etkin ve en açıklayıcı parametreler reverberasyon ve gürlüktür. Rezonans etkin hacimde ise rezonans algısı ve netlik önem kazanmıştır.
2. Rezonansların etkisiyle reverberasyon süresi, ses gücü düzeyi yüksek enstrüman çalan müzisyenler tarafından normalden daha yüksek algılanmıştır.
3. Nitel veri analizlerinden elde edilen sonuçlara bakıldığında düşük reverberasyon süresine bağlı olarak uzamsallık hissinin azaldığı, reverberasyon eksikliğinin rahatsızlık yarattığı görülmüştür. Nesnel olarak

rezonansların etkin olduğu tespit edilen prova odasında ise rezonanslara bağlı akustik bozulmalar ve kamaşma müzisyen izlenimini en çok etkileyen faktörlerdir.

4. Kayıt gibi çok hassas hacimlerin tasarımlarında rezonansların algılanabilirliğine yönelik kullanılan Q-faktör ve modal azalım süresi parametrelerinin eşik değerlerinin icra koşullarına yönelik kullanılabileceği, fakat toleransın icra koşulları için daha yüksek olduğu görülmüştür.

Çalışmanın beşinci bölümünde, saha çalışmaları sonucunda elde edilen parametreler ve ölçütler kullanılarak bir tasarım yaklaşımı geliştirilmiştir. Yaklaşımın uygulanması ve doğrulanması amacıyla benzetim ortamında yürütülen parametrik analiz çalışmasında, fiziksel tasarım değişkenlerinin farklılaştırılmasıyla oluşturulan varyasyonlar karşılaştırılmış, yaklaşımda belirlenen ölçütler aracılığıyla değerlendirilmiştir. Benzetim yöntemi olarak kullanılan dalga bazlı sonlu elemanlar yöntemi için COMSOL Programı Akustik ve CAD-Import modülleri kullanılmıştır. Programın elde edilmesi MDK-2017-40689 no'lu proje desteği ile İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından sağlanmıştır. Parametrik analiz çalışmasına ve yaklaşımın uygulanabilirliğine yönelik sonuçlar aşağıdaki gibidir:

1. Dalga boyunun yüksek olması nedeniyle, ancak oda biçiminde yapılan düzensizlikler mod yollarının kırılmasında etkilidir. Yüzey formu gibi daha küçük boyutlu değişiklikler ise rezonansın oluşmasını engellemekte, fakat enerjisini azaltmaktadır.
2. Farklı konumlarda oda geometrisine bağlı olarak benzer mod deseninin oluştuğu, bununla birlikte karın konumunda bulunan alıcı noktasında düğüm konumunda bulunan alıcıya göre daha çok sapma oluştuğu görülmüştür.
3. Kaynak yayımının doğrultusu ile mod yolunun çakışması durumunda bu doğrultulardaki alıcı noktalarında daha çok tepe ve vadi oluşmaktadır.
4. Kaynak ses gücünün artması frekans tepkisini eşit düzeyde yükseltmektedir. Dolayısıyla rezonansların algılanabilirliğini etkileyen tepe oluşumundaki keskinliği değiştirmemektedir.
5. Yüzey formu ve empedansının tek bir yüzey ölçeğinde farklılaşmasının ses alanına etkisi nesnel akustik parametreler (EDT, T_{20} , T_{60}) açısından irdelendiğinde, yüzeyler arası ses alanı farklılıklarının fark eşiğinin altında olduğu görülür. Bununla birlikte saçıcı sistemlerin rezonansların algılanabilirliğini önemli ölçüde azalttığı görülmektedir.

Önerilen yaklaşımda öncelikle modal analizler ile oda karakterinin belirlenmesi ve böylelikle sorunlu frekansların ortaya konması ve buna yönelik akustik düzenlemenin uygulanması önerilmektedir. Yaklaşımda, odanın zaman tepkisi analizlerine ek olarak oda tepkisinin spektral içeriğini ortaya koyan frekans tepkisi analizleri, MSV ve VSA ölçütleri, odanın uzamsal dağınıklığının değerlendirilmesi önerilmiş. Aynı zamanda alıcı bazında yapılan rezonans algısı ile ilişkili ölçütler, reverberasyon süresini tümüyle azaltılmadan modal frekansların değerlendirilmesini mümkün kılmıştır.



THE ANALYSIS OF SMALL MUSIC ROOMS WITH WAVE BASED FINITE ELEMENT METHOD (FEM) AND A DESIGN APPROACH

SUMMARY

Many of the small music rooms in our lives are work environments in which good acoustics may enhance motivation, efficiency, and comfort. For music students and musicians, small rooms such as rehearsal rooms, studios, and practice rooms are common work environments that need acoustic comfort: both quiet and harmonious acoustics suitable for the musicians' instrument. Apart from these contributions, a good acoustic environment is also a necessity for the control of the loudness that musicians are exposed to and hence for the musician's health.

The sound field formed in small rooms is greatly altered by the effect of resonances occurring at low frequencies, depending on the size of the room. As a result of the interaction of the direct sound emanating from the source and the sound wave reflected from the nearby surfaces, an undispersed sound field is formed in the room. At the same time, an uneven frequency response occurs by creating peaks and valleys at certain frequencies in the frequency response with phase coincidence. Resonances perceived as modes create many problems that affect acoustic quality such as timbre change in the sound field, uneven sound distribution, coloration, irregularities in the volume response. As a solution, with the effect of broadband absorber systems, which are widely used for mode control, a total reduction in the level of reflection is achieved and the detectability of the modes is reduced. However, this reduction in reverberation time also reduces early beneficial reflections and causes acoustic defects such as insufficient sound level, timbre change, decreased spatial impression, and reduced support.

In order to provide a good acoustic environment, the parameters to be considered in the evaluation and design of the rooms are divided into two groups.

- Measurable and calculable objective acoustic parameters
- The subjective acoustic parameters used to describe the quality and overall impressions of the acoustic environment.

Objective acoustic parameters are of great importance in evaluating the physical properties of music rooms. For this reason, reverberation stands out as a leading and inclusive parameter in the physical and perceptual evaluation of the sound field. At the same time, the optimum conditions are expressed with the reverberation parameter in the standards and guidelines used in the design and evaluation of the acoustic environment of the rooms. For a good acoustic environment, it is necessary to ensure the optimum values of these parameters. For this purpose, since the sound environment differs from larger rooms due to its non-diffuse sound field, the effect of design elements such as volume, size, proportion, geometry, form, material on the sound field in physical design should be known to clarify the interaction between musician and the environment.

The main hypotheses for the analysis and design of small music are listed as follows.

- Reverberation time is not sufficient for evaluating small music rooms. Therefore, for optimum performance, a design approach should be used in which spectral content and time variation are evaluated in relation to the perception of resonance.
- Depending on the physical characteristics of the room, the sound field diffuseness can be evaluated statistically and based on method, the surface design can be decided.

The research questions that guided the study during the testing of the hypotheses can be summarized as follows.

1. What are the effective parameters and relevant standards in the evaluation of small music rooms? What are the optimum ranges, the just noticeable difference (JND) values at such rooms at low frequencies? How musicians' requirements change according to the characteristics of the instrument? What are the variables related to perceptibility of resonances? (Chapter 2)
2. Do the measurement results of the rooms within the scope of the study meet the values specified in the ISO 23591:2021 standard? What is the effect of the non-diffuse sound field on measurements? (Chapter 3)
3. How do the relations between subjective parameters change depending on the reflection level in small rooms? What is the effect of resonances at the level of relationship between these parameters? What is the effect of rooms with low reverberation created by wideband absorber systems applied for the control of resonances on the musician's impression? What is the validity of the defined optimum values of the parameters related to the audibility of the resonances for rehearse function which are proposed initially for recording and reproduction? (Chapter 4)
4. What is the effect of physical design variables such as room geometry, source radiation, receiver-source location, source power, surface impedance, surface form on the sound field? (Chapter 5)
5. Is it possible to construct an evaluation and design approach related to perception depending on the physical conditions of the environment? (Chapter 5)

The aim of the thesis can be summarized under two headings in the work model designed to test the above-mentioned hypotheses and investigate the questions that are the source of this test:

1. Determination of evaluation criteria: This stage includes literature research and field studies. In line with the data obtained from the literature, in line with the questionnaire study, the subjective and objective parameters that are important in small music rooms were determined, the role of resonances in this interaction was investigated, and the optimum value ranges and the validity of the threshold values were examined.
2. Establishment of the design method: In small music rooms, source and surface variables were determined, and the effect on the sound field formed at low frequencies was evaluated with a parametric analysis study, and a

perception-related design approach was created for the non-diffuse field problem and irregular frequency response.

The sound field formed in small music rooms differs from large volumes such as a concert hall, hence, the parameters examined, and the analysis methods used should be different. In this study, a design approach proposal is presented for the solution of acoustic defects in small music rooms at low frequencies. Therefore, regarding the purpose of the study, two rooms with a volume of less than 300 m³ were selected and analyses were carried out in the range of 50-350 Hz, since the low frequency problems in which resonances are the basic problem in such rooms. In line with the purpose and scope of the thesis, in the first part of the study, literature studies and related standards that are the source of the studies within the scope of the thesis are included.

In the second section of the study, the wave theory of sound phenomena occurring in small rooms and the properties of the sound field, source and boundary conditions related to these theories were examined. In addition, standards for the acoustical criteria of small rooms such as rehearsal, recording and listening rooms, subjective and objective parameters used in the evaluation of music rooms, and design methods were examined.

In the third section, the rooms where the field studies will be carried out were determined and their measurements were conducted in accordance with international standards. With the preliminary analysis, two rooms with resonance effect and non-resonance effect, which are thought to have different acoustic conditions, were determined. TS EN ISO 3382-1:2010 and TS EN ISO3382-2:2009 standards related to the room acoustic measurement were used. The aims of the measurement study and its relationship with other studies are as follows.

- Obtaining the objective data of the analysed rooms and comparing them with ISO 23591:2021 for the evaluation of the rooms regarding the acoustic quality criteria
- To reveal the effect of physical conditions on the impression of the musicians by comparing the objective data with the subjective data obtained from the questionnaire study.
- Confirmation of the precision of the model created in the simulation method.

The results obtained from the measurement study are as follows.

1. The signal response obtained by the effect of resonances differs between receiver positions. Therefore, the standard deviation of the relevant objective acoustic parameters was high.
2. In the early part of the decay curve, the deviation is greater than in the late part.
3. Considering the deviations in the octave bands, the transition from the modal field to the diffuse field was higher than the critical frequency calculated empirically according to the Schroeder theory.

In the fourth section of the study, a performance-based face-to-face questionnaire was conducted in order to evaluate the impressions of the musicians in a resonance effective room. In order to examine the effect of instrument characteristics on auditory perception, different instrument types with low-mid-high frequency spectrum and low-high sound power levels were used within the scope of the

questionnaire study. The obtained data were compared with the measurement results and the relevant standard ISO 23591:2021, and the effect of physical conditions on the impressions was investigated. The data obtained from the survey conducted with the musicians were statistically analysed by quantitative data analysis and qualitative data analysis. The results obtained are as follows:

1. The most effective and most descriptive parameters in general impressions are reverberation and loudness. Clarity has gained importance in the resonance effective room conditions.
2. With the effect of resonances, the reverberation time was perceived as higher than normal by musicians playing instruments with high sound power level.
3. The qualitative data analysis demonstrated that the spatial impression and presence decreased due to the low intensity of the early reflections because of the use of wide range sound absorbing systems. Also, the lack of reverberation caused discomfort. In the rehearsal room, where resonances were detected objectively, acoustic distortions due to resonance perception and glare are the factors that most affect the impression of the musicians.
4. Threshold values for detectability of resonances were evaluated in studies related to modal decay time. It was found that the threshold values proposed for the perceptibility of resonances in sensitive rooms such as recording and reproduction can also be used for rehearsal rooms and performance conditions, but the tolerance is higher in case of playing condition.

In the fifth part of the study, a design and evaluation approach has been developed by using parameters and criteria obtained as a result of field studies. In the parametric analysis study carried out for the application and verification of the approach, the variations created by the differentiation of the physical design variables were compared and evaluated using the criteria determined in the approach. COMSOL Program Acoustic and CAD-Import Modules were used for the wave-based finite element method as a simulation method. This work has been financially supported by the Istanbul Technical University, under the project no. MDK-2017-40689. The physical room variables determined in the parametric analysis study are room geometry, receiver-source location, source radiation, source power, surface form and impedance. The results for the parametric analysis study and the applicability of the approach are as follows:

1. Room dimension ratios are the first design variable that determines the mode distribution and affects the room character. Other factors such as geometry, damping, source-receiver location does not change the mode distribution but reduces the modal effect.
2. Room geometry is the first variable that can create diffuseness in the sound field, especially in the low frequency band such as 63 Hz. Due to the high wavelength, only the irregularities in room geometry are effective in breaking the mode paths. Smaller dimensional variables, such as the surface form, do not prevent the resonance occurrences, but reduce its energy.
3. It has been observed that a similar mode pattern occurs in different locations, however, more deviation occurs at the receiver point in the antinode position than at the receiver in the node position.

4. If the direction of the source radiation coincides with the mode path, more peaks and valleys are formed at the receiver points in these directions.
5. Increasing the source sound power increases the frequency response equally but does not change the sharpness of the peak formation. However, considering the loudness curve, an increase in amplitude at low frequency will increase the perceptibility of resonances.
6. When the decay time parameters (EDT, T_{20} , T_{60}) were analysed in terms of surface form and impedance effect on the sound field, it is seen that the sound field differences of the surfaces are below the difference threshold. However, it is seen that diffuser systems are effective depending on the form as much as absorber surfaces in terms of resonance control. However, the effectiveness is low at 63 Hz. Hybrid systems (scattering + narrow band absorber) provide resonance control by reducing peak and valley by the damping mechanism at low frequencies at 63 Hz as a sound field control. It also prevents the reducing of early reflections in the higher octaves. It also provides sound field homogeneity and diffusivity by reducing the spatial deviation across the spectral content among receiver points.

In the proposed approach, it is recommended to first determine the character of the room with modal analysis, thus revealing the problematic frequencies and applying the acoustic treatments for this purpose. In the approach, in addition to the time response analyses of the room, frequency response analyses that reveal the spectral content of the room response, MSV and VSA criteria, and evaluation of the spatial diffuseness of the room provided. At the same time, the criteria related to the perception of resonance made it possible to target the modal frequencies without completely reducing the reverberation time.

With the wave-based finite element method used in the analysis, the effect of wave refraction, phase interaction, spherical propagation on the sound field is included, considering the wave properties of the sound.



1. GİRİŞ

Müzik ile ilgili hacimlerde iyi bir akustik ortam ancak oda, enstrüman ve müzisyen ilişkisinin doğru kurgulanmasıyla sağlanabilmektedir. İyi bir akustik ortam ise müzisyen motivasyonu, verimliliği ve performansı açısından önemlidir. Bunun yanı sıra, özellikle yüksek ses düzeyine sahip enstrümanlar ile uzun saatler süren provalar göz önünde bulundurulduğunda, müzisyen sağlığı açısından bir gerekliliktir. Prova odaları, kayıt stüdyoları, müzik çalışma odaları, orkestra çukurları, dinleme alanları gibi odaların akustik ihtiyaçları dinleme, kayıt, prova ya da performans gibi işlevlere bağlı olarak farklılaşsa da bu işlevler genel olarak küçük hacimlerde gerçekleşmektedir. Tıpkı bir enstrümanın, boyut, şekil ve malzeme özelliklerinin ses ve tınısını belirlemesi gibi alçak frekanslarda oluşan ses alanı da oda boyutları küçüldükçe odanın akustik karakterini ve tınısını belirlemektedir. Dolayısıyla müzisyenin işitsel algısı, enstrüman özelliklerine, oda karakterine ve bu ikisi arasındaki etkileşime bağlı bir şekilde ortaya çıkmakta ve çalma eylemini şekillendirmektedir (Kalkandjiev 2015).

Schroeder teorisine (Schroeder ve Kuttruff 1962) göre oda hacmine ve reverberasyon süresine bağlı olarak belirli bir frekansın altında oluşan oda rezonansları nedeniyle ses alanında konumsal olarak basınç dağılımı farklılıkları oluşmakta ve frekans spektrumunda sapmalar meydana gelmektedir. Bu nedenle ideal bir akustik ortamın gerekliliği olan sesin homojen bir şekilde dağılımı ve her yöne eşit ilerleyen yansımalar yerine dağınık olmayan bir ses alanı oluşur. Sesin düzensiz dağılımı ile, odanın her noktasında farklı bir işitsel ortam oluşmaktadır. Aynı zamanda sesin belli frekanslarında durağan dalga oluşumu ve buna bağlı olarak bu frekanslardaki oda tahriki, belirli frekansların işitilmesine neden olmaktadır. Frekans spektrumundaki dengesiz enerji dağılımı renklenmeye neden olmakta aynı zamanda netlik azalımı, ton kalitesinin azalımı gibi sorunlar oluşmaktadır (Sevastiadis, Kalliris, ve Papanikolaou 2010; Toole ve Olive 1988; Vorlander 1998). Bu tez çalışmasında literatürde ortaya konmuş olan bu akustik kusurlara yönelik bir tasarım yaklaşımı oluşturulması hedeflenmiştir.

1.1 Çalışmanın Amacı

Uygun akustik koşulların sağlanması amacıyla standartlar ve yönetmeliklerin özellikle tasarım aşamasında uygulanması önemlidir. Oda rezonanslarının algılanabilirliğine ve iyileştirilmesine yönelik güncel çalışmalar daha çok kayıt ve röprodüksiyon alanları ile sınırlıdır. Bununla birlikte prova odalarının tasarımı ve düzenlenmesine ilişkin yakın zamanda yayınlanmış olan standart ISO 23591:2021 (International Standard Organization 2021) prova odalarında akustik kalitenin sağlanması amaçlı tasarım yönergeleri içermektedir. Yönergeler müzik enstrümanının ses gücü düzeyine uygun olarak hacim ve reverberasyon süresinin belirlenmesine dayanmaktadır. Aynı zamanda optimum mod dağılımı için boyut oranlarına ilişkin uygun değer aralıkları verilmektedir. Bununla birlikte rezonansların değerlendirilmesine yönelik bir kriter ya da yönergeye rastlanmamıştır.

Daha önce yapılan çalışmalara istinaden belirtilen eksikliklerin desteklenmesi amacıyla ortaya konan başlıca hipotezler aşağıdaki gibidir.

- Küçük müzik hacimlerinin değerlendirilmesinde reverberasyon süresi yeterli değildir. Bu nedenle optimum performans için spektral içeriğin ve zamana bağlı değişimin rezonans algısı ile ilişkili olarak değerlendirildiği bir tasarım yaklaşımı kullanılmalıdır.
- Odanın fiziksel özelliklerine bağlı olarak ses alanı dağınıklığı istatistiksel ve algı ile ilişkili olarak değerlendirilerek yüzey tasarımı kararı verilebilir.

Ortaya konan hipotezlerin sınanması sırasında çalışmaya yön veren araştırma soruları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Küçük hacimlerin değerlendirilmesinde etkin parametreler ve ilgili standartlar nelerdir? Bu tür hacimlerde, alçak frekanslarda optimum değer aralıkları ve fark eşiği (JND) değerleri nelerdir? Enstrüman karakteristiğine göre müzisyen ihtiyacı nasıl değişmektedir? Rezonansların algılanabilirliği ile ilgili parametreler nelerdir? Kayıt ve röprodüksiyon için önerilen parametrelerin rezonansların algılanabilirliği ile ilgili tanımlanan optimum değerlerinin prova ya da performans için geçerliliği nedir? (Bölüm 2)
- Küçük hacimlerde elde edilen nesnel değerler ISO 23591:2021 standardında belirtilen değerleri karşılıyor mu? Akustik kusurlar nelerdir? (Bölüm 3)

- Küçük hacimlerde yansıma düzeyine ve rezonans etkisine bağlı olarak öznel parametreler arası ilişkiler nasıl değişmektedir? Rezonansların kontrolü için uygulanan geniş bant yutucu sistemler ile oluşan düşük reverberasyona sahip odaların müzisyen izlenimine etkisi nedir? (Bölüm 4)
- Kaynak ve hacim ilişkisinde kaynak özelliklerinin ve hacim özelliklerinin ses alanına etkisi nedir? (Bölüm 5)
- Ortam fiziksel koşullarına bağlı olarak algı ile ilişkili bir değerlendirme ve tasarım yaklaşımı kurgulanabilir mi? (Bölüm 5)

Yukarıda belirtilen hipotezlerin sınanması ve bu sınamaya kaynaklık eden sorularının araştırılmasına yönelik kurgulanan araştırma modelinde tezin amacı iki başlıkta özetlenebilir:

1. Değerlendirme ölçütlerinin belirlenmesi: Literatür araştırması ve saha çalışmalarını kapsamaktadır. Literatürden elde edilen veriler ile anket çalışması doğrultusunda, küçük hacimlerde önemli olan öznel ve nesnel parametreler belirlenmiş, rezonansların bu etkileşimdeki rolü araştırılmıştır. Optimum değer aralıkları, eşik değerleri standartta ve literatürde belirtilen benzer verilerle karşılaştırılarak öznel ve nesnel değerler arasındaki ilişki analiz edilmiştir.
2. Tasarım yönteminin oluşturulması: Öncelikle kaynak, konum ve yüzey farklılıklarının ses alanında ve alıcıda oluşturduğu farklılıkların irdelenmesi amacıyla parametrik analiz çalışması yapılmıştır. Sonrasında küçük hacimlerde ve alçak frekanslarda oluşan dağınıklık sorununa ve düzensiz frekans tepkisine yönelik hacmin fiziksel özelliklerine bağlı olarak yüzey karakteristiğinin belirlenebileceği algı ile ilişkili tasarım yaklaşımı oluşturulmuştur.

1.2 Çalışmanın Kapsamı

Küçük hacimlerde oluşan ses alanı konser salonu gibi büyük hacimlere göre farklılaşmakta ve buna paralel olarak irdelenen parametreler ve kullanılan analiz yöntemleri değişmektedir. Schroeder teorisine göre modal alan ile istatistiksel ya da dağınık alan olarak değerlendirilen orta ve üst frekanslarla ses alanı ayrımı ampirik olarak hesaplanabilmektedir.

Bu çalışmada küçük müzik hacimleri ve alçak frekanslarda oluşan akustik kusurlara yönelik bir tasarım yaklaşımı önerisi sunulmaktadır. Önerilen yöntemin orta ve üst frekanslarda uygulanabilirliği mümkün olsa da hacimlerin analizinde alçak frekans spektrumuna odaklanılmıştır. Dolayısıyla, çalışmanın amacı doğrultusunda, Schroeder teorisine uygun olarak rezonansların etkin olduğu alçak frekans sorunları değerlendirildiği ve buna yönelik bir tasarım yaklaşımı oluşturulduğu için, 300 m³ altında hacme sahip iki oda seçilmiş ve analizler 50-350 Hz aralığında yapılmıştır. Buna göre anket çalışmasında kullanılan terimler ve hazırlanan sorular alçak frekanslar ve algı üzerindeki etkisi özelinde şekillenmiştir. Çalışmada kapsam dışı bırakılan konular aşağıdaki gibidir.

- Müzisyenlerle yapılan çalışmalarda tekrarlı yankı, parlaklık, kamaşma gibi orta ve üst frekanslarla ilişkili değerlendirmeler sunulmuş olsa da orta ve üst frekanslara ilişkin analizler benzetim kısmında ses alanı teorisinin farklılaşması nedeniyle kapsam dışı bırakılmıştır.
- Boyut optimizasyonu ve boyut oranları ile ilgili literatürde pek çok çalışma bulunmaktadır ve literatür çalışmaları kısmında sunulmuştur. Ayrıca güncel çalışmalara ek olarak ISO 23591:2021’de uygun boyut oranları önerilmektedir. Dolayısıyla odaların boyut optimizasyonu ile ilgili analizleri kapsam dışıdır.
- Yansımanın geliş yönüne ilişkin nesnel ve öznel parametreler küçük hacimlerin değerlendirilmesinde önemlidir. Fakat İTÜ Yapı Fiziği Laboratuvarı envanterinde sekiz şeklinde mikrofonun (figure of eight) bulunmaması nedeniyle bu parametreler ölçülememiştir. Aynı zamanda sonlu elemanlar yöntemiyle (FEM) kullanılarak benzetim yönteminde kafanın geometrik modellenmesi ile ses alınının karmaşıklaşması benzetim çalışmasını zorlaştırmıştır. Bu nedenlerden dolayı yöne bağlı analizler ileriki projelerde çalışılmak üzere kapsam dışı bırakılmıştır.
- Müzisyenlerle yapılan çalışmalarda ses yüksekliğine bağlı maruziyet ve rahatsızlık kapsam dışı bırakılmıştır.

1.3 Çalışmanın Ana Hattı ve Kullanılan Yöntemler

Çalışmada akustik ölçüm, performansa dayalı akustik anket ve FEM benzetim yöntemi gibi pek çok farklı yöntemden yararlanılmıştır. Küçük hacimlerin akustik koşulları ve

tasarımı ile ilgili literatürde çok fazla bilgi olmaması nedeniyle çalışmanın her aşaması bir sonraki aşama için veri oluşturmaktadır. Aynı zamanda, çok yakın bir tarihte yayınlanmış olan standart ISO 23591:2021 bu konu ile ilgili yapılan çalışmaların güncelliğini göstermektedir. Çalışmada kullanılan yöntem akış şeması Şekil 1.1’de verilmiştir. Bu yöntemlere ilişkin yapılan literatür araştırması Bölüm 1’de sunulmuştur.

Bölüm 2’de küçük müzik hacimlerinde ses alanına ilişkin ses olayları ve dalga akustiği teorisi açıklanmıştır. Ses kaynağı olarak enstrümana ilişkin karakteristik özellikler, bu tür hacimlerde etkin olan öznel ve nesnel değerlendirme parametreleri ve hacimlerin tasarımına ilişkin mevcut standartlar araştırılmış ve sunulmuştur.

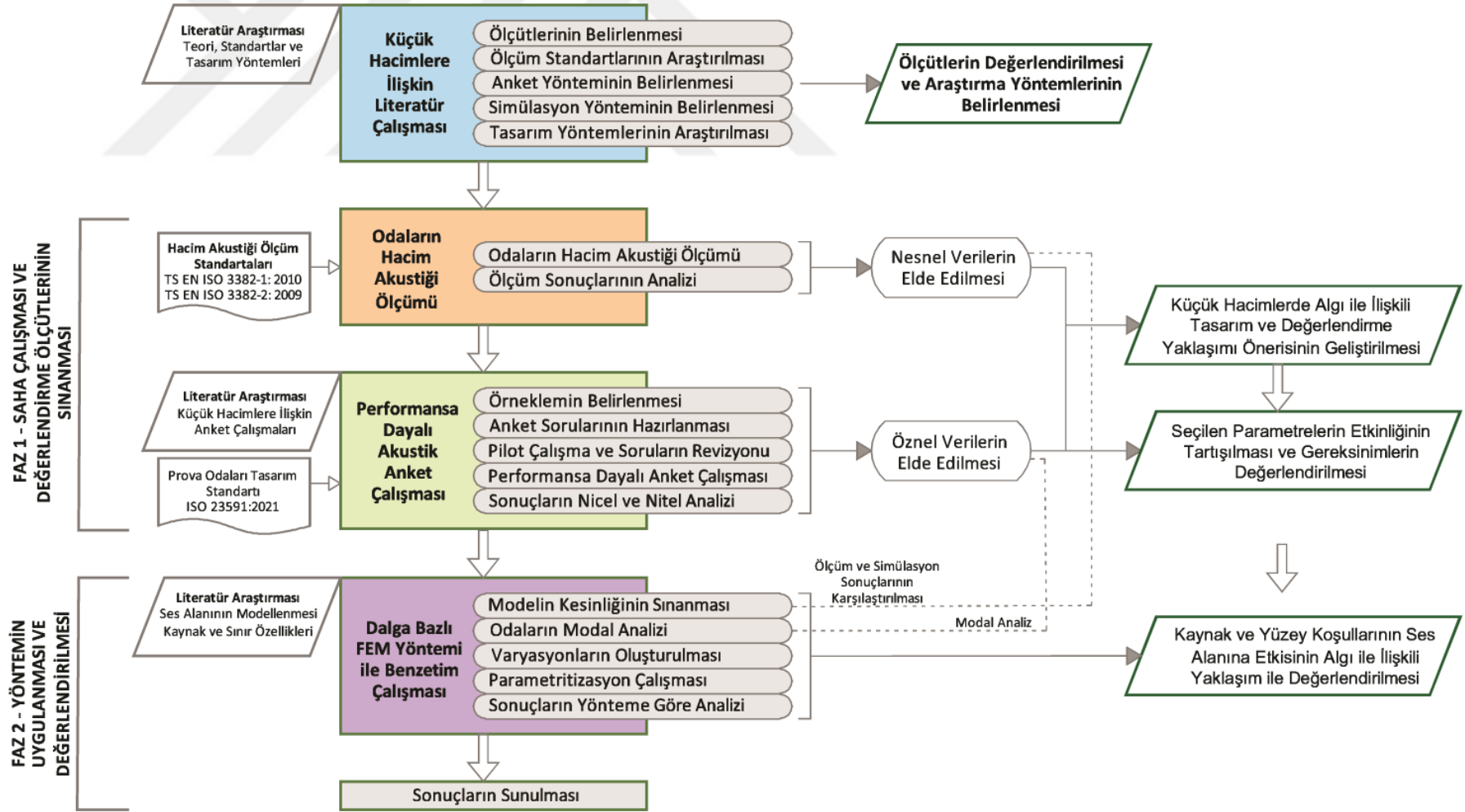
Bölüm 3’te çalışma kapsamında anket çalışması amacıyla belirlenen hacimlerin öznel olarak ses alanı bilgisinin elde edilmesi ve benzetim yönteminde kullanılan hesap modelinin kesinliğinin doğrulanması amacıyla hacim akustiği ölçümleri yapılmıştır. Büyük hacimlerden farklı olarak küçük odalarda yapılan ölçüm çalışmaları araştırılmış, TS EN ISO 3382-1:2010 ve TS EN ISO 3382-2’de tanımlanan ölçüm yöntemine uygun olarak odaların akustik ölçümü yapılmıştır. Gerekli ölçüm cihazları ve yazılımlar elde edilmiş, deneme ölçümleri ile test edilmiştir. Kullanılan ölçüm seti DIRAC yazılım programı, Brüel and Kjaer 4296 model ses üretici hoparlör (omnipower sound source), Brüel and Kjaer 2716C model amplifikatör (power amplifier), Brüel and Kjaer mikrofön, güç yükseltici (preamplifiers), çift kanal ölçüm kablo setleri, mikrofön ve hoparlör ayaklarından oluşmaktadır. Elde edilen sonuçlar, standart ISO 23591:2021’de verilen değer aralıklarıyla ve literatürdeki benzer çalışmalardan elde edilen değerlerle karşılaştırılarak hacimlerin nesnel değerlendirmeleri yapılmıştır. Bununla birlikte ölçüm sırasında yöntemin uygulanmasına ilişkin ya da sonuçların analizinde karşılaşılan zorluklar ve literatürde tespit edilen eksiklikler tartışma kısmında sunulmuştur.

Bölüm 4’te küçük hacimlerde oluşan ses alanının ve enstrüman özelliklerinin algılanan ses alanı üzerindeki etkisinin irdelenmesi, hacimlerin fiziksel boyutunun öznel olarak değerlendirilmesi ve rezonansların müzisyen izlenimi üzerindeki etkisinin nesnel parametrelerle karşılaştırılabilmesi amaçlı performans dayalı anket çalışması yapılmıştır. Pilot çalışmada, çello, piyano, gitar enstrümanlarını çalan 3 farklı müzisyen ile seçilen hacimlerde anket çalışması gerçekleştirilmiş, soruların kapsayıcılığı, anlaşılabilirliği ve hacimlerin uygunluğu tartışılmıştır. Sonrasında anket

soruları yenilenerek anket formu sonlandırılmıştır. Soruların analizinde iki yöntem izlenmiştir: SPSS programı ile yapılan nicel veri analizi ve manuel olarak yapılan nitel veri analizi. Anket çalışmasından elde edilen veriler bu bölümde benzetim yöntemi ile yapılan mod analizi sonuçları ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları değerlendirilirken hacimlerde oluşan rezonansların izlenim üzerindeki etkisi ve rezonansların önlenmesi amacıyla kullanılan yutucu sistemlerin etkisiyle oluşan iki ses alanının parametreler arası ilişkiyi nasıl etkilediği, enstrüman tiplerine bağlı olarak bu ilişkinin nasıl değişkenlik gösterdiği sunulmuştur. Ayrıca çalışmanın asıl amacı olan rezonansların ve alçak frekans ses alanının ve hacim boyutlarının bu izlenimdeki etkisi sunulmuştur. Anket çalışması sırasında karşılaşılan zorluklar ve literatür ile benzeşen ya da farklılaşan sonuçlar tartışma bölümünde sunulmuştur. Sonuç olarak kullanılan parametrelerin hacim algısını ne kadar açıkladığı ve eşik değerlerinin geçerliliği test edilmiştir.

Bölüm 5'te, nesnel ve öznel çalışmalardan elde edilen ölçütler, tasarım yaklaşımı olarak kurgulanarak seçilen bir hacim üzerinde uygulanmıştır. Hacimlerin analizinde dalga bazlı sonlu elemanlar yöntemi (FEM) COMSOL benzetim programı vasıtasıyla kullanılmıştır. COMSOL programı İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında (MDK-2017-40689) temin edilmiştir. Sonrasında hacimler Auto-CAD programında modellenerek hesap arayüzüne aktarılmış, analiz ağacı, alıcı kaynak noktaları, iki boyutlu, üç boyutlu ve noktasal hesaplama elemanları tanımlanmıştır. Analiz çalışmalarından önce ortam koşulları, sınır koşulları ve kaynak özellikleri tanımlanmıştır. Benzetim programında 3 analiz tipi kullanılmıştır. İlki; hacim geometrisine ve boyutlarına bağlı olarak değişen öz frekansların hesaplandığı modal analiz, ikincisi; sınır koşullarına ve alıcı noktasına bağlı olarak hesaplanan frekans tepkisi analizi, üçüncü ise: kaynak ve sınır koşullarına bağlı olarak zamana bağlı ses basıncı dağılımını hesaplayan geçici zaman tepkisi analizidir. Zamana bağlı analiz sonuçları çeşitli araçlar kullanılarak TS EN ISO 3382-1:2010 parametreleri elde edilmiş, ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Sonuç bölümünde ise hipotezlerin sınanmasına kaynaklık eden araştırma soruları, elde edilen sonuçlarla beraber sunulmuş, yöntemlerin uygulanması sırasında karşılaşılan zorluklar aktarılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda küçük hacimlerin değerlendirilmesinde ve tasarımında etki parametrelerin elde edilmesi sağlanmış, bu parametreler göz önünde bulundurularak bir tasarım yaklaşımı oluşturulmuştur.



Şekil 1.1 : Çalışmanın özet akış şeması

1.4 Literatür Araştırması

Bu bölümde, çalışma kapsamına ve yöntemine yönelik yararlanılan çalışmalara yer verilmiştir. Çalışma kapsamında prova odaları özelinde analizler ve değerlendirmeler yapılsa da röprodüksiyon mekanları, sahne alanları, küçük hacimli performans mekanları gibi farklı fonksiyona sahip müzik ile ilişkili hacimler de boyutlarına bağlı olarak benzer akustik niteliklere sahiptirler. Bu nedenle araştırma kapsamı sadece prova odaları ile sınırlı tutulmamış, farklı fonksiyona sahip diğer küçük müzik hacimleri ile ilgili çalışma ve standartlar detaylı bir şekilde incelenmiştir.

1.4.1 Küçük müzik hacimleri ile ilgili yapılan çalışmalar

1.4.1.1 Küçük müzik hacimlerinin ölçümüne ilişkin yapılan çalışmalar

Hacim akustiği ölçümleri için TS EN ISO 3382-1: “Odaların akustik parametrelerinin ölçülmesi, Bölüm 1: Gösteri mekânları” standardı kullanılmaktadır (TS EN ISO 3382 2010). Standartta, hacim akustiği ölçümüne ait hoparlör ve mikrofon konumları, uyarı tipi, nesnel parametrelerin elde edilmesine yönelik yönergeler tanımlanmıştır. Ölçüm tekniğine ve kapsamına ilişkin yönergelere ek olarak salonlarda dinleyici koşulu için akustik büyüklüklere ait optimum değer aralıkları ve fark eşiği (JND) değerleri belirtilmektedir.

TS EN ISO 3382-1:2010 standardı, gösteri mekânlarındaki reverberasyon süresi ölçüm yöntemlerini ve diğer odaların akustik parametrelerini kapsamaktadır. Bununla birlikte küçük hacimlerde özellikle alçak frekanslarda oluşan rezonanslar nedeniyle ölçümlerde çıkan belirsizlikler TS EN ISO 3382-2: 2009’da tanımlanmıştır. Salonlara göre çok daha küçük hacme sahip kontrol odaları, televizyon stüdyoları, dinleme odaları, prova odaları, orkestra çukurları gibi odaların reverberasyon süreleri de oldukça düşüktür. Özellikle alçak frekanslarda oluşan modların azalım sürelerinin yüksek olması nedeniyle, bu tür hacimlerin ölçüm sonuçlarının filtrelenmesinde tersi alınmış zaman (reversed-time filtering) tekniğinin kullanılması gerektiği önerilmiştir (Rasmussen, Rindel, ve Henriksen 1989). Küçük hacimlerin ölçümünde karşılaşılan diğer bir zorluk ise yetersiz gürültü-uyarı oranıdır (Adrian James Acoustics 2000). Bu durumda da integrali alınmış uyarı cevabı yönteminin uygulanmasının diğer yöntemlere göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür (Bjor ve Nikolic 2004).

Küçük hacimlerin ölçümünde karşılaşılan diğer bir zorluk olan ölçüm belirsizliklerinin sebebi genel olarak azalım eğrisinde modlara bağlı oluşan eğri farklılıklarıdır. Doğrusal olmayan azalım eğrilerinin hesaplanması için TS EN ISO 3382-2:2009'da çeşitli tariflemeler yapılmıştır (TS EN ISO 3382-2 2009). Yöntem ve formüller bölüm 1.4.2.4'te detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

1.4.1.2 Küçük müzik hacimlerinde müzisyen izlenimine ilişkin yapılan çalışmalar

Müzik mekanlarının tasarımının nesnel olarak değerlendirmesi kadar fiziksel ortamın işitsel algılanabilirlik ile ilişkilendirilmesi ve değerlendirilmesi de önemlidir. Bu nedenle pek çok çalışmada farklı yöntemler izlenerek fiziksel ortam koşulları ile müzisyen izlenimi ilişkisi araştırılmıştır. Bu konularda yapılan ilk çalışmalarda salon koşullarında yansımaların algılanabilirliğine ilişkin psikoakustik dinleme testleri kullanılmıştır. Bu testlerde yansımaların süresine ve yüksekliğine bağlı olarak yansımaların algılanabilirliği test edilmiştir (Gade 1989; Marshall, Gottlob, ve Alrutz 1978). Algılanabilirliğe ilişkin daha güncel çalışmalarda ise laboratuvar ortamında yapılan dinleme testleri vasıtasıyla tek bir yansımanın tercih edilir gecikme süresinin, yansımanın genliğine ve minimum etkinlik sürelerine bağlı olarak hesaplanabildiği ortaya konmuştur (Sato, Ando, ve Ota 2000).

Temelde hacimlerin öznel olarak değerlendirilmesini araştıran iki yöntem vardır: ilk yöntem ses alanının kontrollü değişimleri ile sentezlenmiş test numunelerinin laboratuvar ortamında değerlendirilmesi, diğer metot ise akustik kalitenin değerlendirilmesinin tamamlanmış fiziksel ortamlarda gerçekleşen dinleme ya da performans eylemi üzerinden yapılmasıdır. Her iki yöntemin de avantajları ve dezavantajları olmakla birlikte her iki yöntemle de pek çok çalışmada önemli bilgilerin elde edilmesi sağlanmıştır. Benzetim yöntemiyle sentezlenen ve kontrollü farklılıklarla oluşturulan ses alanı varyasyonları üzerinden yapılan karşılaştırmalar hızlı sonuç elde etmeyi sağlar. Fakat oluşturulan ses alanı varyasyonlarının ya da test numunelerinin yapay bir karaktere sahip olması kaçınılmazdır. Aynı zamanda test ortamlarının sanal olarak hazırlanması ve test numunelerinin hazırlanması gibi zaman alan bir hazırlık aşaması vardır. Bunun yanı sıra en büyük avantajı ise araştırılan ya da test edilen konunun sınırlandırılabilmesi ve diğer değişkenlerin etkisinin elimine edilebilmesidir. Diğer bir yandan, hacmin direkt olarak değerlendirilmesi ise daha

güvenilir ve gerçekçi sonuçlar vermekle beraber, sonuçların kısa hafıza performansı nedeniyle hemen değerlendirilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte en büyük dezavantajı ise değerlendirme sırasında şartların değişkenliği ve kontrollü bir karşılaştırma ortamının sağlanamıyor olmasıdır.

Tezin konusuna benzer olarak araştırılan öznel değerlendirmeye yönelik çalışmaların, çalışma amacına bağlı olarak değişen anket yöntemi, veri analiz yöntemi ve çalışmada kullanılan katılımcı sayısı Çizelge 1.1 ve Çizelge 1.2'deki gibidir. İncelenen çalışmalarda farklı fiziksel koşulların müzisyen izlenimine ve tercihinin etkisi, öznel ve nesnel parametreler arası ilişkilerin analizi, ideal ortam koşullarının ya da akustik kusurların müzisyende yarattığı izlenimler, akustik ortamların tanımlanmasında kullanılan ifadeler ya da terimler, enstrüman karakteristiğinin müzisyen algısındaki etkisi gibi konular ele alınmıştır.

Kayıt ve kontrol odası gibi küçük hacim koşullarında yapılan öznel değerlendirme çalışmaları ile konser salonları gibi büyük hacimlerde yapılan anket çalışmaları ayrı çizelgelerde sunulmuştur. Küçük müzik hacimlerinin öznel olarak değerlendirilmesinde genel olarak patlayan (boomy) ya da rezonant kelimeleri kullanılmaktadır. Wankling ve diğerlerinin yaptığı çalışmada yeni terimler tanımlanarak kümeleme analizi vasıtasıyla değerlendirmeler 3 ana başlıkta toplanmıştır. Bunlar net söyleyiş (articulation), rezonans ve bas içeriğidir. Bu kavramların bağlı olduğu nesnel akustik parametreleri ve fiziksel değişkenler ise modal düşme süresi, hacim ve kaynak-alıcı konumlarıdır. Modal düşme süresinin azalması net söyleyişi artırmış, müzisyen tercihi ise ne söyleşin artması ve rezonansın azalması ile doğru orantılı olarak değişmiştir (Wankling, Fazenda, ve Davies 2010). Kontrol odası koşullarında öznel ve nesnel parametreler arası ilişkinin irdelendiği başka bir öznel çalışmada, konjoint analiz yöntemi ile oluşturulan test numuneleri kullanılmış, erken düşme süresinin (EDT), netlik (C_{50}) ve belirginlik (definition, D_{50}) parametrelerinin reverberasyon süresine göre daha etkili olduğu belirtilmiştir (Milković, Krhen, ve Fajt 2017).

Kato ve diğerlerinin müzisyenlerle yaptığı çalışmada tınısal parlaklığın ilk gecikme aralığı (ITDG), erken düşme süresi (EDT) ve reverberasyon (T_{30}) artışıyla ilişkili olarak arttığı görülmüştür. Dolayısıyla bu tür hacimlerde erken yansımaların öznel değerlendirmelerde daha etkin olduğu görülmektedir (Kato vd. 2010).

Müzisyenler konser sırasında ve prova sırasında benzer nitelikte çalmaktadırlar. Bu ilişkinin tanımlanması adına yapılan çalışmada bu tutarlılığın direkt sesin reverberasyonlu sese oranı olan direkt-reverberasyon düzeyi oranı (DRR) parametresi ile açıklanabileceği belirtilmiştir (Skålevik 2014). Dolayısıyla, erken yansımalar ek olarak direkt sesin de değerlendirildiği parametreler izlenimlerde ve çalma eyleminde etkili olmaktadır.

Farklı ortam koşullarının değerlendirildiği çalışmaların yanı sıra farklı enstrüman karakteristiğinin müzisyen algısı üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmalar da mevcuttur. Farklı enstrümanların perde, tını ve gürlük özelliklerinin dinamik algı üzerindeki etkisi araştırılmış, tını ve güçlülüğün eşit şekilde dinamik algıda etkili olduğu, ses perdesinin ise daha az etkili olduğu tespit edilmiştir (Fabiani ve Friberg 2011). Bununla birlikte enstrümanların özelliklerine göre hacim gereksinimleri değişmektedir. Prova odalarında akustik kalitenin sağlanması amacıyla yayınlanan NS 8178: 2014 standardına uygun olarak değerlendirilen hacimlerde elde edilen sonuçların müzisyenlerin değerlendirmeleri ile tutarlı olduğu bulunmuş, farklı enstrüman grupları için değişken akustik koşulların sağlanması gerekliliği vurgulanmıştır (Knöfel, Weisheit, ve Troge 2018). Özellikle ses gücü düzeyi düşük enstrümanlara benzer olarak vokalistlerde reverberasyon süresinin ideal değerde olmaması durumunda söyleme eforunun arttığı görülmüştür (Sinal ve Yilmazer 2018).

Oda boyutlarına bağlı olarak müzisyen izlenimi ve parametreler arası ilişkiler değişse de anket yönteminin belirlenmesi ve hacim farklılığının etkisinin irdelenmesi açısından konser salonları kapsamında yapılan öznel değerlendirme çalışmaları da araştırılmıştır. Konser salonu ve sahne koşullarının öznel olarak değerlendirildiği araştırmaların, çalışma amacına bağlı olarak değişen anket yöntemi, veri analiz yöntemi ve çalışmada kullanılan katılımcı sayısı Çizelge 1.2'deki gibidir. Salon koşullarında uzamsallığın tercihte etkin olduğu bilinmekle beraber Baluert ve Lindemann'ın (Blauert ve Lindemann 1986) yaptığı çalışmalarda uzamsallığın hangi koşullarda oluştuğu araştırılmıştır. Buna göre erken yansımaların uzamsallıkta ve tercihte etkili olduğu, bunun yanı sıra alçak frekans reverberasyonunun çok az etkili olduğu ortaya konmuştur. Oda müziği ile ilişkili konser salonları kapsamında yapılan daha güncel çalışmalarda total akustik izlenim ile en yüksek ilişkili parametrenin destek olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda reverberasyon süresinin optimum değer

üzerinde olduğu salonlarda reverberasyon parametresi total izlenim ile yüksek ilişkili çıkmıştır (Sanders 2003).

Benzetim ve sinyal işleme ile ilgili gelişmelere bağlı olarak anket metotları da güncellenmektedir. Ueono ve Tachibana'nın (Ueno ve Tachibana 2003) müzisyenlerle yaptığı çalışmalarda kontrollü bir ortam sağlamak amacıyla laboratuvar ortamında sahne koşulları sanal olarak sağlanarak performans gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla müzisyenlerin kontrollü bir şekilde varyasyonları oluşturulan salon koşullarını değerlendirebilmesi sağlanmıştır. Bu yöntemde müzisyen tarafından yansısız ortamda çalınan müzik mikrofon tarafından kaydedilir ve gerçek bir sahne ortamının sinyal tepkisi ile birleştirilerek test ortamında 6 yönlü hoparlör sistemi ile müzisyene geri iletilir. Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Reverberasyon, erken yansıma düzeyi ve geç yansıma düzeyi müzisyen izlenimini büyük ölçüde etkilemektedir.
- İlimli bir reverberasyon süresi bütün müzisyenlerce tercih edilmiştir. Reverberasyon süresinin artması, topluluk performansını rahatsız etmesi nedeniyle tercih edilmemiştir.
- Zayıf erken yansımalar uzamsallık açısından müzisyenler için daha tercih edilir olmuştur. Destek etkisi özellikle geç yansımaların etkisiyle artmıştır.

Sahne koşulların benzetilerek oluşturulan dinleme testleri ile yapılan başka bir çalışmada ise öznel değerlendirme atıfları 3 boyutta toplanmıştır. İlk boyutta ses yüksekliği, sarmalanma ve reverberasyon, ikinci grupta baslılık ve yakınlık atıfları, üçüncü grupta ise netlik ve belirginlik bulunmaktadır. Müzisyenlerin tercih değerlendirmeleri ile ilişkili atıflar ise iki ana gruba ayrılmıştır. İlk müzisyen grubu reverberasyon, sarmalanma ve ses güçlülüğü yüksek salonları tercih ederken diğer grup belirginliği ve netliği yüksek salonları tercih etmiştir (Lokki vd. 2012).

Benzer şekilde sahne koşulları ile fiziksel ortam ilişkisinin değerlendirildiği Shtrepi ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, laboratuvar ortamında gerçek salon koşulları benzetilerek yapılan dinleme testleri ile müzisyenlerin yüzey özelliklerine göre farklılaşan izlenimleri değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda saçıcılık oranı 0,4 ve 0,9 (sınır değer) arası olan saçıcılık oranının müzisyen tarafından algılanabildiği ortaya konmuştur (Shtrepi vd. 2016).

Çizelge 1.1 : Prova odaları ve röprodüksiyon odaları kapsamında yapılan özenel değerlendirme çalışmalarına ait çalışmanın amacı, araştırma yöntemi, analiz yöntemi ve katılımcı sayısı

Araştırma Başlığı	Araştırma Amacı	Aştırma Yöntemi	Veri Analiz Yöntemi	Katılımcı Sayısı
Improving the Assessment of Low Frequency Room Acoustics using Descriptive Analysis (Wankling vd. 2010)	Küçük hacimlerde öznel değerlendirmelerde yeni tanımların oluşturulması ve nesnel parametrelerle ilişkilendirilmesi	Laboratuvar ortamında yapılan dinleme testleri	Nicel veri analizi (ANOVA, korelasyon analizi ve kümeleme analizi)	12 deneyimli katılımcı, 24 test numunesi
Influence of Pitch, Loudness, And Timbre on the Perception of Instrument Dynamics (Fabiani ve Friberg 2011)	Perde aralığı, gürlük ve tını değişiminin dinamik aralık algısındaki etkisinin araştırılması	Yarı yansız odada yapılan dinleme testleri	Nicel veri analizi (ANOVA)	21 müzisyen, 5 farklı enstrüman
Consistency in Music Room Acoustics (Skålevik 2014)	Konser salonlarında gerçekleşen performans ile prova odalarında gerçekleşen performansın ortam akustiği açısından ortak noktasının belirlenmesi	Test edilen hacimlerde ve laboratuvar ortamında performansa dayalı anket çalışması	(-)	1 müzisyen (keman)
Correlation Between Objective and Subjective Acoustic Quality Parameters Of Professional Sound Control Rooms (Milković vd. 2017)	Kontrol odası koşullarında öznel ve nesnel parametreler arası ilişki analizi	Oda koşullarında dinleme testleri	Konjoint analizi	6 oda koşulu
Musicians and their practice rooms: What do they think about present room acoustics and what would they prefer? (Knöfel vd. 2018)	Prova odalarının öznel değerlendirmeler üzerinden tanımlanması	Oda koşullarında performansa dayalı anket çalışması	Nicel veri analizi (Faktör analizi)	41 profesyonel ve yarı profesyonel müzisyen
Effects of Perceived Singing Effort on Classical Singers' Reverberation Time	Prova odalarında müzisyen vokal eforunun reverberasyon süresi ile ilişkisinin tespit edilmesi	Oda koşullarında performansa dayalı anket çalışması	Nicel veri analizi (Kruskal-Wallis Hipotez testi ve Post hoc Tukey testi)	30 klasik müzik vokalisti
Preferences Towards Music Practice Rooms (Sinal ve Yilmazer 2018)				
Rooms for Music Education and Rehearsal – Evolution of Their Acoustic Design and Comparison of Results Between Questionnaires and Measurement (Lachmann vd. 2019)	Prova odaları ile ilgili Norveç Standardı NS 8178:2014 ile müzisyen izlenimlerinin karşılaştırılması	Oda koşullarında performansa dayalı anket çalışması	Nicel veri analizi (Frekans analizi)	(-)
Study on Effect of Room Acoustics on Timbral Brightness of Clarinet Tones. Part I: Subjective Evaluation Through a Listening Experiment (Kato vd. 2010)	Konser salonlarında akustik ortamının algılanan klarnet enstrümanı tınısındaki parlaklık üzerine etkisinin analizi	Salon koşullarında performansa dayalı anket çalışması	Nicel veri analizi (ANOVA)	15 müzisyen en az 6 yıl tecrübeli)

Çizelge 1.2 : Konser salonları kapsamında yapılan öznel değerlendirme çalışmalarına ait çalışmanın amacı, araştırma yöntemi, analiz yöntemi ve katılımcı sayısı

Araştırma Başlığı	Araştırma Amacı	Aştırma Yöntemi	Veri Analiz Yöntemi	Katılımcı Sayısı
Auditory Spaciousness: Some Further Psychoacoustic Analyses (Blauert ve Lindemann 1986)	Konser salonu koşullarında uzamsallık üzerinde hangi parametrelerin etkin oluşunun araştırılması	Laboratuvar ortamında yapılan dinleme testleri	Nicel veri analizi (Varyans ve korelasyon analizi)	14 deneyimli müzik öğrencisi ve araştırma görevlisi
Suitability of New Zealand Halls for Chamber Music (Sanders 2003)	Konser salonlarında öznel ve nesnel parametreler arası ilişkinin analizi ve uygun ortam koşullarının tanımlanması	Salon koşullarında performansa dayalı anket çalışması	Nicel veri analizi (korelasyon analizi)	22 müzisyen, 6 kategori, 24 salon
Experimental Study on the Evaluation of Stage Acoustics by Musicians using a 6-Channel Sound Simulation System (Ueno ve Tachibana 2003)	Müzisyen izleniminde nesnel akustik parametrelerinin ve enstrüman özelliklerinin etkisinin analizi	Laboratuvar ortamında konser salonu koşullarının benzetim yöntemi ile oluşturulması ve bu ortamda performansa dayalı anket çalışması	Sonuçların yorumlanması	12 profesyonel müzisyen (3 flüt, 1 klarnet, 2 obua, 2 keman)
Disentangling Preference Ratings of Concert Hall Acoustics Using Subjective Sensory Profiles (Lokki vd. 2012)	Sahne koşullarında tercih koşullarının oluşmasında hangi öznel parametrelerin etkili olduğunun araştırılması	Laboratuvar ortamında konser salonu koşullarının benzetim yöntemi ile oluşturulması ve bu ortamda performansa dayalı anket çalışması	Nitel veri analizi (bireysel tanım profilleme, IVP), Nicel veri analizi (Kümeleme ve korelasyon analizi)	17 orkestra müzisyeni
Objective and Perceptual Evaluation of Distance-Dependent Scattered Sound Effects in a Small Variable-Acoustics Hall (Shtrepi vd. 2016)	Konser salonu koşullarında saçıcı sistemlerin mesafeye bağlı olarak nesnel ve öznel parametreler üzerindeki etkisinin analizi	Laboratuvar ortamında yapılan dinleme testleri	Nicel veri analizi (Pierson korelasyon analizi)	51 katılımcı (31 araştırma görevlisi, 20 öğrenci)

Salon, sahne, prova odaları ve röprodüksiyon odaları gibi farklı hacimlerde yapılan çalışmalar incelendiğinde hacim ve boyut özellikleri değiştikçe parametreler arası ilişkilerin değiştiği görülmektedir. Salon koşullarında erken yansımaların yüksekliği tercih edilirken sahne koşullarında düşük erken yansımalar tercih sebebi olabilmektedir. Küçük hacimlerin öznel olarak değerlendirilmesine ilişkin yapılan çalışmaların kapsamı ise kayıt ve röprodüksiyon alanları ile sınırlıdır. Aynı zamanda incelenen çalışmalarda genelde dinleme testleri ve laboratuvar koşulları kullanılmıştır.

Bununla birlikte 2014 yılında prova odalarının tasarımı ile ilgili çıkan Norveç standardı NS 8178:2014 ve bu standardın geliştirilmesiyle 2021 yılında yayınlanan ISO 23591:2021 standardı ile bu konuda yapılan çalışmaların artış gösterdiği görülmektedir. Çalışmalar yöntem bazında farklılaşsa da çalışmalar arası bir tutarlılığın olduğu ve sonuçların birbirleriyle örtüştüğü görülmektedir.

Çalışmaların geneline bakıldığında, çalma eyleminin gerçekleştiği durumlarda rezonans algısının müzisyen izlenimine olan etkisi, diğer öznel değerlendirme parametreleri ile etkileşimi ve enstrüman karakteristiğinin bu etkileşimdeki rolü araştırılmaya açık bir konu olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda nesnel verilerin öznel değerlendirmelerle karşılaştırıldığı çalışmalarda reverberasyon süresine ait geleneksel hacim akustiği parametrelerinden yararlanılmaktadır. Dolayısıyla alçak frekanslarda rezonansların irdelenmediği bir ses alanı analizi, öznel değerlendirme açısından işitsel ortamı tam olarak yansıtmamaktadır.

1.4.1.3 Benzetim yöntemine (Dalga Bazlı Sonlu Elemanlar Yöntemi) ilişkin yapılan çalışmalar

Hacim akustiği tahmin modelleri, kapalı hacimdeki mekânsal ve zamansal değişimi bulmak amaçlı kaynak ve sınır etkileşiminin hesaplanması ile oluşturulur. Deneysel yöntemlerin dışında, genel olarak kullanılan 3 modelleme yöntemi bulunmaktadır; dalga bazlı akustik yöntem (wave-based acoustic method), difüzyon denklemi yöntemi (diffusion equation method) ve enerji bazlı geometrik akustik yöntemi (geometrical acoustic method) (Mak ve Wang 2015). Yöntemlerin tanımları aşağıdaki gibidir.

Dalga bazlı akustik yöntem: Akustik dalga teorisini kullanan hesap modelidir. Sınırlandırılmış bir hacimde sesin yayılımı dalga denklemleri kullanılarak hesaplanır. Model karmaşıktıkça (ör: oda akustiği) sonlu farklar ya da sonlu elemanlar gibi hesaplamalı yöntemler ile hesaplamalar yapılır (Murphy, Southern, ve Savioja 2014).

Difüzyon denklemi yöntemi: Bu yöntemde kapalı hacimdeki ses alanı sınır koşullarının dağınık şekilde yansıtıcı olması durumuna göre modellenir. Sonlu farklar yöntemi gibi hesaplama yöntemleri kullanılarak hacim koşullarında tutarlı sonuçlar elde edilmiştir (Navarro ve Escolano 2015).

Enerji bazlı geometrik akustik yöntemi: Sesin doğrusal hareketine ve geometrik olarak düzgün yansıma yaptığı varsayımına dayanır. Dalganın kırılma ve faz etkileşimini göz

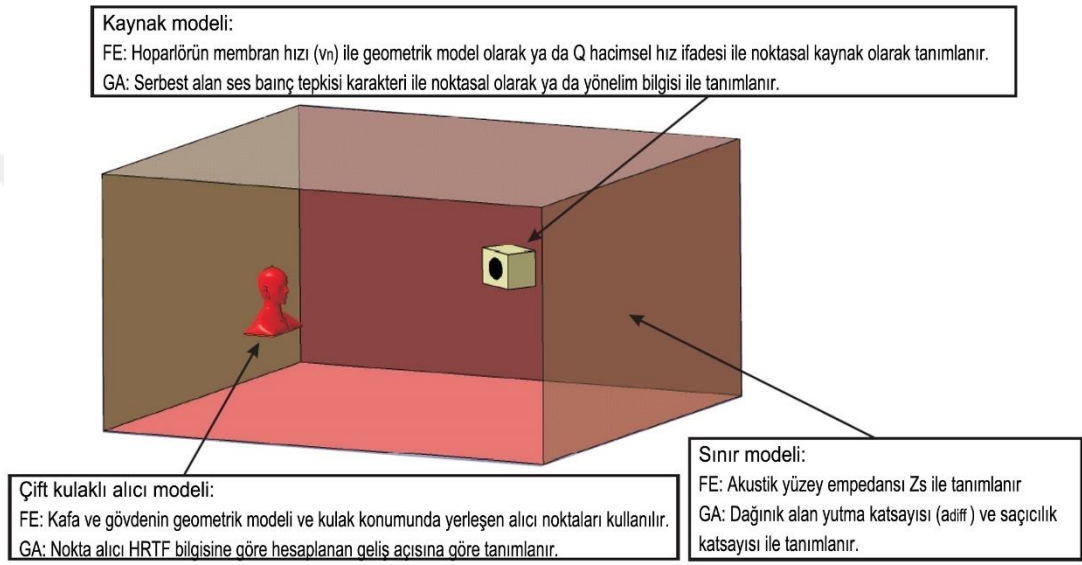
ardı eder. Dolayısıyla istatistiksel olarak dağınık alanların modellenmesinde yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Bu prensibe dayanan iki yöntem bulunmaktadır.

- Sanal kaynak yöntemi (Image-source method): Geometrik akustik kurallarına dayanan yöntemde, yansımaların simetrik olarak yüzeylerin arkasında bulunan sanal kaynaklardan geldiği kabul edilmektedir. Yüksek hassasiyette sonuç vermesine rağmen geometrinin karmaşıklık düzeyi arttıkça sanal kaynakların hesaplanması zorlaşmakta ve hesap yükü artmaktadır (Vorländer 1989).
- Işın izleme yöntemi (Ray-tracing method): Bu yöntemde kaynaktan çıkan her bir taneciğin odanın herhangi bir yüzeyine çarpıncaya kadar doğrusal bir yol izlediği varsayılır ve yüzeyin saçıcılık katsayısına göre düzgün ya da dağınık yansıdığı kabul edilir. Taneciğin taşıdığı enerji çarptığı yüzeylere bağlı olarak tamamen yutuluncaya kadar devam eder. İstatistiksel bir yöntem olduğundan kompleks geometrileri modellemeye daha uygundur (Vorländer 1989).

1950’lerde bilgisayar çağının başlangıcı ile müzik hacimlerinin hacim akustiği hesaplamalarında kullanılan enerji bazlı yöntemler olan sanal kaynak yöntemi ve ışın izleme yöntemi oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Hacim akustiğinin hesaplanması için benzetim yönteminin kullanılması ilk olarak Schroeder tarafından 60 yıl önce gerçekleştirilmiştir (Schroeder 1961). Sonrasında ışın taraması yöntemine ilişkin ilk uygulamalar Krokstad (Krokstad, Strom, ve Sørsdal 1968) tarafından yapılmıştır. Önerilen ve açıklanan geometrik akustik yöntemine dayanan bu algoritmalar o dönemlerde geniş bir uygulama alanı bulmuş ve pek çok araştırmada kullanılmıştır. Sesin parçacık ve dalga ikililiğine göre ses alanı tanımlaması enerji azaltımına ve parçacık ya da ışının alıcı noktasına geliş yönüne dayanır. Bu yaklaşım ancak oda geometrisinin boyutları araştırılan dalga boyuna göre yeterince büyük ise doğrudur. Bu varsayımların kesinliği ve geçerliliği Schroeder frekansının üzerinde konuşma ve müzik amaçlı büyük hacimler için genel olarak yeterlidir (Vorländer 2013).

Şekil 1.2’de geometrik akustik yöntemi ve dalga bazlı sonlu elemanlar yöntemi arasındaki temel farklılıklar belirtilmiştir. Geometrik akustik modellerde vokal, enstrüman gibi ses kaynağı, yansımasız odada elde edilen yönelme örüntüsüne göre ölçülen ses basınç düzeyi ile tanımlanır. Dalga bazlı modellerde ise hacimsel hız bilgisi ve yayım karakteri bilgisi ile tanımlanır (ör: monopol, dipol). Alıcının tanımlanması

geometrik akustik modellerde kafa aktarım fonksiyonu (Head Related Transfer Function, HRTF) bilgisine göre hesaplanırken, dalga bazlı modellerde kafa ve gövdenin yapısının geometrik olarak modellenmesi gerekir. Alıcı noktaları kulak konumunda yerleştirilir. Sınır koşullarının tanımlanması geometrik akustik modelde dağınık alan yutma katsayısı (α) ve saçıcılık katsayısı ile yapılır. Dalga bazlı modelde ise sınır koşulları akustik yüzey empedansı bilgisi ile tanımlanır. Bununla birlikte saçıcı yüzeylerde form bilgisi geometrik olarak yüzeyin üç boyutlu modellenmesi ile sağlanır (Aretz ve Vorländer 2012).



Şekil 1.2 : Sonlu elemanlar (Finite Element, FE) ve geometrik akustik (Geometrical Acoustic, GA) yöntemlerinde model tanım farklılıkları (Aretz ve Vorländer 2012)

Belirtilen yöntemlerde, kullanılan matematik modellerinin dağınık alan ya da istatistiksel alan teorisine dayanması nedeniyle, alçak frekansların etkin olduğu küçük hacimler, malzeme özelliklerinin yüzeylere göre farklılık gösterdiği hacimler ya da geometrik olarak ekstrem boyut oranlarına sahip hacimler gibi dağınık olmayan ses alanlarının hesaplanmasında geometrik akustik hesaplama modellerinin tutarlı sonuçlar vermediği görülmüştür (Sakuma ve Sakamoto 2014; Siltanen, Lokki, ve Savioja 2010). Bu nedenle çözüm olarak bilgisayar ve benzetim teknolojisinin gelişimine bağlı olarak hesap maliyetlerinin ve sürelerinin azalmasıyla, dalga bazlı sayısal analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Aynı zamanda geometrik ve dalga bazlı modellerin kesinliğine yönelik yapılan çalışmalarda, elde edilen sonuçlar ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmış, her iki modelin avantajları ve dezavantajları ortaya konmuştur (Vorländer 2011; Yokota vd. 2004). Enerji bazlı modellerde sesin dalga

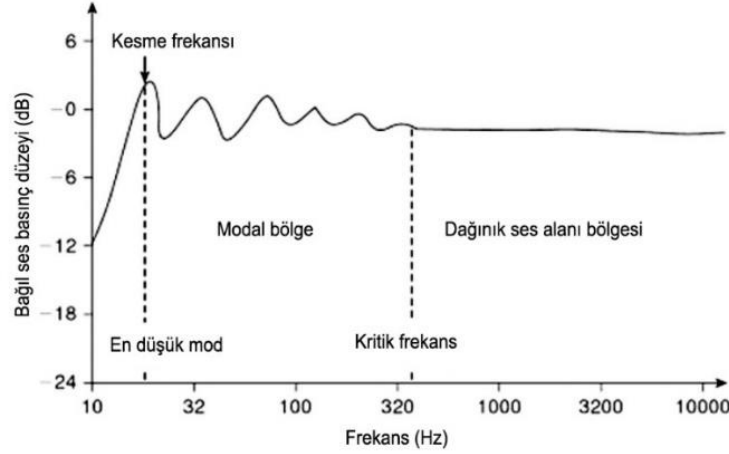
özellikleri göz ardı edilerek, basitçe enerjinin eklemelenmesiyle hesap modelleri oluşturulur. Dalga bazlı modellerde ise ses dalgası faz bilgisi taşıdığı için faz etkileşimi de sonuç olarak modellenir (Yousefzadeh ve Hodgson 2012). Araştırmacıların faz bilgisi taşıyan modeller ile geleneksel enerji modelleri arasında yaptıkları karşılaştırmalarda, faz etkileşiminin yarattığı değişikliklerin özellikle ilk yansımalarda dramatik farklılıklar oluşturduğu görülmüştür (Hong-wei ve Kun-peng 2009; Suh ve Nelson 1999). Güncel çalışmalarda geometrik akustik (geometrical acoustic, GA) modellerin belirsizliğini azaltmak amaçlı sonlu eleman yöntemi (Finite Element Method, FEM) ile birleştirilen hibrit modeller geliştirilmektedir. Bu çalışmalarda, sonlu eleman yöntemiyle (FEM) empedansın dahil olması ile, alçak frekanslarda model sonuçlarının ölçümlerle daha fazla örtüştüğü, aynı zamanda bu doğruluğun özel testlerle doğrulandığı görülmüştür (Pelzer, Aretz, ve Vorländer 2011).

Tez kapsamında hacim boyutları ve analiz edilen frekans spektrumu göz önünde bulundurulduğunda dalga bazlı sonlu elemanlar yönteminin (FEM) kullanılması uygun bulunmuştur. Özellikle form ve ses alanı ilişkisinin araştırılmasında dalga bazlı model kullanılarak ses dalgasının kırılma fenomeni de çalışmaya dahil edilmiştir. Benzetim yöntemi ile ilgili yapılan çalışmaların geneline bakıldığında sonlu elemanlar yönteminin daha çok mühendislik bazlı araştırma konularında kullanılması nedeniyle yöntemin daha çok teorik olarak ele alındığı ya da yüzey ölçeği ile sınırlı kaldığı, oda ölçeğinde uygulanabilirliğine ilişkin çok az çalışmanın bulunduğu görülmektedir. Dolayısıyla çalışmanın dalga bazlı sonlu elemanlar yönteminin uygulanabilirliği açısından bu alanda katkı sağlayacağı öngörülmüştür.

1.4.1.4 Küçük müzik hacimlerinin tasarım yöntemine ilişkin yapılan çalışmalar

Müzik işlevinin gerçekleştiği prova odaları, röprodüksiyon odaları, dinleme alanları, müzik sınıfları, orkestra çukurları gibi küçük hacimlerde, fiziksel ses olayları, dağınık bir ses alanına sahip büyük hacimlere göre farklılaşmaktadır. Dağınık olarak tanımlanan bir ses alanında herhangi bir zaman diliminde hacim içerisindeki ses dağılımı ve aynı zamanda bir noktadan her yöne olan enerji akışı eşittir (Kleiner 2014). Hodgson'a göre, dağınık bir ses alanının oluşması için hacmin yaklaşık olarak dörtgensel olması, kuvvetli yüzey yansımalarına sahip olması ve yutucu yüzeylerin eş bir şekilde yüzeylere yayılmış olması gerekmektedir (Hodgson 1996). Schroeder teorisine göre ses alanı modal yoğunluğa bağlı olarak modal ses alanı bölgesi ve

dağınık ses alanı bölgesi olarak ikiye ayrılmaktadır (Şekil 1.3). Buna göre alçak frekanslarda düşük sayıda oluşan ve ayrık yerleşen modların domine ettiği bir ses alanı ile yoğun mod etkisiyle oluşan istatistiksel ses alanı arasındaki geçiş Schroeder frekansı (F_{kritik}) ile tanımlanmaktadır.



Şekil 1.3 : Modal bölge ve dağınık ses alanı bölgesi ayrımı (Kuttruff 2009)

Dağınık olmayan ses alanı ve istatistiksel ses alanı arasındaki ayrım aynı zamanda işitsel algının da farklılaşmasına neden olmaktadır. Modal bölgede tekil modlar, frekans tepkisinde ayrık bir şekilde belirginleşerek ton dengesinin bozulmasına neden olur. Aynı zamanda hacimlerin boyutlarına bağlı olarak direkt sesin yansımalar sonrası büyümesi ve sönümlenmesi, büyük kapalı hacimlerde dağınık bir şekilde gerçekleşirken, küçük hacimlerde, direkt ses ve yansıyan ses faz etkileşimine bağlı olarak hacmin farklı noktalarında ses basıncının odaklanarak yükselmesine ya da rezonans etkisiyle enerjinin geç sönümlenmesine neden olur (Everest ve Pohlmann 2009). Frekans tepkisindeki enerji sapmalarına ek olarak, hacim içerisinde sesin belirli frekanslarda artışı beraberinde geç sönümlenmeyi getirmekte ve hacim içerisinde ses basınç dağılımını farklılaştırmaktadır (Vorlander 1998).

Reverberasyon süresi hacimlerin genel olarak değerlendirilmesinde global bir parametre olmakla beraber özellikle spektral içeriğin oda rezonansları nedeniyle değiştiği küçük hacimlerde oda karakterini yeterli düzeyde açıklayamadığı belirtilmektedir (Kaplanis vd. 2019). Aynı zamanda dinleme testleriyle yapılan çalışmalarda azalım süresinin çok kısa olması ve algının ilk 50 ms içerisinde ilk yansımalar ile şekillenmesi nedeniyle, reverberasyon süresinin hacim değerlendirmelerinde yeterli olmadığı görülmüştür (Toole 2008; Yadav vd. 2013).

Benzer şekilde konuşma ve müzik amaçlı salonlarının değerlendirilmesinde kullanılan C_{80} , D_{50} , G_{80} gibi nesnel parametrelere bakıldığında 50 ms ya da 80 ms olarak belirlenen erken ve geç yansıma ayrımı nedeniyle, bu parametrelerin küçük hacimlerin değerlendirilmesinde yeterli olmadığı tartışılmaktadır (Kaplanis vd. 2014).

Küçük hacimlerde algılanan reverberasyon süresi ve tını analiz edildiğinde, temelde oluşan iki sorun vardır: Bas enstrümanların yarattığı rezonans ve yüksek frekanslı enstrümanların yarattığı kamaşma (Halmrast 2013). Oda rezonansları ve oluşan modların etkisiyle farklılaşan ses alanının değerlendirilmesi amaçlı rezonansların algılanabilirliği ilgili dinleme testleri vasıtasıyla yapılan pek çok çalışma bulunmaktadır. Q-faktör ve modal düşme süresi parametreleri ile odanın frekans cevabı analiz edilerek rezonansların algılanabilirliği ve algı ilişkisi elde edilmektedir. Fakat bu çalışmalar kayıt ve röprodüksiyon alanlarının akustik kalitesine yöneliktir (B. M. Fazenda, Stephenson, ve Goldberg 2015; Wankling, Fazenda, ve Davies 2012).

Nesnel akustik parametrelerin yanı sıra tasarım aşamasında hacim kalitesinin ve fiziksel parametrelerin ses alanında yarattığı değişimlerin değerlendirilmesinde, optimum değer aralıklarının ve JND değerlerinin bilinmesi önemlidir. Fakat bu değerler sınırlı frekans bandı ve sınırlı hacim koşulları için bilinmektedir (Bradley 2010; TS EN ISO 3382 2010). Bu nedenle küçük hacimlerin değerlendirilmesine yönelik kullanılan nesnel akustik parametrelere ilişkin alçak frekanslar özelinde daha fazla çalışmanın yapılması gerekmektedir (Vorlander 1998).

Küçük müzik hacimlerinin tasarımında ya da iyileştirilmesinde özellikle alçak frekanslarda oluşan mod kusurlarının çözümü ve buna bağlı yeterli dağınıklığın sağlanması oldukça zordur. Hacim boyut optimizasyonu ile ilgili pek çok çalışma yapılmış ve son olarak uygun oran ve boyutlarla ilgili değerler ISO 23591:2021’de belirtilmiştir. Küçük hacimlerin tasarım aşamalarına bakıldığında uygun boyut ve oranların seçilmesi rezonans frekanslarının oluşumunun ve mod dağılımının belirlenmesi açısından tasarım çalışmasının ilk basamağıdır. Durağan dalga ve mod oluşumu ile ilgili erken çalışmalarda oda boyutları ile frekans ilişkisi kurulmuş, kapalı dörtgen hacimlerde, belirli frekanslarda sonsuz sayıda durağan dalga oluştuğu ortaya konmuştur (Beranek 1962). Bu modların uygun dağılımı ile ilgili Gurin ve Nixon 1945’te yaptıkları çalışmalarda yükseklik, derinlik ve uzunluk arasında olması gereken oda boyutları için modların gruplanmasını minimize edecek şekilde öneriler getirmişlerdir (Gilford 1979; Loudon 1971). Aynı zamanda Bolt’un oluşturduğu ölçüt

de benzer şekilde frekans mesafesine dayalıdır (Bolt 1947). Bonello'nun önerisi ise modların olduğu oktav bant açıklıklarının çok fazla olması durumunda frekans tepkisinde yarattığı tepe ve vadilerin artması kabulüne dayalıdır. Bonello'nun önerdiği diğer bir ölçüt de mod frekanslarının çakışmıyor olmasıdır (Bonello 1981). Oda boyutlarının belirlenmesi ile ilgili güncel çalışmalarda ise alçak frekanslarda ses alanının iyileştirilmesi amacıyla frekans tepkisinin düz bir eğriye sahip olması hedefleyen optimizasyon yöntemi tanımlanmıştır (Cox ve D'Antonio 2004).

Tasarım aşamasında doğru hacim ve boyut oranlarının seçilmesi öncelikli tasarım prensibi olmakla beraber, iyi bir akustik ortam için yeterli değildir. Bununla birlikte bazı tasarım ya da iyileştirme durumlarında hacim ve boyut oranlarının değişkenlik gösteremeyeceği durumlar oluşabilmektedir. Bu nedenle yapı elemanı ölçeğinde tasarım, hacimlerin akustik konforunun sağlanmasında önemli rol oynamaktadır. Bununla birlikte yüzey tasarımında, mod kontrolü amacıyla yaygın olarak uygulanan geniş bant yutucu sistemler total bir ses azalımı (total attenuation) oluşturması nedeniyle için müzisyenler açısından tını değişimi, desteğin azalması, yetersiz reverberasyon gibi olumsuz akustik koşullara neden olabilmektedir. Aynı zamanda yetersiz ses yüksekliği, çalma dinamik aralığını yükseltmekte ve fazla efora neden olmaktadır (International Standard Organization 2021; Kalkandjiev 2015; Sinal ve Yilmazer 2018). Yutucu sistemlerin dışında saçıcı sistemlerin uygulanması ile sesin homojen dağılımı, yankı yollarının kırılması, odaklanmanın önlenmesi, ve kamaşmanın engellenmesi sağlanabilmektedir (Shtrepi vd. 2016). Saçıcı yüzeylerin oda modlarına olan etkisi incelendiğinde, sınır koşullarında saçıcılığın artırılması ile mod oluşumunun arttığı, buna bağlı mod aralıklarının azaldığı ve frekans tepkisindeki düzleşme sağlandığı gözlenmiştir. Bununla birlikte alçak frekanslarda etkin bir saçıcı tasarımı için dalga boyuna uygun olarak derinliğin artması hacim kaybına neden olmaktadır. Aynı zamanda saçıcı sistemin etkin alanı için gerekli olan minimum mesafe nedeniyle sistemden yeteri kadar yararlanılamamaktadır. Yutucu ve saçıcı sistemlerin yanı sıra saçıcı ve yutucu sistemin beraber kullanılması ile oluşturulan hibrit sistemler de oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır (Cox ve D'Antonio 2004).

Literatürde ses alanı dağınıklığının değerlendirilmesi üzerine pek çok yöntem geliştirilmiştir (Çizelge 1.3). İlk yöntem azalım eğrisinin uzamsal olarak dağılımının değerlendirilmesidir. Buna göre farklı alıcı noktalarında elde edilen ani uyarı

cevabının azalım eğrisine bakılarak farklı alıcı noktalarındaki standart sapması elde edilir. Diğer bir yöntem, küresel mikrofon diziliminden elde edilen yöne bağlı enerji akışının değerlendirildiği eş yönlülük analizidir. Benzer şekilde dolaylı bir yöntem de ani uyarı yanıtında oluşan sapmaların değerlendirildiği yöntemdir. Bu yöntemde uyarı yanıtındaki sapmaların az olması dağınıklığın artışı ile ilişkilendirilir. Dağınıklığın değerlendirilmesinde diğer indirekt yöntem ise yutucu bir sistemin ölçümü ile sağlanmaktadır. Yutucu malzemenin ses yutma katsayısının artışı hacim içerisindeki akışın dağınıklaşmasıyla ilişkilendirilir.

Çizelge 1.3 : Dağınıklığın değerlendirilmesine ilişkin araştırma ve standartlar (Zhang ve Lee 2021)

Kategori	Metrikler	Referans	Ölçüm Yöntemi	Tanımlama
Türdeşlik (Homogeneity)	Azalım süresinin standart sapması	ASTM C423-17	Farklı noktalarda azalım hızının sabit alıcı noktalarında ölçümü	Ses alanı boyunca elde edilen düşük sapma değeri yüksek dağınıklığı gösterir.
	Güven aralığı	ASTM E90-09		
	Reverberasyon süresinin uzamsal standart sapması	Bartel&Magrab, Davy		
	Uzamsal tekdüzelik (spatial uniformity)	Wang et al.		
Eş yönlülük (Isotropy)	Dağınıklığın değerlendirilmesi	Lokki	Küresel mikrofon dizilimi ile enerji akışı yönü analiz edilir.	Her yönden eş yönlü enerji akışı yüksek dağınıklığı gösterir.
	Yönelime bağlı dağınıklık	Gover et al.		
	Küresel harmonik kovaryans matrisi	Epain&Jin		
	Dalga sayısı spektrumu	Nolan et al.		
Dolaylı yöntem	Tepe sayısı	Jeon et al.	Ani uyarı yanıtının detaylarının analizi	Erken azalımı ani uyarı yanıtındaki sapmaların az olması yüksek dağınıklığı göstermektedir.
	Kurtosis	Jeong		
	Karışma zamanı (mixing time)	Prislan		
	Zaman sapmasının derecesi	Hanyu et al.		
	Maksimum ses yutum katsayısı	ISO 354:2003	Saçıcı panellerin artırılarak ses yutma katsayısının maksimize edilmesi	Optimum dağınıklığı elde edilmesi maksimum yutuculuğun sağlandığı noktada mümkündür.

Çizelge 1.3'te belirtilen yöntemlere ek olarak istatistiksel olarak frekans tepkisi ve uzamsal dağılımının değerlendirildiği MSV (Mean Spatial Variance) ve VSA (Variance of Spatial Mean) ölçütleri, ses alanının dağılımının spektral içeriği üzerinden ve alıcı konumuna bağlı olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır (Welti ve Devantier 2006). Bu çalışma küçük odalarda ideal kaynak (hoparlör) konumunun belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Ölçütlerin açılımı aşağıdaki gibidir.

$$MSV = Ort(var_s(R(s,f))), dB \quad (1.1)$$

$$VSA = Var(ort_s(R(s,f))), dB \quad (1.2)$$

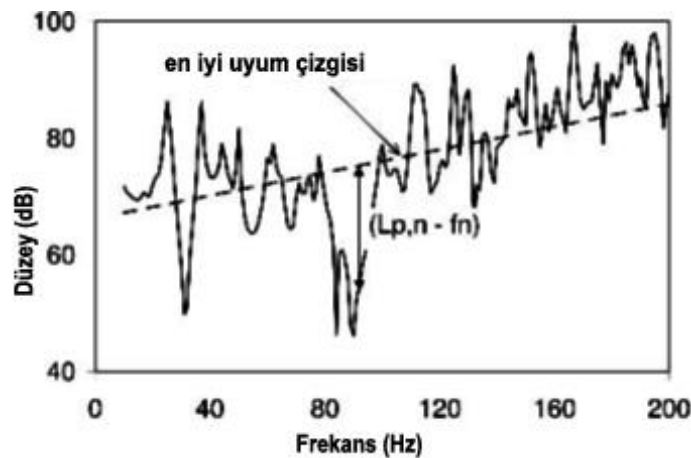
$$R = L_{p,ref} - L_{p,s} \quad (1.3)$$

$L_{p,s}$: S alıcı noktasındaki ses basınç düzeyi (dB)

$L_{p,ref}$: En iyi uyum eğrisi değeri (best fit line)

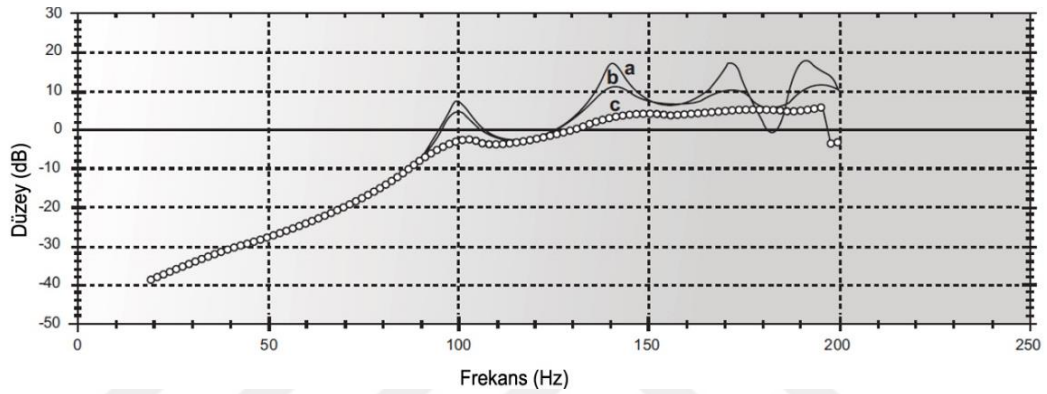
R (residual): En küçük kareler yönteminden (least square method) elde edilen en iyi uyum eğrisi (best fit line) sapma miktarı

Frekans spektrumundaki sapma azaltımının hedef fonksiyon olarak tanımlandığı pek çok optimizasyon çalışması bulunmaktadır. Buna göre sapmanın fazla olması dağılım azalımı ile ilişkilendirilmektedir ve optimizasyon sürecindeki tekrarlanan hesaplamalar ile oda boyutları ya da yüzey formu idealize edilmektedir. Şekil 1.4'te test edilen bir odanın iyileştirme öncesindeki frekans cevabı verilmiştir. Frekans cevabından elde edilen regresyon eğrisinin en iyi uyum eğrisine kadar olan mesafe hesaplanmaktadır ($L_{p,n} - f_n$). Böylece bu sapmaların azaltılması ile oda ses alanı dağılımlaştırılarak idealize edilmektedir (Cox, D'Antonio, ve Avis 2004).



Şekil 1.4 : En iyi uyum eğrisinin optimizasyon işleminde kullanılması (Cox vd. 2004)

Benzer bir çalışmada hacmin tasarım optimizasyonu amaçlı frekans tepkisindeki sapmalar azaltılmaya çalışılmıştır. Şekil 1.5'te odanın frekans tepkisi ve uygulanan akustik düzenlemelere bağlı olarak eğrinin değişimi gösterilmiştir. Buna göre L_{pn} , n noktasındaki ses basınç düzeyinin en iyi uyum eğrisinden sapma miktarını ifade etmektedir. Rezonansların etkisi arttıkça frekans tepkisindeki tepe ve çökmeler artmaktadır. Uygulanan yutucu sistemlerin alanı arttıkça eğrideki sapmalar azalmakta, frekans tepkisi düzleşmektedir. Dolayısıyla hacimdeki sönümlenme oranı arttıkça rezonansların etkinliğinin azalmasına bağlı olarak frekans tepkisindeki düzlük artmaktadır (R. Bistafa vd. 2012).



Şekil 1.5 : Oda frekans tepkisi a) akustik düzenleme olmadan, b) ortalama bir akustik düzenleme ile, c) optimize edilmiş akustik düzenleme (R. Bistafa vd. 2012)

Değerlendirme ve tasarım yöntemlerine ilişkin yapılan çalışmalar, tasarımda optimizasyon sürecinin gerekliliğini göstermektedir. Fakat optimizasyonun gerçekleşebilmesi için hedef kriterlerin, fonksiyonun, optimum değer aralıklarının ve yöntemin tanımlanmış olması beklenir. Yapılan optimizasyon çalışmalarında frekans cevabının düzleşmesine yönelik hedef fonksiyonlar tanımlanmaktadır. Bu durumda frekans cevabının yumuşatılması ya da sapmaların azaltılması ortam yutuculuğu devreye girdiğinde yutuculuğun artmasına yönelik bir iyileştirme önermektedir. Fakat bu yöntemde oluşan frekans cevabının analizi algı ile ilişkili değildir ve ortamın gereğinden fazla yutucu olmasına neden olabilmektedir. Sonuç olarak kullanılan optimizasyon yöntemlerinin algı ile ilişkilendirilmesi bu anlamda önemlidir. Buna karşın küçük odaların tasarımı ve değerlendirilmesine yönelik alçak frekansların müzisyen algısındaki etkisi ile ilgili oda ölçeğinde çok az çalışmanın olduğu görülmektedir. Özellikle fark eşiği (JND) ile ilgili çalışmaların çok sınırlı olduğu belirlenmiştir.

1.4.2 Çalışmada kullanılan standartlar

1.4.2.1 ISO 23591:2021 Prova odaları ve mekanları için akustik kalite ölçütleri (Acoustic quality criteria for music rehearsal rooms and spaces)

Prova odaları ile ilgili yeni yayınlanan ISO 23591:2021 “Acoustic quality criteria for music rehearsal rooms and spaces” standardı, bu mekanlarda yapılan icranın özellikle müzisyenlerde ses yüksekliğine bağlı işitme kusurlarına neden olmaması ve aynı zamanda akustik kalitenin artırılması amacıyla akustik kalite ölçütlerinin tanımlanmasını sağlamıştır. Daha önce yayınlanmış olan “NS 8178:2014 - Acoustic criteria for rooms and spaces for music rehearsal and performance” isimli Norveç standardı (Rindel 2014) geliştirilerek ISO tarafından ISO 23591:2021 olarak yeniden yayınlanmıştır (International Standard Organization 2021). Bu standartta bir prova odasının sahip olması gereken hacim ve reverberasyon süresi aralığı, prova sırasında kullanılan enstrümanın ses gücüne, sayısına, dinamik ifadesine ve müzik tipine göre belirlenebilmektedir. Yönergeler 3 farklı müzik tipine göre tanımlanmıştır: sessiz akustik müzik, yüksek sesli akustik müzik ve yükseltilmiş akustik müzik. Sessiz müzik, ses yükseltici kullanılmadan akustik enstrümanların yarattığı 95 dB’den az ses gücü düzeyine sahip müziktir. Yüksek müzik ise akustik enstrümanların yarattığı 95 dB’ye eşit ya da daha yüksek ses gücü düzeyine sahip müzik düzeyidir.

Çizelge 1.4’te alçak sesli müzik amaçlı prova odalarının sahip olması gereken özellikler farklı hacim boyutları için tanımlanmıştır. Buna göre kişi sayısı arttıkça alan, yükseklik, reverberasyon süresi, ortalama yükseklik gibi değerler belirli bir oran dahilinde artmaktadır. Bununla birlikte hacimden bağımsız olarak bütün oda tiplerinde düzgün mod dağılımının sağlanması amacıyla uygun boyut oranlarının kullanılması gerektiği önerilmektedir. Akustik düzenlemelerde ise yine oda boyutundan bağımsız olarak bütün oda tiplerinde uygun reverberasyon süresini ve ses düzeyini sağlayacak şekilde duvar yutucu, tavan yutucu, bas yutucu ve dağıtıcı sistemlerin kullanılması gerektiği görülmektedir. Fakat yeterli ses düzeyini sağlamak amacıyla duvar yutucuları opsiyonel olarak önerilmiştir. Bas yutucular ise hacimden bağımsız olarak her koşulda önerilmiştir.

Çizelge 1.5’te yüksek sesli müzik amaçlı prova odalarının sahip olması gereken özellikler farklı hacim boyutları için tanımlanmıştır. Enstrüman ses gücü arttıkça hacim gereksinimi de artmaktadır. Yine hacim boyutları arttıkça yeterli ses düzeyini

sağlamak amaçlı duvar yutucularının kullanımı önerilmemiş, reverberasyon kontrolünün daha çok tavan yutucu sistemleri ile sağlanması önerilmiştir.

Çizelge 1.6’te yükseltilmiş sesli müzik amaçlı prova odalarının sahip olması gereken özellikler farklı hacim boyutları için tanımlanmıştır. Diğer hacimlerden farklı olarak bu hacimlerde arka plan gürültü hassasiyetinin azalması nedeniyle arka plan gürültü düzeyinin üst limit değeri 30 dB olarak tanımlanmıştır. Müzik türünden ve hacimden bağımsız olarak her durumda oda duvarlarının açılandırılması yankı kontrolü açısından önerilmiş, mümkün olmayan durumlarda ise dağıtıcı sistemlerin kullanılmasının gerekliliği vurgulanmıştır.

Çizelge 1.4 : Alçak sesli müzik icrası için tasarlanan prova odalarının özellikleri (International Standard Organization 2021)

Alçak sesli müzik amaçlı prova odası özellikleri				
Özellik	Bireysel çalışma için oda	Küçük topluluklar için oda	Orta büyüklükte topluluklar için oda	Büyük topluluklar için oda
Müziyen sayısı	1-2	3-12	13-30	20-25 (yaylı orkestra), 30-80/100 (koro)
Topluluk türü	Alçak sesli topluluk	Alçak sesli topluluk	Alçak sesli topluluk	Alçak sesli topluluk
Net hacim	$\geq 35 \text{ m}^3$	$> 25 \times N \text{ m}^3$	$> 25 \times N \text{ m}^3$	$> 25 \times N \text{ m}^3$
Net alan	$\geq 13 \text{ m}^2$ ^a	$\geq 20 \text{ m}^2$ - 40 m^2 (müziyen sayısına bağlı)	$\geq 40 \text{ m}^2$ - 70 m^2 (müziyen sayısına bağlı)	$\geq 50 \text{ m}^2 + 1.5 * N \text{ m}^2$
Net ortalama yükseklik	$\geq 2,7 \text{ m}$	$\geq 3,5 \text{ m}$	$\geq 4,5 \text{ m}$	$\geq 5 \text{ m}$ ^c
Oda geometrisi ^b	Yeterli boyut oranı	Yeterli boyut oranı	Yeterli boyut oranı	Yeterli boyut oranı
Akustik düzenleme ^c	(WA), CA, BA, D	(WA), CA, BA, D	WA, CA, BA, D	WA, CA, BA, D
Reverberasyon süresi, T	İlgili grafiğe bakınız.			
Arka plan gürültü düzeyi ^d	İlgili standarda bakınız ya da önerilen düzeyi kullanınız $L_{pAT}=25\text{dB}$.			

NOT: Ses güçlülüğü net hacim ve reverberasyon süresi ile ilişkilidir. Ses güçlülüğünün değerlendirilmesi ve enstrümanların ses gücü düzeyi için ilgili çizelgeleri inceleyiniz.

Dipnotlar

CA= Tavan yutucusu, WA= Duvar yutucusu, BA= Bas yutucusu, D= Dağıtıcı

^a Bir ya da iki kişiye kadar öğretimi kapsar

^b Oda boyutları için boyut oranlarının verildiği şekle bakınız. Oda duvarları 5°-7° arası ya da daha fazla açılabilir ya da dış bükey formda uygulanabilir.

^c Farklı tipte enstrümanların çalınması ya da vokal durumunda değişken özellikte yutucu kullanılır.

^d Tonal sese sahip gürültü olmamalıdır. Arka plan gürültü düzeyi 63 Hz'de 45 dB'yi geçmemelidir.

^e Daha büyük topluluklarda daha yüksek ortalama yükseklik değerine ihtiyaç olabilir.

Çizelge 1.5 : Yüksek sesli müzik icrası için tasarlanan prova odalarının özellikleri
(International Standard Organization 2021)

Yüksek sesli müzik amaçlı prova odası				
Özellik	Bireysel çalışma için oda	Küçük topluluklar için oda	Orta büyüklükte topluluklar için oda	Büyük topluluklar için oda
Müzisyen sayısı	1-2	3-12	13-24	>25
Topluluk türü	Yüksek sesli müzik topluluğu	Yüksek sesli müzik topluluğu	Yüksek sesli müzik topluluğu	Yüksek sesli müzik topluluğu
Net hacim	$\geq 50 \text{ m}^3$	$>30 \cdot N \text{ m}^3$ ve "daha yüksek sesli gruplar" için $>50 \cdot N \text{ m}^3$	$>30 \cdot N \text{ m}^3$ ve "daha yüksek sesli gruplar" için $>50 \cdot N \text{ m}^3$	$>50 \cdot N \text{ m}^3$ ve "daha yüksek sesli gruplar" için $>60 \cdot N \text{ m}^3$
Net alan ^b	$\geq 15 \text{ m}^2$ ^a	^c	^c	$\geq 120 \text{ m}^2 + 2 \cdot N \text{ m}^2$
Net ortalama yükseklik	$\geq 3 \text{ m}$	$\geq 3,5 \text{ m}$	$\geq 4,5 \text{ m}$	$\geq 5 \text{ m}$ ^e
Oda geometrisi ^d	Yeterli boyut oranı	Yeterli boyut oranı	Yeterli boyut oranı	Yeterli boyut oranı
Akustik düzenleme ^e	WA, CA, BA	CA, BA, D	CA, BA, D, R	CA, BA, D, R
Reverberasyon süresi, T	İlgili grafiğe bakınız.			
Arka plan gürültü düzeyi ^f	İlgili standarda bakınız ya da önerilen düzeyi kullanınız $L_{pAT}=25 \text{ dB}$.			

NOT: "Daha yüksek sesli gruplar" senfoni orkestrası, bakır enstrüman gruplarını, perküsyon topluluklarını ya da ses gücü düzeyi 100 dB'yi geçen enstrümanlardan oluşan grupları tanımlamaktadır.

Dipnotlar

CA= Tavan yutucusu, WA= Duvar yutucusu, BA= Bas yutucusu, D= Dağıtıcı

^a Bir ya da iki kişiye kadar öğretimi kapsar.

^b Piyano ya da perküsyon gibi enstrümanların alan gereksinimi diğer tip enstrümanlara göre daha fazladır. Planlamada bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

^c Net alan, net hacim ve net yüksekliğin belirlenmesi ile hesaplanacaktır.

^d Oda boyutları için boyut oranlarının verildiği şekle bakınız. Oda duvarları 5°-7° arası ya da daha fazla açılabilir ya da dış bükey formda uygulanabilir.

^e Farklı tipte enstrümanların çalınması durumunda değişken özellikte yutucu kullanılır.

^f Tonal sese sahip gürültü olmamalıdır. Arka plan gürültü düzeyi 63 Hz'de 45dB'yi geçmemelidir.

^g Daha büyük topluluklarda daha yüksek ortalama yükseklik değerine ihtiyaç olabilir.

Çizelge 1.6 : Yükseltilmiş sesli müzik icrası için tasarlanan prova odalarının özellikleri (International Standard Organization 2021)

Yükseltilmiş müzik amaçlı prova odası				
Özellik	Bireysel çalışma için oda	Küçük topluluklar için oda	Orta büyüklükte topluluklar için oda ^a	Büyük topluluklar için oda ^a
Müzisyen sayısı	1-2	3-6	7-12	>12
Topluluk türü	Yükseltilmiş sesli müzik topluluğu	Yükseltilmiş sesli müzik topluluğu	Yükseltilmiş sesli müzik topluluğu	Yükseltilmiş sesli müzik topluluğu
Net hacim	≥35 m ³	≥60 m ³	≥200 m ³	≥400 m ³
Net alan	≥13 m ² ^c	≥20 m ²	≥60 m ²	≥100 m ²
Net ortalama yükseklik	≥2,7 m	≥3 m	≥3,5 m	≥4 m
Oda geometrisi ^d	Yeterli boyut oranı	Yeterli boyut oranı		
Akustik düzenleme ^e	WA, CA, BA, D	WA, CA, BA, D	WA, CA, BA, (D gerekli ise)	WA, CA, BA, (D gerekli ise)
Reverberasyon süresi, T	İlgili grafiğe bakınız.			
Arka plan gürültü düzeyi ^f	İlgili standarda bakınız ya da önerilen düzeyi kullanınız L _{pAT} = 30 dB.			

Dipnotlar

CA= Tavan yutucusu, WA= Duvar yutucusu, BA= Bas yutucusu, D= Dağıtıcı

^a Orta büyüklükte topluluklar ve büyük topluluklar için akustik gereksinimler aynı olabilir.

^b Yerel yönetmeliklerde farklılıklar olabilir.

^c Bazı enstrümanların alan gereksinimi diğer tip enstrümanlara göre daha fazladır. Planlamada bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

^d Oda boyutları için boyut oranlarının verildiği şekle bakınız. Oda duvarları 5°-7° arası ya da daha fazla açılabilir ya da dış bükey formda uygulanabilir. Eğer eğim mümkün değilse dağıtıcı kullanımı düşünülmelidir.

^e Alçak frekansların kontrolü gerekebilir. Odanın en kısa kenarı genelde bahsedilen durağan dalgaın sebebidir ve potansiyel olarak tavan yutucu sistemleri göz önünde bulundurulmalıdır.

^f Net hacmi 100 m³'ün altında olan odaların 63 Hz ve 125 Hz 1/1 oktav bantlarda oluşan modlar nedeniyle reverberasyon süresi eşik değeri farklı olabilir.

^g Arka plan gürültü düzeyi yükseltilmiş müzikte diğer müzik türlerinde olduğu kadar önemli değildir. Bu nedenle arka plan gürültü düzeyi 63 Hz'de 50 dB'yi geçmemelidir.

Reverberasyon Kriteri

Prova odaları için olması gereken reverberasyon süresi (T_{orta}) hacmin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki bağıntıya göre hesaplanır. Şekil 1.6'da hacim aralıklarına, müzik türüne (alçak sesli / yüksek sesli / yükseltilmiş sesli) göre ve oda tipine (prova odası / resital odası) bağıntıda kullanılması gereken sabit değerler verilmiştir. En alt bölgede bulunun yeşil çerçeveli bölge alçak sesli müzik, ortadaki mavi çerçeveli bölüm yüksek müzik ve üst kısımdaki kırmızı çerçeveli bölüm ise yükseltilmiş sesli müzik için tanımlanmıştır. Resital odaları için olması gereken süreler prova odalarına göre yüksektir. 63 Hz ve 4000 Hz arası 1/1 oktav bantlarda reverberasyon süresi tolerans limit değerleri Şekil 1.7 ve Şekil 1.8'de verildiği gibidir. Alt ve üst oktav bantlardaki tolerans aralıkları işitme hassasiyetine bağlı olarak değişmektedir. Ölçüm yapılması durumunda değişim toleransı değerleri için ek olarak $\pm 10 \%$ tolerans tanımlanmıştır.

$$T_{orta} = a \cdot \log(V) - b \quad (1.1)$$

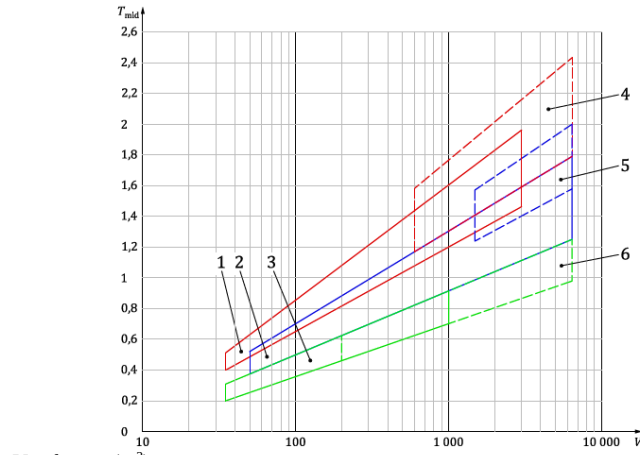
T_{orta} :500 Hz ve 1000 Hz'deki Reverberasyon sürelerinin ortalaması alınarak hesaplanır.

V: hacim (m³)

a ve b değerleri Çizelge 1.7'den elde edilir.

Çizelge 1.7 : Bağıntıda kullanılacak a ve b sabitlerinin, net hacim fonksiyonu olarak Reverberasyon süresine göre değerleri (International Standard Organization 2021)

Prova odaları	a	b	Minimum hacim V (m ³)	Maksimum hacim V (m ³)
Yükseltilmiş sesli müzik için alt limit değeri	0,325	0,335	35	1000
Yükseltilmiş sesli müzik için üst limit değeri	0,415	0,335	35	1000
Yüksek sesli müzik için alt limit değeri	0,415	0,335	50	6500
Yüksek sesli müzik için üst limit değeri	0,6	0,5	50	6500
Alçak sesli müzik için alt limit değeri	0,55	0,45	35	3000
Alçak sesli müzik için üst limit değeri	0,75	0,65	35	3000
Prova amaçlı resital odaları				
Yükseltilmiş sesli müzik için alt limit değeri	0,345	0,335	200	6500
Yükseltilmiş sesli müzik için üst limit değeri	0,415	0,335	200	6500
Yüksek sesli müzik için alt limit değeri	0,525	0,425	1500	6500
Yüksek sesli müzik için üst limit değeri	0,675	0,575	1500	6500
Alçak sesli müzik için alt limit değeri	0,6	0,5	600	6500
Alçak sesli müzik için üst limit değeri	0,83	0,73	600	6500



V hacim (m³)

T_{orta} orta frekansların ortalama reverberasyon süresi, (s)

1 prova odalarında alçak sesli müzik için üst ve alt limit değerleri (düz çizgi)

2 prova odalarında yüksek sesli müzik için üst ve alt limit değerleri (düz çizgi)

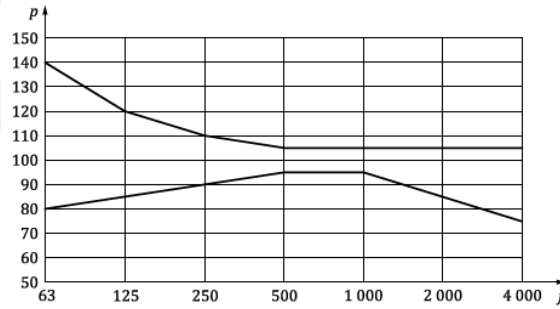
3 prova odalarında yükseltilmiş sesli müzik için üst ve alt limit değerleri (düz çizgi)

4 prova amaçlı resital odalarında alçak sesli müzik için üst ve alt limit değerleri (kesikli çizgi)

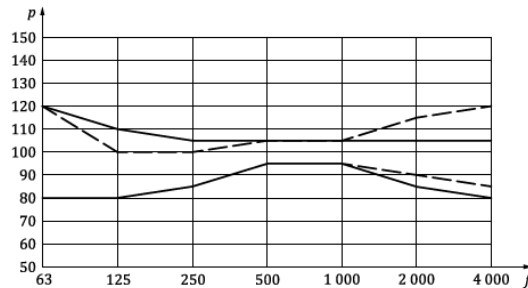
5 prova amaçlı resital odalarında yüksek sesli müzik için üst ve alt limit değerleri (kesikli çizgi)

6 prova amaçlı resital odalarında yüksek sesli müzik için üst ve alt limit değerleri (kesikli çizgi)

Şekil 1.6 : Farklı müzik tipleri için net hacme göre olması gereken reverberasyon süresi aralığı (T_{orta}) (International Standard Organization 2021)



Şekil 1.7 : Alçak sesli müzik için frekansa bağlı reverberasyon süresi değişimi tolerans aralığı (p : T_{orta} tolerans yüzdesi-% ve f oktav bandın merkez frekansı-Hz) Kesikli eğri ile belirtilen değerler resital odaları için tanımlanmıştır (International Standard Organization 2021).



Şekil 1.8 : Yüksek sesli müzik için frekansa bağlı reverberasyon süresi değişimi tolerans aralığı (p : T_{orta} tolerans yüzdesi-% ve f oktav bandın merkez frekansı-Hz) Kesikli eğri ile belirtilen değerler resital odaları için tanımlanmıştır (International Standard Organization 2021).

Odanın Ses Düzeyinin Hesaplanması ve Kontrolü

Odanın ses düzeyi, odanın ses güçlülüğüne, enstrüman sayısına ve enstrüman ses gücüne bağlıdır. Odanın ses güçlülüğü ise hacim ve reverberasyon süresi ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Ses güçlülüğünün hesaplanması Şekil 1.9’da verilen grafiğe göre yapılmaktadır. Elde edilen G değerine enstrümanların ses gücü toplamının logaritmik değeri eklenerek odanın ses düzeyi (L_p) elde edilir. Yine aynı bağıntı kullanılarak enstrüman sayısı ve ses gücüne bağlı olarak olması gereken G değeri hesaplanabilmektedir. Enstrümanların ses gücü bilgileri Çizelge 1.8’de verilmiştir. Standartta, odanın ses düzeyi (forte dinamik düzeyi için) en iyi durumda 85- 90 dB aralığı olarak belirlenmiş, forte dinamik düzeyinde oda ses düzeyinin 100 dB olması durumunda ise işitme kusurlarına neden olacağı belirtilmiştir.

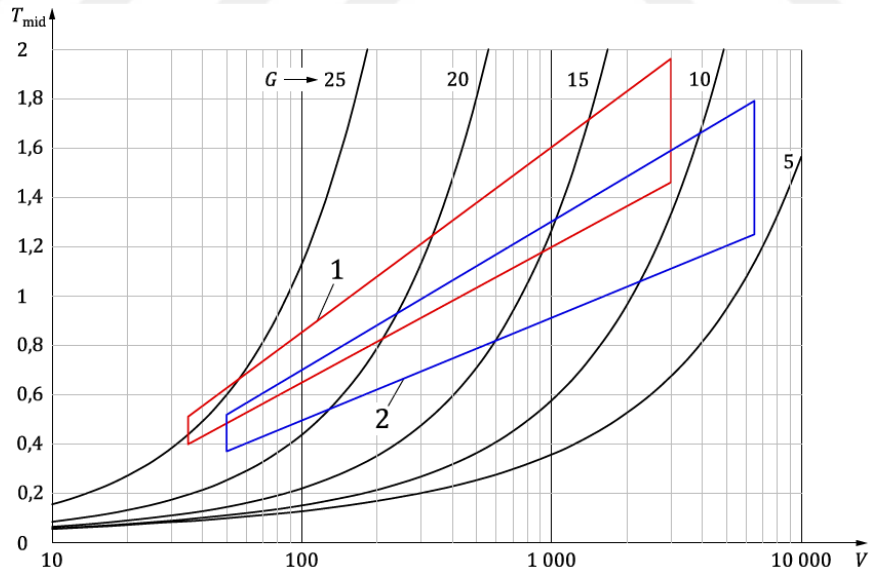
$$L_p = G + 59 + 10 * \log \frac{\sum_i n_i P_i}{mW} \text{ (dB)} \quad (1.1)$$

$$G = L_p - 59 - 10 * \log \frac{\sum_i n_i P_i}{mW} \text{ (dB)} \quad (1.1)$$

G: Ses güçlülüğü

n_i : Enstrümanların sayısı

P_i : Enstrümanın ses gücü



V hacim (m³)

T_{orta} orta frekansların ortalama reverberasyon süresi, (s)

G ses güçlülüğü (dB), 5 dB basamak aralıkları

1 prova odalarında alçak sesli müzik için üst ve alt limit değerleri (düz çizgi)

2 prova odalarında yüksek sesli müzik için üst ve alt limit değerleri (düz çizgi)

Şekil 1.9 : Hacim ve reverberasyon süresinin bir fonksiyonu olarak ses güçlülüğünün hesaplanması (International Standard Organization 2021)

Çizelge 1.8 : Farklı enstrümanların ses gücü düzeyi ve ses gücü bilgileri
(International Standard Organization 2021)

Enstrüman	Ses gücü düzeyi dB re 1pV	Ses gücü P mW	Referans
Keman	89	0,8	Meyer, 2009 (Meyer 2009)
Viyola	87	0,5	Meyer, 2009 (Meyer 2009)
Çello	90	1	Meyer, 2009 (Meyer 2009)
Kontrbas (arco)	92	1,6	Meyer, 2009 (Meyer 2009)
Kontrbas (pizzicato)	85	0,3	Burghauser, 1971 (Burghauser ve Špelda 1971)
Pikolo	95	3,2	Burghauser, 1971 (Burghauser ve Špelda 1971)
Flüt	91	1,3	Meyer, 2009 (Meyer 2009)
Obua	93	2	Meyer, 2009 (Meyer 2009)
Klarnet	93	2	Meyer, 2009 (Meyer 2009)
Bas klarnet	92	1,6	Burghauser, 1971 (Burghauser ve Špelda 1971)
Saksafon	98	6,3	Olsson, 1967 (Olsson 1967)
Fagot	93	2	Meyer, 2009 (Meyer 2009)
Fransız kornosu	102	15,8	Meyer, 2009 (Meyer 2009)
Kornet	101	12,6	-
Trompet	101	12,6	Meyer, 2009 (Meyer 2009)
Trombon	104	25,1	Burghauser, 1971 (Burghauser ve Špelda 1971)
Bas trombon	105	31,6	Burghauser, 1971 (Burghauser ve Špelda 1971)
Flugelhorn	100	10	-
Tenor korno	100	10	-
Euphonium	105	31,6	Burghauser, 1971 (Burghauser ve Špelda 1971)
Tuba	104	25,1	Meyer, 2009 (Meyer 2009)
Timpani	101	12,6	Olsson, 1967 (Olsson 1967)
Bas davul	102	15,8	Olsson, 1967 (Olsson 1967)
Snare davul	101	12,6	Olsson, 1967 (Olsson 1967)
Zil	98	6,3	Olsson, 1967 (Olsson 1967)
Üçgen	85	0,3	Burghauser, 1971 (Burghauser ve Špelda 1971)
Ksilofon	89	0,8	Burghauser, 1971 (Burghauser ve Špelda 1971)
Arp	92	1,6	Burghauser, 1971 (Burghauser ve Špelda 1971)
Akustik gitar	86	0,4	Olsson, 1967 (Olsson 1967)
Büyük piyano	93	2	Burghauser, 1971 (Burghauser ve Špelda 1971)
Organ	102	15,8	Olsson, 1967 (Olsson 1967)
Vokal, yetişkin	96	4	Meyer, 2009 (Meyer 2009)
Vokal, soprano	97	5	Burghauser, 1971 (Burghauser ve Špelda 1971)
Vokal, alto	93	2	Burghauser, 1971 (Burghauser ve Špelda 1971)
Vokal, tenor	95	3,2	Burghauser, 1971 (Burghauser ve Špelda 1971)
Vokal, bas	96	4	Burghauser, 1971 (Burghauser ve Špelda 1971)

Odaların Boyut Oranları

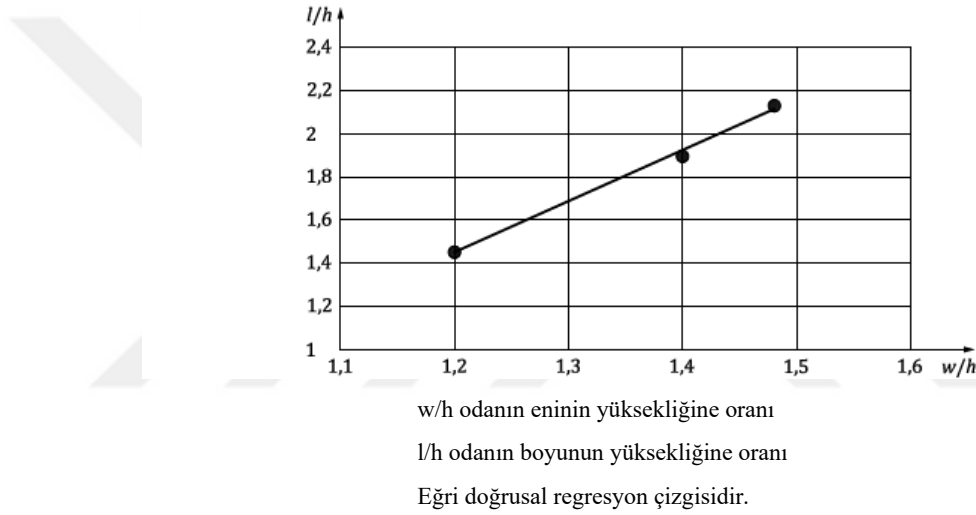
300 m³ altı odalar 20-200 Hz aralığı alçak frekanslarda modlara bağlı akustik kusurların azaltılması için 1:1,2:1,44 ve 1:1,4:1,89 ve 1:1,48:2,12 oranları önerilmiştir. Bu odalar için önerilen ideal oda boyut oranları regresyon eğrisi Şekil 1.10'daki gibidir. Optimum oranların verildiği regresyon eğrisine ait denklem aşağıdaki gibidir.

$$\frac{l}{h} = 2,36 \times \frac{w}{h} - 1,38$$

l: oda uzunluğu

w: oda eni

H: oda yüksekliği



Şekil 1.10 : İdeal boyut oranı için standartta belirtilen regresyon eğrisi (International Standard Organization 2021)

300 m³ üzeri odalarda ise modların daha az öncelikli olduğu belirtilmekte, fakat yine kübik oda boyutundan kaçınılması gerektiği ve ses alanı dağınıklık sorunu nedeniyle uzunluk/en oranının 1.6'yı geçmemesi gerektiği belirtilmiştir.

Prova odalarında yüksek reverberasyon süresine bağlı olarak müzisyenin daha düşük düzeyde çalmasına neden olacaktır. Bu da dinamik ifadenin değişmesine neden olmaktadır. Diğer bir yandan, hacim arttıkça yetersiz kalan reverberasyon süresi ve ses düzeyi nedeniyle çalma performansının değiştiği, yetersiz kalan reverberasyon süresinin daha yüksek dinamik ifade ile çalınarak kompanse edildiği durumlar oluşmaktadır. Bu da yine dinamik ifadenin değişmesine neden olmaktadır. Bu nedenle reverberasyon süresinin azaltılması yerine rezonansların çözümüne yönelik etkin bir yutucu sistem tasarımı gerekmektedir.

1.4.2.2 TS EN ISO 3382-1:2010 Akustik- Odaların akustik parametrelerinin ölçülmesi -Bölüm 1: Gösteri mekanları (ISO 3382-1-2009)

Bu standart gösteri mekânlarındaki reverberasyon süresi ölçüm yöntemlerini ve diğer odaların akustik parametrelerini kapsamaktadır (TS EN ISO 3382 2010). Standartta aynı zamanda fark eşiği (JND) değerleri ve gösteri mekanları kapsamında optimum değerler tanımlanmıştır.

Doluluk durumu

Ölçüm sırasında ölçüm amacına göre odanın doluluk durumunun belirtilmesi gerekmektedir. Çalışmada stüdyo durumu seçilmiştir. Stüdyo durumu dinleyicinin bulunmadığı, sadece olağan sayıda sanatçı, konuşmacı ve tekniker gibi diğer kişilerin bulunduğu bir odanın (konuşma ve müzik odaları) durumudur (Örnek olarak ses kaydı yapılırken veya prova sırasında).

Kaynak ve mikrofon konumları

Kaynak konumları odadaki doğal ses kaynaklarının normal olarak bulunduğu yerlerde olmalıdır. Kaynağın akustik merkezinin yüksekliği yerden 1,5 m yukarıda olmalıdır. Mikrofon konumları tercihan birbirinden en az 2 m mesafede olmalıdır. Zemin de dahil olmak üzere, herhangi bir mikrofon-konumu ile en yakın yansıtıcı yüzey arasındaki mesafe, yaklaşık 1 m olmalıdır. Destek parametresinin ölçümünde ise farklı kaynak ve mikrofon konumları kullanılır. Destek_{erken} (ST_{erken}) ve destek_{geç} (ST_{geç}) için mikrofon çok yönlü hoparlörün akustik merkezinden 1 metre uzakta yerleştirilir ve yansıtıcı yüzeyler veya cisimler ile ölçüm konumu arasındaki mesafe 2 metreden daha fazla olmalıdır. Ayrıca hoparlör ile mikrofon, zeminden 1 m veya 1,5 m yukarıda aynı yükseklikte olmalıdır.

Uyarı Yöntemi

Bu standartta reverberasyon süresinin ölçülmesi için kesintili gürültü yöntemi ve integrali alınmış uyarı cevabı yöntemi olmak üzere iki yöntem tanımlanmıştır. Kesintili gürültü yönteminde sinyal, geniş bantta rastgele veya sözde rastgele elektriksel gürültüden elde edilir. İntegrali alınmış uyarı cevabı yönteminde ise bir odadaki kaynak konumundan alıcı konumuna uyarı cevabı, birçok farklı yoldan (örnek olarak silah atışı, kıvılcım aralığı uyarısı, gürültü patlaması, cıvıldaama veya sinyal olarak (MLS'ler kullanılarak) ölçümü yapılabilen iyi tanımlanmış bir niceliktir.

1.4.2.3 TS EN ISO 3382-2:2009 Akustik- Odaların akustik parametrelerinin ölçülmesi- Bölüm 2: Sıradan odalarda reverberasyon süresi (ISO 3382-2:2008)

Bu standart sıradan (300 m³'ten küçük) odalarda reverberasyon süresi ölçüm yöntemlerini kapsamaktadır (TS EN ISO 3382-2 2009). Bu standart, ölçüm işlemlerini, ihtiyaç duyulan gereçleri, gerekli ölçüm konumu sayısı, eğrilik derecesi gibi ölçüm belirsizliklerine ilişkin tespit ölçütleri tanımlanmıştır. Yönergeler ölçüm yöntemine göre değişmektedir. Survey yöntemi, gürültü kontrol amaçlı olarak oda sönümleme değerinin değerlendirilmesi ve hava ile yayılan ve darbe ses yalıtımı survey ölçümleri için uygundur. Mühendislik yöntemi, reverberasyon süresi veya oda sönümleme özelliklerinin karşılaştırılması amacı ile bina performansının kontrol edilmesi için uygundur. Yüksek doğruluk derecesine sahip ölçümlerin gerektiği durumlarda hassasiyet yöntemi kullanılmalıdır.

Bir odada ölçülen azalım eğrisi genellikle düşük derecede doğrusal olmayan eğrilerdir. Bu davranışın sebebi, azalımın, farklı azalım oranlarına sahip azalım modlarının karışımı temsil ediyor olmasıdır. Modların etkin olduğu ya da yutucu sistemlerin eşit dağılmadığı durumlarda azalan ses alanı dağınıklığına bağlı olarak modlar çok farklı azalım oranlarına sahip olmaktadır. Doğrusal olmayan azalım eğrisi, ölçümler kullanılarak hesaplanmış reverberasyon süresinin azalım eğrisinin hangi kısmının kullanıldığına bağlı olduğu anlamına gelir. Dolayısı ile sonuç, azalım eğrisinin doğrusal olduğu durumdan daha az güvenilirirdir.

Eğrilik parametresi C, 20 dB ve 30 dB olmak üzere iki hesaplanma aralığına dayanmaktadır ve tam düz bir çizgiden yüzde sapma olarak tanımlanmaktadır.

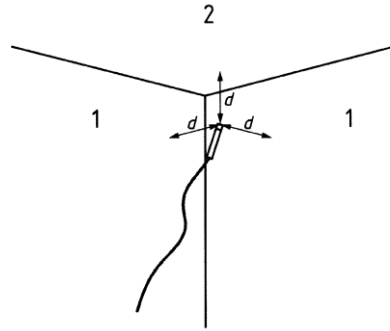
$$C = 100x \left[\frac{T_{30}}{T_{20}} - 1 \right] \quad (1.1)$$

C'nin tipik değerleri %0 ile %5 arasındadır. %10'dan yüksek değerler azalım eğrisinin düz bir çizgi olmadığını gösterir ve azalım eğrisi kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanan reverberasyon süresi şüpheli olabilir.

1.4.2.4 TS EN ISO 16283-1:2014 Akustik- Yapıların ve yapı elemanlarının ses yalıtımı için sahada yapılacak ölçümler- Bölüm 1: Hava ile yayılan sesin yalıtımı (ISO 16283-1:2014)

Bir yalıtım ölçüm standardı olan ISO 16283-1:2014'te "Binalarda ve yapı elemanında ses yalıtımı saha ölçümü – hava doğuş ses yalıtımı" 25 m³ ten küçük hacimlerde alçak

frekans değerlendirmesi için reverberasyon suresi lm prosedürü tanımlanmıştır (TS EN ISO 16283-1 2014). Standarda göre düşük frekans aralığı merkez frekansı 50 Hz, 63 Hz ve 80 Hz olan 1/3 oktav bantlar olarak belirlenmiştir. Hoparlör konumuna bakıldığında oda sınırları ile hoparlörler arasındaki mesafe en az 0,5 m olmalıdır. Bu mesafe duvardan en yakın hoparlörün merkezine kadar ölçülmelidir. Farklı hoparlör konumları, 0,7 m'den daha az uzaklıktaki oda sınırlarına paralel düzlemler içinde yerleştirilmemelidir. Farklı konumlar arasındaki mesafe 0,7 m olmalıdır. En az iki konum arasındaki mesafe 1,4 m olmalıdır. Düşük frekans işlemi için sabit bir mikrofon oda köşelerinde, köşeyi oluşturan oda sınırlarından 0,3 m ile 0,4 m arasında bir mesafede konumlandırılmalıdır. Köşeleri oluşturan her bir sınırdan olan mesafe aynı olmak zorunda değildir. Örneğin, bir oda sınırından 0,3 m, bir oda sınırından 0,35 m ve diğer oda sınırından 0,4 m mesafede konumlandırılmış olabilir (şekil1.11). Mikrofon konumları arasındaki mesafe en az 1 m olmalıdır. Hoparlörler sıklıkla bir köşeye yakın konumlandırıldıklarında, bu şartın anlamı ölçümlerin hoparlörlerin konumlandığı herhangi bir köşede yapılamayacağıdır.



şekil 1.11 : Köşe mikrofon konumu gösterimi. d mesafesi 0,3 ile 0,4 m arasında olmalıdır (TS EN ISO 16283-1 2014).

Küçük odalarda, 50 Hz, 63 Hz ve 80 Hz 1/3 oktav bantlarda azalma eğrisini etkileyecek daha az mod vardır ve belirgindir. Dolayısıyla, 1/3 oktav bantlarda elde edilen azalma eğrilerinde 20 dB ve 30 dB değerlendirme aralıklarının hassasiyeti daha yüksektir. Çünkü tek eğimli azalma eğrileri genelde her bir frekans bandında mod yoğunluğu fazla ise oluşmaktadır. zm için 63 Hz 1/1 oktav bant filtresi kullanılması önerilmiştir.

2. KÜÇÜK HACİMLERDE SES ALANI OLUŞUMU VE AKUSTİK DEĞERLENDİRME PARAMETRELERİ

Kapalı hacimlerde hareket eden ses, hacim sınırlarından yansıyarak ilerler ve yansıyan ses dalgası, yüzeyin yansıma özelliklerine göre değişkenlik gösterir. Bununla beraber ses dalgasının frekansı, yansıma yaptığı yüzeyin boyut ve şekli ses dalgasının oluşumunu ve özelliklerini belirler. Büyük hacimlerde birçok yansıma sonrası oluşan durağan durum önemli iken, küçük hacimlerde birkaç yansıma sonrası alıcı noktasında oluşan ses alanı ses algısını belirler (Kleiner 2014). Küçük hacimlerde hacim içerisindeki hava, katı bir cisimle benzer fiziksel özellikleri gösterir. Buna göre, belirli bir tahrik sonrasında ses dalgası, odanın boyutlarına, şekline, sönümlenmesine ve duvarların akustik özelliklerine bağlı olarak belirli rezonans frekanslarında ve yönelimde yerleşirler. Hacim içerisindeki diğer rezonant olmayan frekanslarda titreşim oluşsa da tahrikin sonra ermesiyle beraber enerji rezonant frekanslara kayar. Belirli frekansların tahriki ve bu frekanslarda oluşan ses basıncı farklılıkları ile hacim içerisinde farklı noktalarda oluşan ses basıncı dağınık olmayan bir ses alanı oluşturur ve dağınık ses alanı teorisi ile tam olarak açıklanamaz. Dağınık alan teorisi, enerji yoğunluğunun hacim içerisinde her noktada aynı olduğunu ve hacmin herhangi bir noktasından eşit olasılıkla ses geleceği varsayımına dayanır. Dağınık olmayan bir alanda ise sesin büyümesi ve yüzey sönümlenmesinin ardından oluşan yansımalar ile odanın belirli noktalarında direkt ses ve yansımaların etkileşimine bağlı olarak ses basıncı yükselir ya da azalır. Bir hacimde ancak boyutlar yeterince büyük ise yansıma yoğunluğu yeterlidir ve böylelikle ses alanı istatistiksel bir model olan dağınık alan olarak tanımlanabilir (Hodgson 1996).

Rezonansların etkisinin azaldığı ve dağınık bir ortama geçişin yapıldığı ayırım, tam olarak belirgin olmasa da Schroeder teorisi ile açıklanabilmektedir. Özellikle yüksek frekans bölgesi sınırı olarak alınan Schroeder frekansı altında kalan hacimlerde frekans cevabı değerlendirmeleri mod oluşumuna göre yapılmıştır. Hacmin modal yapısına dayanan Schroeder teorisine göre eğer kritik frekans işitme aralığında değilse bir hacim fiziksel olarak “büyük” olarak değerlendirilebilir (Schroeder ve Kuttruff 1962).

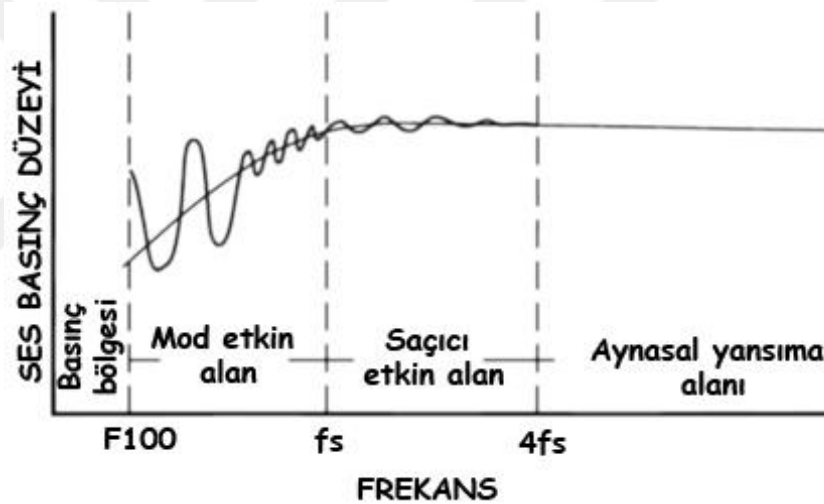
$$V > \left(\frac{2000}{f_s}\right)^2 T \quad (2.1)$$

f_s : Schroeder frekansı, kritik frekans (Hz)

V : Hacim (m^3)

T : Reverberasyon süresi (s)

Şekil 2.1’de verilen grafikte durağan halde oda akustik cevabını kontrol eden değişkenler belirtilmektedir. Akustik alanın kontrolünde kullanılan sistemlerin etkinliği bu frekans ayırımına göre belirlenebilmektedir. Örneğin mod kontrol alanında ($<f_s$, kritik frekans) diyaframatik yutucu sistemler etkin iken Schroeder tip hacimsel saçıcı sistemler (ör: QRD tip saçıcılar) saçıcı etkin alanda (f_s-4f_s) etkin olmaktadır. Aynasal yansımaların olduğu daha yüksek frekanslarda ($>4f_s$) ise yankı yollarının spesifik olarak değerlendirilmesi ve çözülmesi gerekmektedir (Davis, Patronis, ve Brown 2013).



Şekil 2.1 : Hacimlerde Schroeder frekans bölgelerine göre sesin davranışı (Davis vd. 2013)

2.1 Kapalı Hacimlerde Ses Alanı Oluşumu

Her ses dalgası, ortam parçacıklarının ortalama pozisyonundaki titreşimidir ve ses dalgası, bu parçacıkların yer değiştirmesi ile açıklanabilmektedir. Fakat, akustik miktarını hesaplamada parçacık yer değiştirmesinden ziyade parçacık hızını hesaplamak daha kullanılır yöntemdir. Dalga denklemlerinde, basınç değişimi, parçacık hızı ve diğer parametreler, açısal frekans ile hesaplanmaktadır. Dalga teorisi, hacimdeki ses alanının zamandan bağımsız olarak dalga denklemi ile açıklanmasıyla

ifade edilir. Kapalı hacimlerde ses alanı aşağıdaki bağıntı ile tanımlanır (Kuttruff 2009).

$$\Delta p + k^2 p = 0 \quad k = \frac{\omega}{c} \quad (2.2)$$

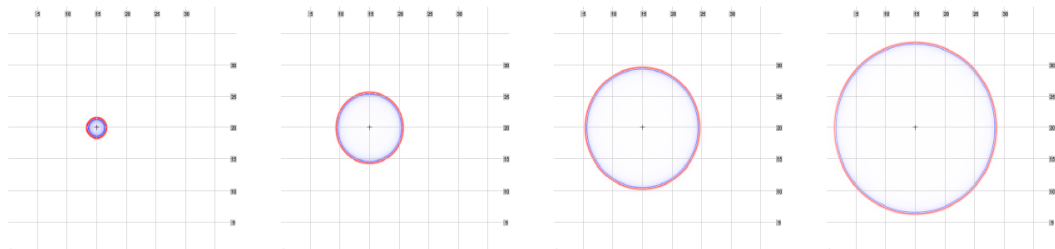
p : ses basıncı (Pa)

ω : açısal frekans (rad/s)

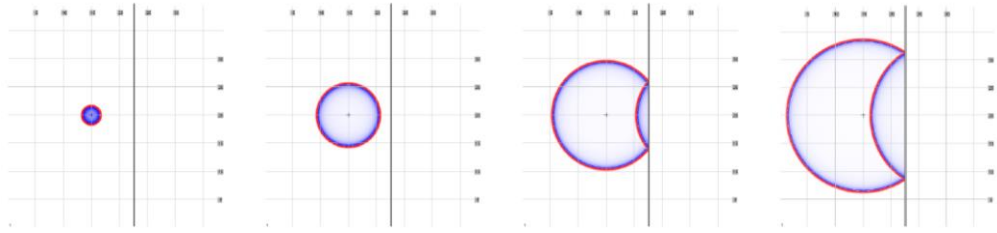
c: sesin hızı (m/s)

k: dalga sayısı

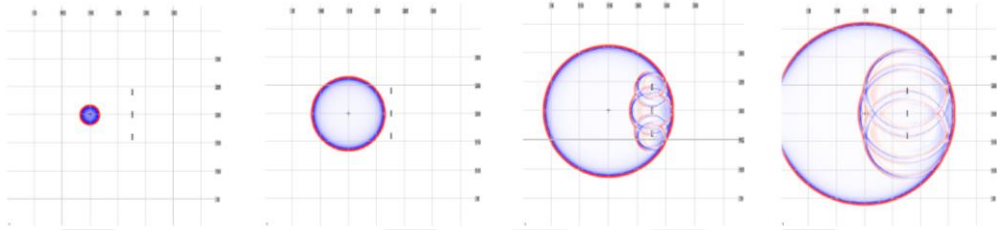
Sesin yayılmasında kaynağın bulunduğu nokta merkez alınır ve ses bu noktadan genişleyerek ilerler. Buna bağlı olarak dalga büyüdükçe yüzey alanı genişler ve genliği mesafeye bağlı olarak azalır. Şekil 2.2’de sinyal şeklinde ses dalgasının ilerleyişi zaman bazında verilmiştir. Konuma bağlı ses basıncının maksimum pozitif olduğu yer kırmızı, maksimum negatif olduğu yer mavi ile gösterilmiştir. Şekil 2.3’te ses dalgasının bir obje ile karşılaşması durumu gösterilmiştir. Yüzey düz ve dalganın boyutuna göre büyük ise aynasal yansıma yapacaktır. Yansımanın gelen açısı ile yansıyan açısı aynıdır. Gelen dalga ile yansıyan dalganın oryantasyonu farklı olsa da zamansal karakteri aynıdır. Şekil 2.4’te ses dalgasının dalga boyundan daha küçük bir yüzeyle karşılaşması durumu verilmiştir. Bu durumda saçılarak ya da dağınık bir şekilde yansıma yapar, aynasal yansıma gibi belirli bir yöne dağılım yoktur. Yansıyan dalga zamana bağlı olarak genişleyerek dağılır. Bir engelle karşılaşması durumunda ise kırılma olayına göre dalga Şekil 2.5’teki gibi hareket eder. Engelin kırılmayı gerçekleştiren uç kısmı dalganın yeni merkezini oluşturur. Alçak frekanslarda kırılmanın oluşturduğu akustik gölge yüksek frekanslara göre daha büyük olur (Heutschi 2016).



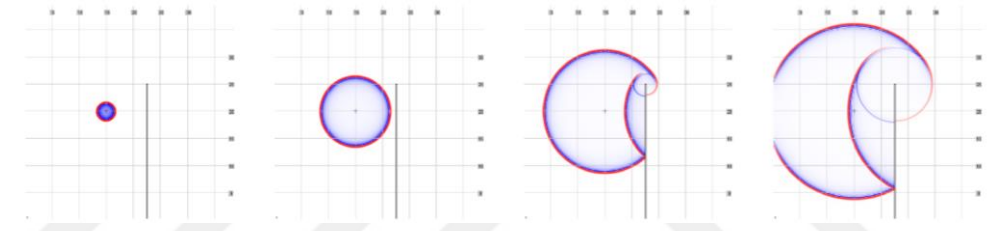
Şekil 2.2 : Uyarı şeklindeki ses dalgasının zamana bağlı geometrik ilerleyişi (Zaman ilerleyişi soldan sağa verilmiştir.) (Heutschi 2016)



Şekil 2.3 : Uyarı şeklindeki ses dalgasının düzgün bir yüzeyden yansımaları (Heutschi 2016)



Şekil 2.4 : Uyarı şeklindeki ses dalgasının saçılması (Heutschi 2016)



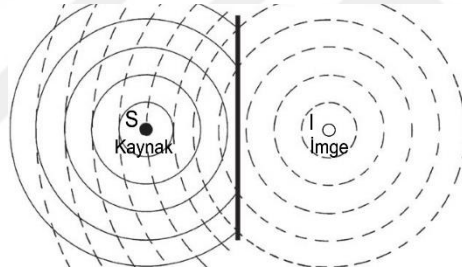
Şekil 2.5 : Uyarı şeklindeki ses dalgasının kenarda kırılması (Heutschi 2016)

2.1.1 Durağan dalga ve mod oluşumu

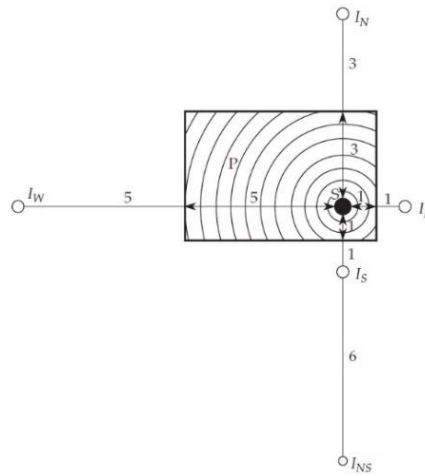
Ses azaltımı düşük olan kapalı alanlar belirli frekanslarda titreşir ve bu frekansa hacmin doğal frekansı ya da rezonans frekansı denir. Bir odada ise bu rezonansa "mod", bu moddaki ses basıncının uzamsal yayılımına ise 'mod şekli' denmektedir. Helmholtz denklemine göre (2.2) hacimdeki sınır koşullarının sönümlenmesi göz ardı edildiğinde yani sınır koşullarının rijit olarak kabul edilmesi durumunda odadaki ses alanı bir 'özdeğer' problemi, matematiksel çözüm denklemi ise mod ya da doğal frekansın matematiksel terim adı olan 'özfrekans' olarak tanımlanmaktadır (Jacobsen 2009).

Sesin kapalı hacimlerdeki davranışı, açık alandaki davranışına göre oldukça farklıdır. Açık alanda ses kaynaktan çıktıktan sonra hiçbir engel ile karşılaşmadan ilerlediği için herhangi bir noktada ses basıncı mesafeye bağlı olarak kolayca hesaplanır. Fakat kapalı hacimde ses tavan, döşeme ve duvarlardan yansyarak geldiği için herhangi bir noktada ses basıncı direkt ses ile yansıyan sesin bir kombinasyonudur.

Özellikle küçük hacimlerde rezonanslar nedeniyle frekansa bağlı olarak hacmin farklı noktalarında ses basıncı farklılık gösterecektir. Bu rezonanslar hacmin boyutlarına ve frekansa göre oluşmaktadır. Rezonanslar, belirli frekanslarda enerjinin yoğunlaşmasıyla ses basıncının arttığı noktalar oluşturduğu gibi (antinode-karın bölgesi), enerjinin azaldığı noktalar (node-düğüm noktası) da oluşturmaktadır (Kuttruff 2009). Ses dalgasının rijit bir yüzeyden yansımaları Şekil 2.6’da verilmiştir. Küresel şekilde ilerleyen ses dalgası düz bir yüzeye çarptığında simetrik olarak yerleşen bir sanal kaynaktan yansıma yapar gibi tam ters yönde yansıyarak serbest alanda ilerler. Gelen ses dalgası düz çizgi yansıyan ses dalgası ise kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Kapalı bir hacimde olması durumunda ise Şekil 2.7’deki gibi sanal imgeler (I_S , I_W , I_N , I_E) oluşması ile yansımalar gerçekleşir. Oda yüzeylerinin yutuculuk özelliğine göre bu sanal imgelerin alıcı noktasındaki etkisi zayıflar. Kaynağın yüzeylere göre simetrisinde oluşan imge kaynaklara ek olarak ilk duvardan yansıma yapan ses tekrar sanal imgeler (I_{NS}) oluşturur. Enerji (Everest ve Pohlmann 2009).

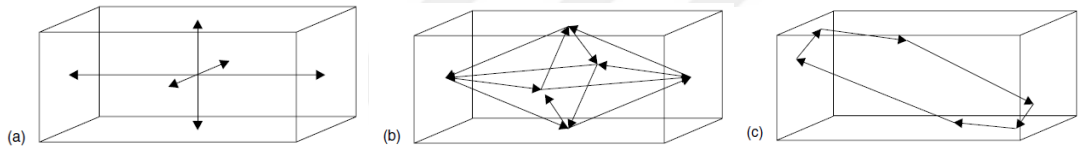


Şekil 2.6 : S noktasından çıkan sesin tek bir duvar yüzeyinden yansımaları ve sanal I kaynağından gelen bir ses gibi düşünülmesi (Everest ve Pohlmann 2009)



Şekil 2.7 : S noktasındaki ses basıncı sanal imgelerin ve diğer yansıma noktalarından gelen sonsuz yansımaların toplamından oluşmaktadır (Everest ve Pohlmann 2009)

Ses dalgasının izlediği yansıma yolları modları oluşturmaktadır ve bir hacimde sonsuz sayıda mod yolu vardır. Kapalı bir hacimde ses kaynağı kapatıldığında bir kısım enerji hacimde kalır ve durağan dalga yollarında tekrarlı yansıma yaparak ilerler. Bu rezonanslar odanın özfrekansı ile ilişkilidir ve doğal frekansı da denebilir. Dörtgensel bir hacimde 3 tip rezonant modu bulunur (Şekil 2.8). Eksenel modlar karşılıklı paralel duran yüzeylerden yansıma yapmaktadır. Teğet modlar karşılıklı iki paralel yüzeyden diğer iki paralel yüzeye ilerleyerek dört yüzeyden yansıma yapmaktadır. Eğik modlar ise altı yüzeye çarparak ilerler ve başlangıç noktasına dönmektedir. Odanın en uzun kenarı doğrultusunda ilerleyen eksenel modlar ilerlediği mesafede az yüzeye çarptığı için en çok enerji taşıyan mod tipidir. Gerçek odalarda yüzey yutuculuğu her yansımada mod enerjisini azaltır. Teğet ve eğik modların izlediği yansıma yolu uzun olsa da mod frekansı dalga boyuna bağlı olarak eksenel modlara göre yüksektir (Newell 2008).



Şekil 2.8 : Kapalı hacimlerde a) eksenel, b) teğet ve c) eğik modların ışımsal yolla görselleştirilmesi (Newell 2008)

Dörtgen bir odanın mod frekansları, Helmholtz dalga denklemi 3 boyutlu koordinat sistemde ifade edildiğinde ve sınır koşullarının rijit olarak kabul edilmesi durumunda basitleştirildiğinde, aşağıda verilen bağıntı ile analitik olarak hesaplanabilmektedir. Oda geometrisi dörtgen olacak şekilde en uzun kenarı (L), kısa kenarı (W) ve yüksekliği (H) sırasıyla x, y, z koordinatlarına yerleştirilir. İki duvar arasındaki eksenel mod oluşumunda p:1, q:0, r:0 (1,0,0) olması durumunda mod frekansı aşağıda verilen bağıntıya göre hesaplanır. Hacim basit bir dörtgensel şemadan oluşmuyor ise özfrekansı ve basınç dağılımını analitik olarak hesaplamak mümkün değildir ve sonlu elemanlar gibi sayısal hesaplama yöntemlerini gerektirir (Everest ve Pohlmann 2009).

$$Mod\ Frekansı = \frac{c}{2} * \sqrt{\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{q}{W}\right)^2 + \left(\frac{r}{H}\right)^2} \quad (2.3)$$

c: Sesin hızı (m/s)

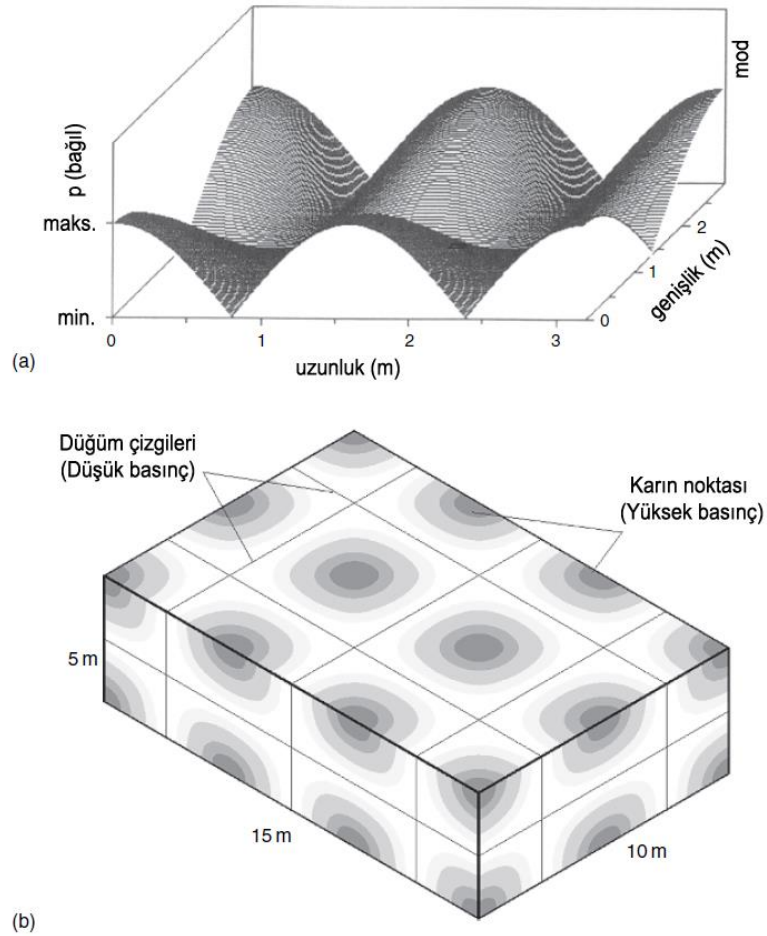
L: Odanın uzunluğu (m)

W: Odanın eni (m)

H: Odanın yüksekliği (m)

p, q, ve r: Tam sayılar 0, 1, 2, 3...

Şekil 2.9-a'da kapalı bir hacimde teğet mod basınç dağılımının eş eğri gösterimi verilmiştir. Düşey ekseninde basınç düzeyi ve diğer eksenlerde oda boyutları verilmiştir. Kenar ve köşe noktalarda yüksek basınç oluşmaktadır. Bu bölgeler karın (antinode) bölgesidir. Düşük basınç noktası ise düğüm (node) noktasıdır. Şekil 2.9-b'de ise oda yüzeylerindeki eğik moda (3,2,1) ait basınç dağılımı verilmiştir. Bir müzik enstrümanının ya da hoparlörün karın bölgesine yerleşmesi durumunda, kaynak güçlü rezonansları tahrik eder ya da belirli bir oranda mod frekansı ile çakışır. Diğer yandan monopol yayıma sahip bir kaynağın düğüm noktasına yerleşmesi durumunda rezonans tahriki daha azdır çünkü yüzeyden gelen yansımalar yansıyan dalga ile farklı fazda gelir ve belirli oranda faz giderimi gerçekleşir. Bu nedenle kaynak karın konumunda olsa dahi rezonans, düğüm konumunda bulunan alıcıda işitilmeyebilir (Newell 2008).



Şekil 2.9 : a) teğetsel modun basınç değişimi eş eğri gösterimi b) eğik modun yüzey basınç dağılımı gösterimi (Newell 2008)

2.1.2 Sesin yayımı ve ses kaynağının dalga teorisine göre tanımlanması (Nokta kaynaklar)

En basit ve en sık kullanılan idealize kaynak tipi alçak frekanslarda dalga boyundan çok daha küçük bir küre halinde her yöne eşit yayım yapan noktasal kaynak ya da monopol kaynaktır. Alçak frekanslarda kapalı bir hacim içerisinde monopol bir ses kaynağı $Qe^{i\omega t}$ hacimsel hız ile aşağıdaki bağıntı ile tanımlanır (Kleiner 2014).

$$p(r) = \frac{Qe^{i\omega t}}{i\omega V} \quad (2.4)$$

p: ses basıncı

r: kaynağa olan mesafe (m)

Q : hacimsel hız (m^3/s)

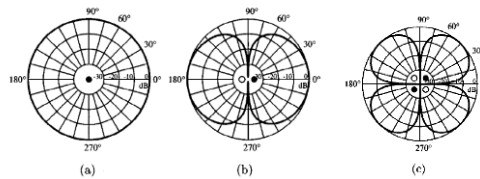
i: imajiner sayı ($\sqrt{-1}$)

w: açısal frekans (rad/s)

V: hacim (m^3)

t: zaman (s)

Şekil 2.10'da 3 farklı kaynak tipinin plan düzleminde yayım yönelimleri verilmiştir. Monopol kaynak tipi her yöne eşit düzeyde yayım yapmaktadır. Eğer iki monopol kaynak birbirine yakın konumlanmış ve farklı polariteye (ters faza) sahip ise dipol kaynak tanımlanmış olur. Monopol kaynağa göre daha az ses gücüne sahiptir (Russell, Titlow, ve Bemmen 1998). Qadrupol kaynak ise 2 eş dipol kaynağın ters fazda olması ve birbirine çok yakın olmasıyla oluşur. Dipol kaynağa örnek olarak hoparlör sistemi verilebilir. Hoparlör konisinin hem ön yüzeyinden hem de yan yüzeylerinden yayım olur ve aynı fazda değildirler. Dolayısıyla önden çıkan yayım ile yandan gelen yayımın çakışması durumunda, koninin aksına göre belirli bir açıda faz giderimi gerçekleşir (Long 2006).



Şekil 2.10 : Teorik olarak yayım yapan a) monopol, b) dipol, c) quadrupol ses kaynaklarının ses basınç düzeyi yönelme örüntüleri (Russell vd. 1998)

2.1.3 Sınır koşullarının dalga teorisine göre tanımlanması

Düzlemsel bir dalga sonsuz büyüklükte ve tekdüze dağılmış varsayılan bir duvar yüzeyine çarptığında, duvarın özelliklerine bağlı olarak faz ve genliği değişerek yansıyan ses dalgasını oluşturur. Gelen dalga ve yansıyan dalga etkileşimi sonucunda durağan dalga oluşur. Yansıma sırasında ses dalgasında oluşan faz ve genlik değişimi aşağıdaki kompleks yansıma katsayısı ile ifade edilir. Faz açısı ve mutlak değeri, gelen dalganın açısına ve frekansına bağlıdır.

$$R = |R| \exp(i\chi) \quad (2.5)$$

R: Yansıma katsayısı

χ : Faz açısı

i: imajiner sayı

Düzlem dalganın şiddeti basınç genliğinin karesi ile orantılıdır. Dolayısıyla yansıyan bir dalganın şiddeti gelen dalgadan R^2 oranında küçüktür. Bu durumda yansıma sırasında $1-R^2$ oranında bir enerji kaybı olur. Bu azalım duvarın ses yutma katsayısını verir ve aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir.

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (2.6)$$

α : Ses yutma katsayısı

R: Ses yansıma katsayısı

Yansımasız bir durumda $R=0$ ise ses yutma katsayısı α maksimum 1 değerini alır. Bu durumda duvarın tamamen yutucu olduğu ya da ses alanı ile örtüştüğü varsayılabilir. $R=1$ (faz yansıma, $\chi=0$) durumunda ise duvarın rijit olduğu varsayılır. Tam tersi $R=-1$ (ters fazda, $\chi=\pi$) durumunda ise geçirgen sınır koşulu varsayılır. Bu durum hacim akustiği problemlerinde pek kullanılmamaktadır. Her iki durumda da duvar ses yutumu yoktur ($\alpha=0$). Yansıma katsayısı hacim akustiğinde pek kullanılmazsa da bir duvar yüzeyinin akustik özelliklerinin tarif etmek amaçlı açıya ve frekansa bağlı yansımayı açıklayabilir. Duvarın fiziksel davranışını ve katmanlaşmanın etkisini daha doğru açıklayan bir diğer nicelik ise duvar empedansıdır. Duvar yüzeyinde oluşan ses basıncının duvar normaline göre parçacık hızına oranına dayanır. Empedans bilgisi aşağıdaki bağıntıya uygun olarak hesaplanır.

$$Z = \left(\frac{p}{u_n} \right)_{\text{yüzey}} \quad (2.7)$$

Z: empedans

P: basınç (pa)

u_n duvar normaline göre parçacık hızını belirtmektedir.

Duvarın yansıtma katsayısı, sınır spesifik akustik empedansı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$R = \frac{Z - \rho_0 c_0}{Z + \rho_0 c_0} \quad (2.8)$$

$$Z = Z_n \cos\theta, \quad Z_n = w_n + jx_n \quad (2.9)$$

R: yansıtma katsayısı ($\alpha = 1 - |R|^2$)

Z = (kompleks spesifik akustik empedans) = (basınç)/(parçacık hızı)

Z_n : Normalize empedans

w: spesifik akustik direnci ya da empedansın gerçel kısmı (specific acoustic resistance or real part of impedance)

x: spesifik akustik tepkisi ya da sanal kısmı (specific acoustic reactance or imaginary part of the impedance) – pozitif olması durumunda kütle şeklinde, negatif olması durumunda direngenlik (stiffness) şeklinde davranır.

$\rho_0 c_0$: havanın karakteristik empedansı (yaklaşık 412 Ns/m³- mks rayls)

j: $\sqrt{-1}$

Yansıma katsayısı ve empedans verisi yansıma sürecine dair ses yutma katsayısına göre daha doğru ve detaylı bilgi vermektedir. $|Z| \gg \rho_0 c_0$ ise yansıma katsayısı +1 değerine yaklaşarak düzgün yansıma gerçekleşir ve yansıyan dalga ve gelen dalga aynı fazdadır. Eğer $|Z| \ll \rho_0 c_0$ ise sınır özelliği tüpün açık ucu gibi esnektir (resilient) ve R değeri -1'e yaklaşır (yer etkisi). Fakat $|R| = -1$ nadir gerçekleşen bir durum olarak mimari akustikte mimari akustikte karşılaşılmamaktadır. Yansıyan dalga ile gelen dalga arasında 180° faz farkı olur ve faz giderimi gerçekleşir. $|Z| = \rho_0 c_0$ durumunda ise ortamla aynı empedansa sahip bir yüzey koşulu oluşması nedeniyle yansıma gerçekleşmez. Yansıtma katsayısı aynı zamanda aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilir.

$$R = \left| \frac{(Z_n / \rho_0 c_0) \cos\theta - 1}{(Z_n / \rho_0 c_0) \cos\theta + 1} \right|^2 \quad (2.10)$$

Aynı denklem gerçel ve sanal komponentleri ile yazıldığında aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$R = \frac{(w_n \cos \theta - \rho_0 c_0)^2 + x^2 n \cos^2 \theta}{(w_n \cos \theta + \rho_0 c_0)^2 + x^2 n \cos^2 \theta} \quad (2.11)$$

Yansıma olmadığı sürece sesin geçişi ya da malzeme tarafından yutulmuş olması önemsiz ise ses yutma katsayısı aşağıdaki bağıntı ile açıklanabilmektedir.

$$\alpha = 1 - \left| \frac{(Z_n / \rho_0 c_0) \cos \theta - 1}{(Z_n / \rho_0 c_0) \cos \theta + 1} \right|^2 \quad (2.12)$$

Aynı denklem reel ve sanal komponentleri ile yazıldığında aşağıdaki bağıntı elde edilir.

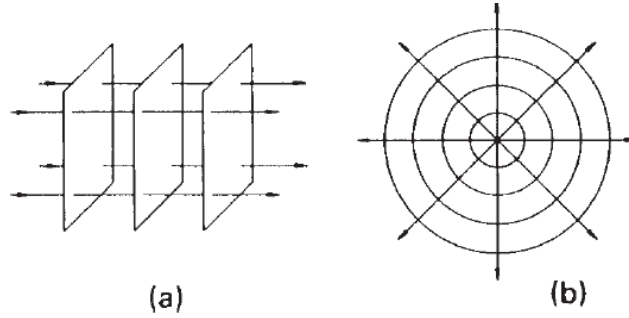
$$\alpha = \frac{4 \rho_0 c_0 w_n \cos \theta}{(w_n \cos \theta + \rho_0 c_0)^2 + x^2 n \cos^2 \theta} \quad (2.13)$$

İki türlü duvar empedansı vardır. Yerel reaksiyon (locally reaction) empedans ses dalgasının açısından bağımsızdır. Genişletilmiş reaksiyon (extended reaction) empedans modelde ise Z gelen dalga'nın açılal fonksiyonudur.

Sınır koşullarının tanımlanması için yapı elemanlarının ses yutma katsayısı ya da yüzey empedansı gibi özellikleri hacim akustiği benzetimlerinde önemli verilerdir. Genelde ses yutma katsayısı, geometrik akustikte kullanılırken, dalga bazlı benzetimlerde yüzey empedansı bilgisi gerekmektedir. Yüzey empedans sınır koşulları, yansımanın genlik ve faz değışikliğini de ifade ettiğı için sınırların fiziksel karakterini daha gerçekçi tanımlar ve ölçümlerle daha tutarlı sonuçlar verir. Bununla birlikte, yüzeylerin bu özelliklerinin model girdisi olarak değeriendirilmesine ilişkin yapılan çalışmalarda empedans sınır koşulları Schroeder frekansı (f_s) üstünde olan yüksek frekanslarda da daha iyi sonuçlar vermiştir. Rastgele geliş ile hesaplanan yüzey yutuculuğunda da alçak frekanslarda daha tutarlı sonuçlar elde edilmiş, dik geliş açılı hesaplamalarında büyük hatalar görülmüştür. Dik geliş sadece eksenel modlarda ya da çok yüksek yutuculukta tutarlı sonuçlar vermiştir.

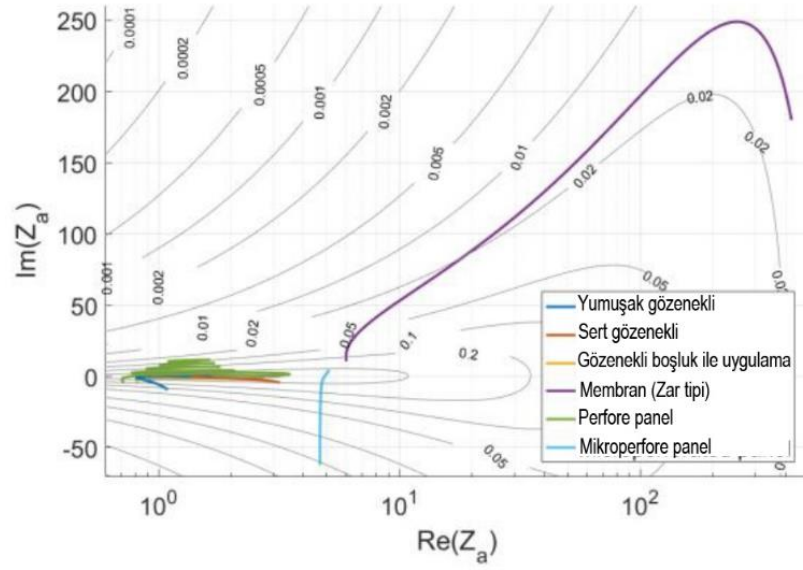
Yüzey koşullarının değeri aynı zamanda kaynak yayımına göre de değışkenlik gösterir. Şekil 2.11'de iki farklı dalga hareketi verilmiştir. Buna göre düzlemsel dalgada x eksenine paralel olan dalga cephesindeki dörtgenin her noktası, küresel dalgada ise küre şeklindeki dalga cephesinin her noktası eşit ses basıncına sahiptir (Kuttruff 2009). Schroeder frekansının altında küresel yayım ile düzlemsel yayım karşılaştırıldığında, küresel yayımın daha doğru sonuçlar vermekle beraber düzlemsel yayımın, empedans sınır koşullarıyla beraber 100 Hz'nin altındaki hesaplamalarda iyileştiğı ve kabul edilebilir sonuçlar verdiğı görülmüştür (Jeong ve NX 2012). Dalga

yayımının sonuçlar üzerindeki etkisini araştıran başka bir çalışma ise düzlemsel dalganın özellikle yutuculuk oranı çok fazla ($\alpha \geq 0.7$) olan yüzeylerde hata oranının yükseldiğini ortaya koymuştur (Lam 2005).

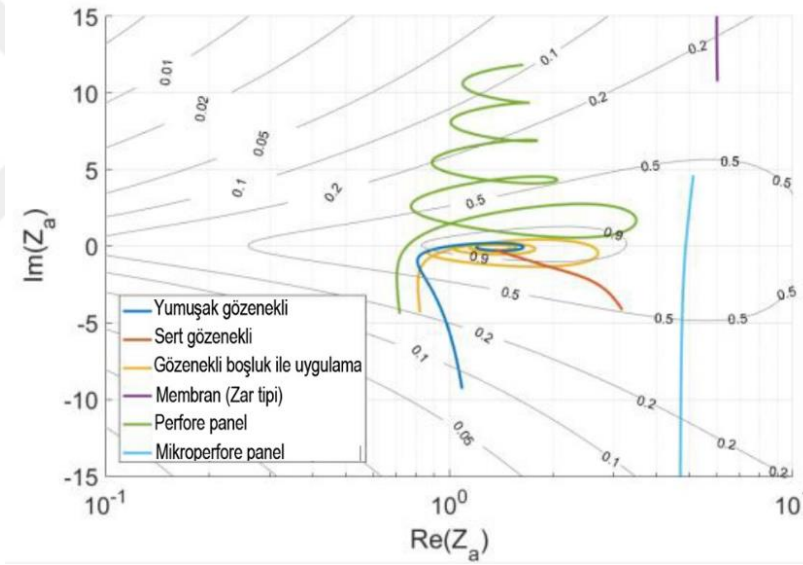


Şekil 2.11 : a) Düzlemsel dalga, b) küresel dalga yansıma diyagramları (Kuttruff 2009)

Sonlu eleman yönteminde, koşullar 3 farklı ortam için modellenmelidir; sesin sönümlenmeden hareket ettiği akışkan ortamı (hava), sesin titreşimle sönümlendiği yapısal ortam ve sesin yok olduğu gözenekli ortam (Franck ve Aretz 2007). Sınır koşullarında yapısal ortam ve gözenekli ortamın modellendiği farklı malzemelerin sönümlmeleri de oldukça farklılaşmaktadır. Şekil 2.12’de yumuşak gözenekli, gözenekli ve boşluk ile uygulanmış, sert gözenekli, perfore panel, mikro perfore panel ve membran tip panele ait empedans bilgileri verilmiştir. X eksen empedansın sanal kısmını, Y eksen gerçel kısmını ve eğriler ise empedans ile ses yutum katsayı ilişkisini veren eş yutuculuk katsayısı eğrileridir (iso-absorption coefficient). Ses yutuculuk katsayısının istatistiksel bir enerji parametresi olmasından dolayı buna karşılık gelen sonsuz sayıda karmaşık yüzey empedansı vardır. Membran tip yutucularda, yüksek frekanslarda yüzey tepkisi hep pozitif eğriyi takip etmektedir. Dolayısıyla grafikte de 0.02 değerlerini takip etmekte ve yutuculuk değeri düşük çıkmaktadır. Şekil 2.13’te ise daha eksenin -15 ve +15 aralığı detaylı bir şekilde verilmiştir. Mikro perfore panellerde is yüzey tepkisi alçak frekanslarda negatif iken frekans yükseldikçe değerler de pozitifleşir, yutuculuk oranı azalır. Boşluğun etkisiyle alçak frekanslardaki etkinlik de artmaktadır. Yutuculuk, direncin maksimum olduğu noktada gerçekleşmektedir. Gözenekli malzeme ve perfore sistemin tepkilerine bakıldığında yutuculuk eğrilerinde direnç (resistance) ve tepkisine (reactance) göre eş yutum eğrileri arasında ileri geri hareket etmektedir. Boşluğun etkisi malzemenin yutuculuk değerlerinde dairesel eğri çizmesine neden olmaktadır. Bu nedenle yutuculuk değerleri boşluğun etkisiyle değişmektedir (Mondet, Brunskog, ve Rindel 2017).



Şekil 2.12 : Çeşitli malzeme modellerinin sanal ve gerçek normalize empedans verileri (Mondet vd. 2017)



Şekil 2.13 : Çeşitli malzeme modellerinin sanal ve gerçek normalize empedans verileri (Mondet vd. 2017)

2.2 Küçük Müzik Hacimlerinde Ses Alanı Değerlendirme Akustik Parametreleri

Müziyenlerin performans ya da çalışmalarını, enstrüman ve hacim ilişkisinin doğru kurulduğu bir ortamda gerçekleştirmeleri beklenmelidir. Bu koşulların sağlanabildiği iyi bir akustik ortam gereksinimleri ise sessizlik ve harmonidir. Küçük hacimlerde prova, çalışma, kayıt, performans gibi çok farklı işlevler gerçekleşse de akustik kusurların elimine edildiği işitsel konfor gereksinimi ortaktır.

İyi bir akustik ortamın sağlanabilmesi için hacimlerin değerlendirilmesinde ve tasarımında göz önünde bulundurulması gereken parametreler iki gruba ayrılmaktadır.

- Ölçülebilir ve hesaplanabilir nesnel akustik parametreleri
- Akustik ortamın niteliğinin ve genel izlenimlerin tanımlanmasında kullanılan öznel akustik parametreleri

Bu bölümde azalım süresine bağlı olarak değerlendirilen reverberasyon süresi, netlik nesnel akustik parametrelerine ek olarak rezonans ve mod olayları gibi spektral içeriği değiştiren kusurların değerlendirilmesini sağlayan, odanın frekans yanıtı üzerinden elde edilen akustik parametreler açıklanmış, bu parametrelere ait küçük hacimler özelinde optimum değer aralıkları, işitme eşiği, fark eşiği (JND) gibi bilgilere yer verilmiştir.

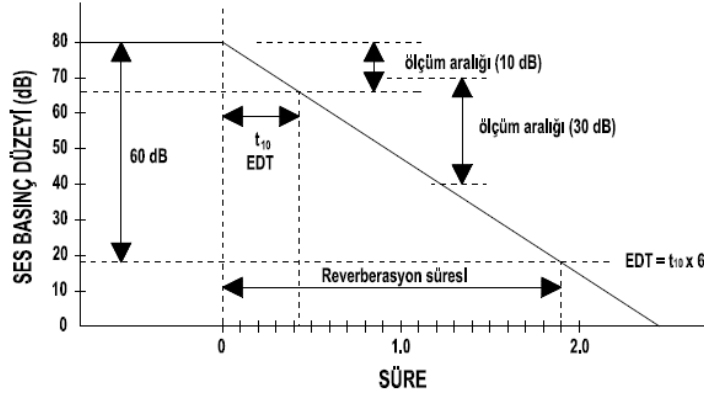
2.2.1 Nesnel değerlendirme akustik parametreleri

Odanın akustik özelliklerini nesnel olarak ifade eden ani uyarı yanıtının integrali alınarak elde edilen ölçütlerdir. Nesnel akustik parametreler benzetim yöntemleri ile hesaplanabilmekte ya da fiziksel ortamda ölçülebilmektedir. Akustik kalitenin irdelenmesinde ya da uygulanan akustik düzenlemelerin ya da tasarımın değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Her bir parametre, ortamın farklı bir niteliğini (ör erken yansıma, bas oranı, güçlülük vb.) değerlendirmekle beraber, birbirleri arasında ilişkili ölçütlerdir.

2.2.1.1 Reverberasyon süresi (Reverberation Time, T_{60})

Reverberasyon süresi (T_{60}) hacimlerde akustik kaliteyi ve algılanan ortamı değerlendiren, önemli ve kullanımı en yaygın parametredir (Demirkale 2007). Müzik ya da konuşma amaçlı hacimlerin tasarımında uygulanması gereken pek çok yönetmelik ve standart bu parametre üzerinden optimum koşulları belirtmektedir (ANSI/ASA S12.60 2020; International Standard Organization 2021:23591; TS EN ISO 3382 2010). Devamlı çalışan bir müzik kaynağının kapatılmasından sonra 60 dB'lik ses basıncının kaybolmasına kadar geçen süredir. Pratikte daha küçük (30 dB'lik) aralık ile sınırlandırılmıştır. -5 dB' den -35 dB' ye kadar geçen süre yine 60 dB düşüş eğrisine bağlı olarak alınır. Denklemde t-x eğrinin X dB ye geldiği zamanı gösterir. Şekil 2.14'te düşüş eğrisinin reverberasyon süresi ile ilişkisi verilmiştir.

$$T=60 \text{ dB} \frac{(t-x)-(t-5)}{(-5\text{dB})-(-35\text{dB})} \quad (2.14)$$



Şekil 2.14 : Erken düşme süresi ve reverberasyon süresinin azalım eğrisine bağlı elde edilmesi (Barron 2010)

Reverberasyon süresinin, hacimde yutuculuk oranının düşük olması ve dağınık ses ortamı olması halinde, Sabine hesaplaması ve dalga akustiği ile hesaplanan modal düşme süresi (T_{modal}) örtüştüğü belirlenmiştir (Pierce 1983).

$$T_{\text{modal}} = \frac{3 \ln(10)}{r_{nxnynz}} \quad (2.15)$$

$$T_{\text{min}} = \frac{24 \ln(10)V}{\alpha c S} = \frac{0,161V}{\alpha S} = T_{\text{Sabine}} \quad (2.16)$$

T_{modal} : modal düşme süresi

r_{nxnynz} : sönümleme katsayısı

S : yutucu yüzey alanı (m^2)

α : ses yutma katsayısı

V : hacim (m^3)

c : sesin hızı (m/s)

Reverberasyon süresi, sadece bir değerlendirme parametresi değil aynı zamanda ses basıncı ve ses gücü düzeyi arasındaki ilişkiyi de tanımlayan bir açıklayıcıdır. Fakat yapılan son çalışmalar göstermektedir ki, iyi bir akustik ortamın sağlanması için reverberasyonun değerlendirilmesinin yanı sıra, yansımaların geliş yönü, yoğunluğu, azalım karakterinin değerlendirilmesi gibi ölçütlerin analizi önemlidir (Kaplanis vd. 2019). Bununla birlikte küçük hacimlerde ölçümlerle yapılan ses alanı değerlendirmelerinde, $T_{60} - T_{20}$, ses güçlülüğü (G) gibi parametrelerinin algılanabilirliği test edilmiştir. T_{20} 'nin (-5 dB,-25 dB aralığı) ortam yutuculuğunu

yeterince ölçemediği, G değerinin ise 63 Hz ve 125 Hz arası alçak frekanslarda tutarsız sonuçlar verdiği görülmüştür (Harvie-Clark, Dobinson, ve Hinton 2012). Bununla birlikte reverberasyon süresi istatistiksel alan hesabına dayanır ve tutarlı sonuçlar vermesi ses alanının yeterince dağınık olmasına bağlıdır.

Hacimde istenen frekans tepkisi hacim işlevine göre değişmekle beraber, prova yapılan hacimlerle ilgili yapılan çalışmalarda, frekansa bağlı reverberasyon süresi analiz edildiğinde uygun frekans tepkisinin, alçak frekansların orta frekanslara göre daha çabuk sönümlenmesi önerilmektedir. Hacme bağlı olarak, genel bütün oktav bantlarda reverberasyon süresinde 0.8s-1.1 s aralığı ideal olarak önerilmiş, alçak frekansların reverberasyon sürelerinin (RT_{60}) ise 1.3 s'yi geçmemesi tavsiye edilmektedir (McCue ve Talaske 2004). Prova odaları baz alındığında, daha küçük hacimler olduğu için düşük reverberasyon sürelerine sahiptirler. Bu küçük hacimlerin reverberasyon süreleri 0.4-0.5 s arası değişirken 100 Hz'lerde ise bu süre 0.6-0.7 s aralığına çıkmaktadır. Fakat bu tür küçük hacimlerde 63 Hz ile 4000 Hz aralığında $\pm\%5$ 'ten daha fazla bir değişkenlik önerilmemektedir. Eğitim stüdyolarında ise zemin alanı 15-20 m² mertebesine yükseldiği için reverberasyon süresi de 0.6 s'lere yükselmektedir ve 0.8s 100 Hz aralığı için önerilmektedir.

Enstrüman bazında bakıldığında ise örneğin keman ile piyano ihtiyaçları, piyano yayımında duvarlardan dolayı renklenme olacağı için piyano etrafında daha yutucu bir alan tercih edilmektedir. Enstrüman bazında tercih edilen reverberasyon süreleri Çizelge 2.1'de verilmektedir. Talep edilen farklı reverberasyon süreleri özellikle değişken olarak tasarlanan saçıcı ve yutucu elemanlar ile karşılanabilmektedir (Kleiner 2014).

Çizelge 2.1 : Enstrüman bazında talep edilen reverberasyon süreleri (Kleiner 2014)

Enstrüman Tipi	Reverberasyon süresi (RT)
Davul, alçak frekanslı piriç enstrümanlar	0.2-0.4 s
Piriç enstrümanlar, ahşap üflemeli enstrümanlar	0.4-0.6 s
Flüt, gitar, trompet, çello	0.6 s
Piyano	0.7 s
Klarnet, keman	0,8 s
Vokal	1,1 s

Fark eşiği (Just Noticeable Difference, JND) ölçülebilir bir parametrede en az algılanabilir değişiklik olarak tanımlanmaktadır ve nesnel ölçümlerin ses algısının öznel boyutu ile ilişkilendirilmesinde önemli bir faktördür. Muller'in çalışmasına göre reverberasyon süresi hassasiyeti reverberasyon süresine bağlı olarak değişmektedir. Reverberasyon süresinin 0,6 s'nin üzerinde olması durumunda, JND T değeri gözlenen değerin %4'ü iken, 0,6 s'nin altında yaklaşık olarak 0.024'tür. 1-2 s aralığında RT için ise tekrar %4'ü olduğu saptanmıştır. Bunun yanı sıra yapılan çalışmada yöntemde kullanılan farklı materyallerin sonuçları etkilediği ve oluşan varyansın bu farklılıklarla ilgili olduğu belirtilmiştir (Cremer ve Müller 1982).

2.2.1.2 Erken düşme süresi (Early Decay Time, EDT)

Erken düşme süresi, direkt sestten sonra ilk 10 dB azalım için geçen süresidir (0 dB ve-10 dB aralığı) (Şekil 2.14). Reverberasyon hacimdeki fiziksel özelliklerle ilişkilendirilirken, EDT öznel açıdan algılanan reverberasyon ile ilişkilendirilir. Reverberasyon süresi mesafeye ve konuma bağlı olarak değişmeye de erken düşme süresi direkt ses ile ilişkili bir parametre olduğu için oda geometrisinden etkilenmektedir ve yüzeylere ya da kaynağa olan mesafeye göre değişkenlik gösterir. Aynı zamanda kaynağa yakın sahne gibi noktalarda erken düşme süresi değeri ani düşüşler gösterir. Dolayısıyla küçük hacimler, sahneler gibi kaynak ve alıcı mesafesinin az olduğu odalarda düşük olması beklenir. Kısa EDT değerleri sesin birden sönümlendiğini ve ilk yansımaların düşük olduğunu belirtmektedir. Öznel olarak EDT'nin kısa olması direkt sesin daha belirginleşmesini sağlar. Uzun EDT değerleri ise, ilk yansıma yoğunluğunun artışı gösterir ve buna bağlı canlılığın arttığını ve buna bağlı netliğin azaldığını ifade eder (Bradley 2010).

2.2.1.3 Netlik (Clarity, C₈₀) ve merkez zaman (Center Time, TS)

Erken enerji oranının analizi olan netlik (C₈₀) parametresi, alıcı noktasındaki 0-80 ms arası gelen enerji ile 80 ms- ∞ arası gelen enerji oranıdır (Bradley 2010). Aşağıdaki bağıntı ile açıklanır.

$$C_{80} = 10 \log \left[\frac{\int_0^{80ms} h^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} h^2(t) dt} \right] \quad (2.17)$$

Netlik göstergesi olarak diğer bir parametre olan Merkez Zaman (ms), ani uyarı cevabının karesinin ağırlık merkezinin süresidir. Cremer tarafından geliştirilen bu parametre; karesi alınan sinyal tepkisi diyagramının “zaman aksına” göre ağırlık

merkezini vermekte ve başka bir deyişle; “enerji ağırlık merkezine” ulaşmak için geçen süreyi tanımlamaktadır. Aşağıdaki bağıntı ile elde edilir. 50 ms ya 80 ms ayırımına dayanmaması nedeniyle küçük hacimlerde işitsel ortamın açıklanmasında daha tutarlı sonuçlar verdiği belirtilmektedir (Kaplanis vd. 2014).

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \cdot 1000 (ms) \quad (2.18)$$

p: ses basıncı (Pa)

t: denge noktası için geçen süre (ms)

Nesnel parametrelere ilişkin fark eşiği (JND) değerleri pek çok araştırmacı tarafından çalışılmış ve farklı yöntemler izlenmiştir. Dolayısıyla değerlerin yöntemle bağlı değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Cox'un (Cox, Davies, ve Lam 1993) JND C₈₀ ile ilgili çalışmasında, benzetim yoluyla elde edilen dinleme testleri ve yapay uyarım ile 2.1 s RT'ye sahip ortamlarda TS'nin 7-10 ms aralığında değiştiği, müzik motifi kullanıldığında ise bu değer 10-14 ms aralığında değiştiği saptanmıştır. Aynı şekilde çalışmanın sonucunda JND C₈₀ değerinin ortalama olarak 0,7-1,1 dB aralığında değiştiği saptanmıştır. Bradley'nin yaptığı sonraki çalışmalarda, C₅₀ 'ye odaklanılmış, 0,5-2 s aralığında farklı reverberasyon süreleri için çalışılmıştır. Buna göre JND C₅₀'nin reverberasyon süresinden bağımsız olduğu ve 1.1 dB olduğu saptanmıştır (Bradley, Reich, ve Norcross 1999).

2.2.1.4 Ses güçlülüğü (Strength, G)

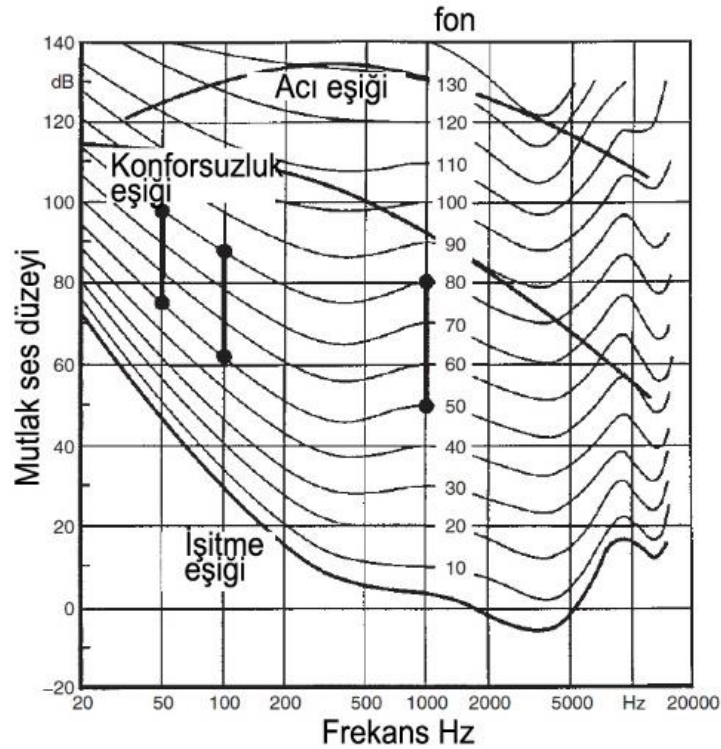
Standart bir ses kaynağı için toplam ses yüksekliği, öznel olarak hacim içinde sesin yeteri kadar yüksek algılanıp algılanmadığını göstermektedir. Bir sesin, yansımatsız bir odada, kaynaktan 10 m uzaklıktaki ses basıncı ile ölçülen odadaki basınç düzeyi farkına denir. Aynı zamanda mekândaki total enerjinin 10 m mesafede kaydedilmiş direkt ses oranından da elde edilebilir.

$$G = 10 \log \left[\frac{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}{\int_0^t h^2(t) dt} \right] \quad (2.19)$$

Ses basınç düzeyi frekansla ilişkili olduğundan ses güçlülüğü frekansın bir fonksiyonudur. Ses güçlülüğü direkt ses ile yansıyan sesin gücünden oluşur. Direkt ses oda hacminin bir fonksiyonuyken, yansıyan ses reverberasyon süresine ve EDT'ye bağlıdır (Barron 2010). G değerinin etkileyen faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

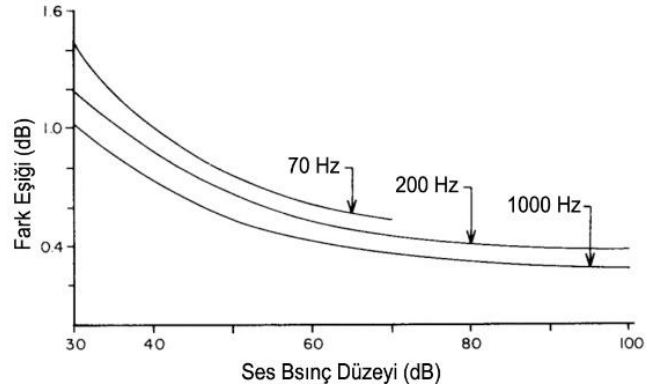
- Alıcı kaynak mesafesi azaldıkça direkt ses arttığı için G artar. Dolayısıyla konuma bağlı farklılık gösterir.
- Erken yansımalar için yüzeyler arttıkça G artar.
- Hacmin büyüklüğü arttıkça direkt ses yüksekliği azalır ve buna bağlı G azalır.
- Orta frekanslardaki reverberasyon süresi arttıkça G artar.

Şekil 2.15'te algılanabilir ses yüksekliği eğrisini veren fon eğrileri, acı eşiği ve rahatsızlık eşiği ile verilmiştir. Koyu çizgi ile ifade edilen frekans üzerindeki aralık, algı farklılığını yaratmak için gerekli olan ses basınç düzeyi farkını belirtmektedir. Bu grafiğe göre 1000 Hz'de 80 dB SPL ile 75 dB'deki 500 Hz ve 85 dB'deki 100 Hz aynı yükseklikte algılanır. İşitme sistemimizin en hassas olduğu aralık 2000 Hz ile 5000 Hz aralığıdır. Bu nedenle işitme eşiğinin en düşük ses düzeyi bu bant aralığında tanımlanmıştır (Meyer 2009).



Şekil 2.15 : Sesin algılanmasında eş yükseklik düzeyi eğrileri (Meyer 2009)

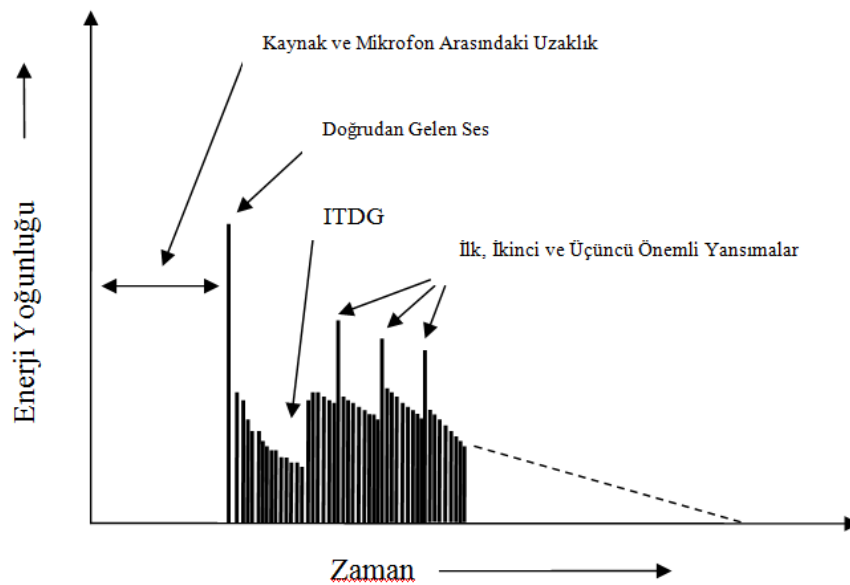
Şekil 2.16'da 70 Hz, 200 Hz ve 1000 Hz'de ses basınç düzeyi (x eksen) değişiminin fark eşiği (y eksen) ile ilişkisi verilmiştir. Buna göre alçak frekanslardaki algısal değişim için daha fazla ses basınç düzeyi gerekirken aynı frekansta eğrinin değişimine bakıldığında ses basınç düzeyi arttıkça algısal farklılığın azaldığı görülmektedir.



Şekil 2.16 : 70-200-1000 Hz'de algılanır farklılık gösterimi (Backus, 1969)

2.2.1.5 İlk gecikme aralığı (Initial Time Delay Gap, ITDG)

Bu tür hacimlerde diğer önemli bir etken ise ilk gecikme aralığı parametresidir (Şekil 2.17). Direkt ses ile direkt sestten sonra belirgin gelen ilk yansıma arasındaki süre olarak tanımlanır. Direkt sestten sonra gelen ilk yansıma sonrasında ise diğer yüzeylerden gelen ikincil, üçüncül yansımalar oluşur. Samimiyet, yakınlık gibi öznel değerlendirmelerde kullanılan bu parametre değişkenleri ise, performansın bağıl konumu, mikrofon mesafesi ve etkin yansımaların geldiğı yüzey mesafesidir (Errede 2017). Yakınlık (proximity), lokalizasyon, görünür kaynak genişliğı gibi öznel parametrelerin nesnel olarak ilişkilendirilmesinde kullanılmaktadır. Düşük olması, hacimdeki yakınlık etkisi ile ilişkilendirilirken yüksek olması sesin uzaktan geliyor izlenimini yaratmaktadır.



Şekil 2.17 : ITDG süresinin gösterimi (Davis vd. 2013)

2.2.1.6 Yankı ölçütü ve renklenme

Yansımaların hepsi alıcı tarafından bilinçli bir şekilde algılanmayabilir. Alçak seviyelerde yansımalar kendisini ses yüksekliğini artırarak, sesin rengini değiştirerek ya da kaynağın görünür genişliğini değiştirerek belli eder. Yüksek seviyelerdeyse eğer orijinal sesin tekrarlanması gibi ayrı bir olaya olarak algılanabilir ki buna “yankı” denir. Yankı rahatsızlığı, sadece tekrarlamanın gecikmesi ile değil, aynı zamanda bağlı yüksekliğine, yönüne, sinyal tipine, sinyaldeki öteki bileşenler ve ortama bağlı olarak değişmektedir. Bir sesin ayrı bir yansıma olarak algılanabilmesi için direkt sestən 30 ms sonra alıcıya ulaşması gerekmektedir. 30 ms içerisinde ulaşan yansımalar Haas etkisi olarak adlandırılır ve direkt ses ile birlikte algılanarak tınısal renklenmeyi ya da ton renklenmesini oluşturur (Newell 2008). Pek çok çalışmada dinleme testleriyle analiz edilen mutlak algı seviyesi gibi, yansımaların kritik yankı seviyesi de dinleme testleri ile analiz edilmiştir. Haas’ın konuşma sinyali ile yaptığı çalışmalarda Reverberasyon süresi arttıkça kritik gecikme süresi uzamış, aynı zamanda sinyal tekrar hızı arttıkça kritik gecikme süresi azalmıştır. Nickson ve Muncey’in müzik sinyalleri ile yaptığı çalışmalarda da aynı şekilde yankı rahatsızlık düzeyi yavaş müzikte (org müziği), daha detaylı ve hızlı bir müziğe göre daha fazladır. Haas etkisi olarak adlandırılan olaya göre yansıma düzeyi çok artsa bile eğer gecikme süresi az ise algı sistemi bu iki sinyali birleşik olarak algılar ve rahatsızlık hissedilmez (Kuttruff 2009).

Sesin rengi (color of sound) aynı yükseklikte iki sesin farklılığını belirten koklea hissidir. Sesin renklenmesi ise sesin orijinal renginin bozukluklar ile farklılaşmasıdır. Direkt sese eklenen güçlü yansımalar sonucu tepe ve vadiler oluşur. 0-25 ms arasında gecikmeler frekans tepkisinde gözüktür şekilde bir renklenme oluşturur. Daha uzun gecikmelerde ise renklenme karakter değiştirir ve ses sert ya da tekrarlayan olarak algılanır. Eğer gecikme 50 ms'nin üzerinde ise işitme sistemi iki farklı ses olayını çözümleyebildiği için yankı olarak algılanır. Renklenme ile ilişkilendirilebilecek psikoakustik atıflar ise perde, tını, tekrarlayan yankı ve yüksekliktir. Yükseklik kimi zaman da reverberasyon olarak algılandığı için zaman tepkisinde beliren renklenme reverberasyon ile gerçekleşir (Rubak 2004).

Güçlü yansımaların direkt ses ile etkileşime geçerek neden olduğu diğer bir fenomen de özellikle müzik hacimlerinde karakteristik ses rengi değişimine neden olan ‘renklenmedir’. Yapılan psikoakustik dinleme testlerine göre taraklanmanın gecikme süresinde ve yüksekliğine bağlı olarak neden olduğu renklenmede, duyulabilir

renklenme eşiği gecikme süresi arttıkça ya da yansıma mesafesi arttıkça artmaktadır. Eğer yansımaların gecikme süresi 30 ms'den fazla ise renklenmeye ya da ses renginde değişikliğe neden olmasa da yansımalar, zaman ekseninde sinyal tekrarlarına neden olmaktadır (yankı – tekrarlayan yankı). Bunun nedeni, kulağımızın sadece bir frekans analizatörü olmadığını aynı zamanda ses sinyalindeki yapısal değişikliklere hassas olduğudur. Bunun için mekanların karmaşık sinyal tepkisi ölçüldüğünde, reflektogram analizine veya sinyal tepkisine bakıldığında belirgin bir tepe yapan yansımanın yankı olarak algılanıp algılanmayacağı Dietch ve Kraak tarafından yankı ölçütü denklemi ile analiz edilmiştir (Kuttruff 2009).

$$t_s(\tau) = \int_0^\tau |g(t)|^n t dt / \int_0^\tau |g(t)|^n dt \quad (2.20)$$

$g(t)$ hacmin sinyal tepkisini göstermektedir.

Farkın büyüklüğüne bağlı olarak yankının yüksekliğini belirleyen değerlendirme ise aşağıdaki bağıntı ile yapılmaktadır.

$$EC = \text{maksimum} \frac{\Delta t_s(\tau)}{\Delta \tau} \quad (2.21)$$

EC: yankı ölçütü

$\Delta \tau$: yansımanın direkt sese göre farkı

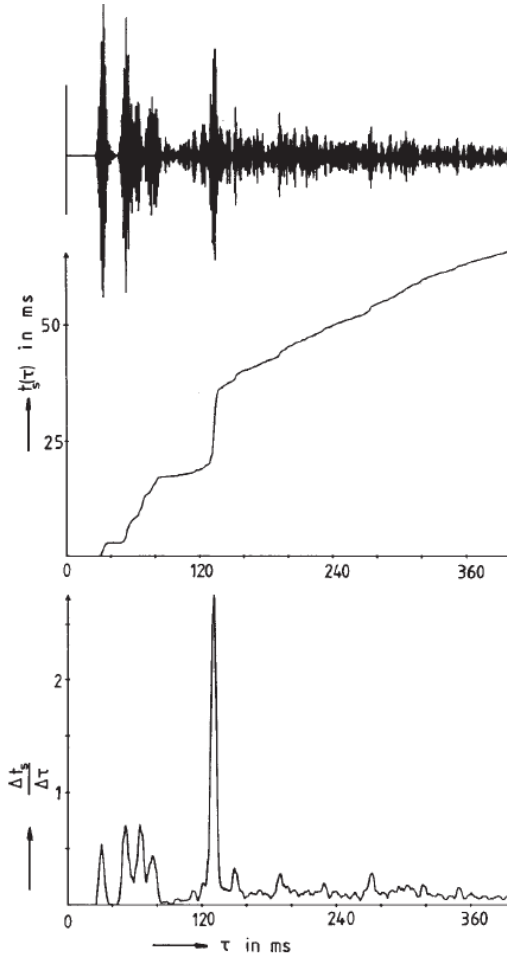
Δt_s : monoton fonksiyonu (2.20)

Yankı ölçütü, bütün yansımalar göz önünde bulundurularak alıcı noktasındaki sinyal tepkisine bağlı olarak analiz edilir. Psikoakustik testlerle Dietsch ve Kraak tarafından elde edilen konuşma ve müzik için yankı ölçütleri Çizelge 2.2'deki gibidir. Konuşmada belirlenen yankı ölçütü müziğe göre daha düşüktür (Kuttruff 2009).

Çizelge 2.2 : Dietsch ve Kraak yankı ölçütü (Kuttruff 2009)

Sinyal Tipi	n	$\Delta \tau$ (ms)	EC (yankı ölçütü)	Test sinyali oktav bandı
Konuşma	2 / 3	9	1.0	700-1400 Hz
Müzik	1	14	1.8	700-2800 Hz

Şekil 2.18'de bir odaya ait sinyal tepkisinin ilk 400 ms (en üstteki grafik) kısmı, oluşum fonksiyonu $t_s(\tau)$ (orta grafik) ve mutlak farkı $(\Delta t_s(\tau))/\Delta \tau$, $\Delta \tau = 5\text{ms}$ (alt grafik) vermektedir. Buna göre ani uyarı yanıtında oluşan sıçramanın yankı ölçütü 2.75'tir.

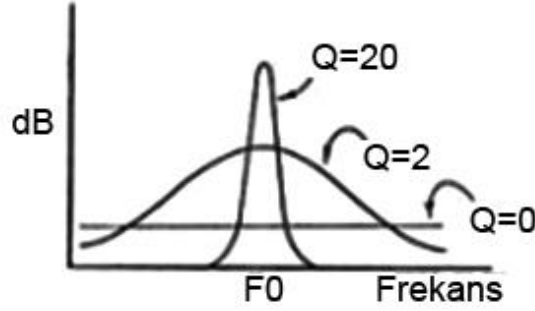


Şekil 2.18 : Sinyal tepkisinin ilk 400 ms (en üstteki grafik) kısmı, oluşum fonksiyonu $t_s(\tau)$ (orta grafik) ve mutlak farkı $\frac{\Delta t_s(\tau)}{\Delta \tau}$, $\Delta \tau = 5\text{ms}$ (alt grafik) vermektedir (Kuttruff 2009).

2.2.1.7 Mod dağılımı ve Q-faktörü

Küçük hacimlerde genel olarak oluşan akustik kusurlar, oda boyut ve oranlarına bağlı rezonansların ve modların etkisiyle frekans cevabında oluşan tepe vadilere ek olarak hacim içerisindeki basınç dağılımındaki düzensizliklerdir. Frekans spektrumu değerlendirilirken öncelikli olarak Q-faktörü değerlendirmesi yapılmaktadır. Q-faktörü, frekans tepkisinde oluşan tepe ve vadilerin algıdaki etkisini mod şekline göre değerlendiren bir ölçüttür. Buna göre Q-faktörünün artması düşme süresindeki artışı, mod oluşturan frekansın sivrilmesini ve algılanabilirliğinin artışı göstermektedir (Fazenda ve Wankling 2008). Küçük hacimlerin değerlendirilmesinde modların önemi büyük olmakla beraber öznel ve nesnel araştırmalar ile yapılan tasarımların etkinliğini ölçmek üzere bazı optimum aralıklar belirlenmiştir. Frekans cevabının Q-faktörü ile ilişkisi Şekil 2.19’da belirtildiği gibidir. X ekseninde ses basıncı düzeyi ve y ekseninde

frekans bilgisi olan odanın frekans cevabı analiz edilerek elde edilir. Rezonansların etkisi ve dolayısıyla frekans cevabındaki belirginliği arttıkça frekans tepkisinde ilgili rezonant frekansın bant genişliği azalarak genliği artar. Şekilde verilen Q20 ile hesaplanmış olan eğrinin bant genişliği (bandwidth) en az ve genliği en fazladır. Q0'da ise tepe oluşmamıştır ve rezonans algısı yoktur.



Şekil 2.19 : Frekans cevabının Q faktörü üzerinden değerlendirilmesi (Noxon 1986)

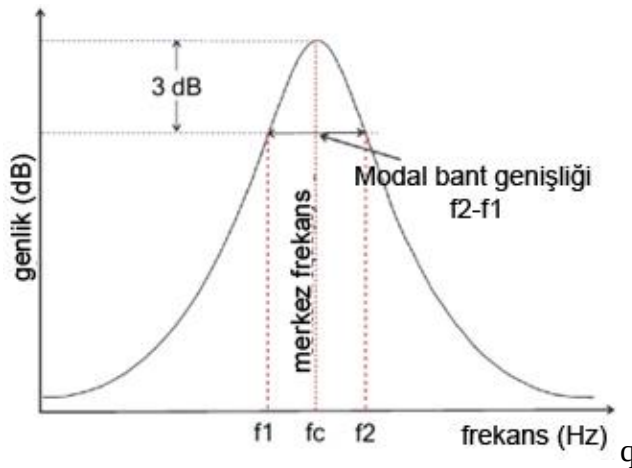
Q faktörü aşağıdaki bağıntıya göre hesaplanır. Mod frekansının (F_c), 3dB altındaki frekans farkına (ΔF) yani modal bant genişliğine oranıdır (Noxon 1986). Şekil 2.20'de modal bant genişliği, merkez frekansı ve genlik tanımları frekans tepkisi grafiği üzerinde gösterilmiştir.

$$Q = \frac{F_c}{\Delta F} \quad (2.22)$$

Q: Kalite Faktörü

F_c : Merkez frekans ya da mod frekansı

ΔF : Bant genişliği

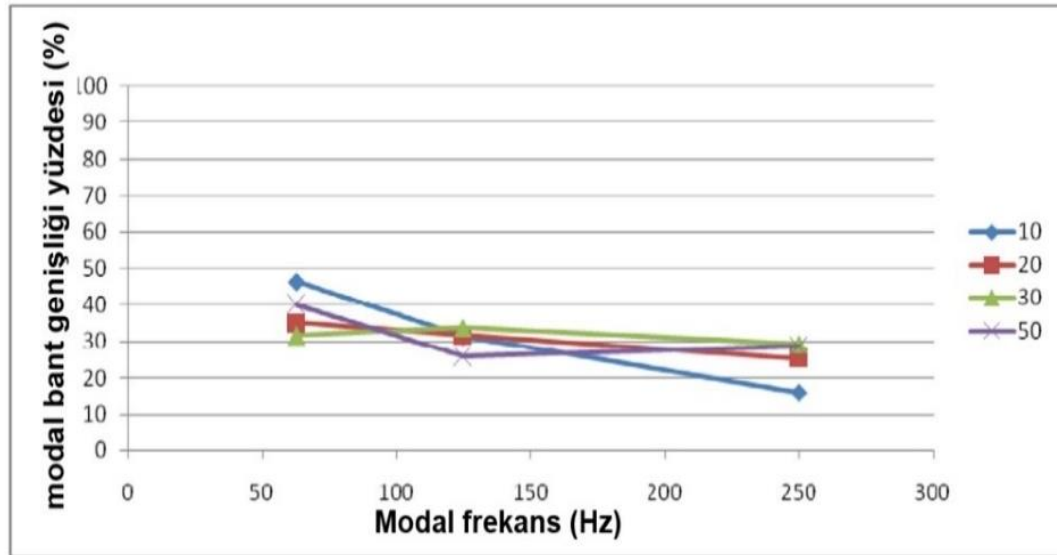


Şekil 2.20 : Q faktörünün hesaplanması (Fazenda ve Wankling 2008)

Optimum Mod Aralığı

Mod aralıklarının belirli bir bant aralığında artması modal yoğunluğun azalması ile ilişkilidir. Hacim arttıkça modal yoğunluk da artmaktadır. Benzer şekilde frekans yükseldikçe modal yoğunluk yine artmaktadır. Hacim artışı odanın boyut oranlarının değişmemesi durumunda mod şekli değişmeden belirli frekans aralığında daha sıkışarak belirmektedir. Basitçe frekans tepkisinde iki rezonans arasındaki mesafe görsel olarak araştırıldığında aradaki mesafenin artması düşme süresindeki azalımı açıkça ifade eder. Bununla beraber, ikinci frekansın mesafesi arttıkça frekans tepkisi genişliğinde geniş bir vadi oluşmakta ve sinyal tepkisi ayrımlaşan bir genlik modülasyonuna sahip olmaktadır (Fazenda ve Wankling 2008).

Rezonansların algılanabilirliğine ilişkin yapılan çalışmalarda öznel değerlendirme testleri ile nesnel hesaplamalar karşılaştırılmış, Şekil 2.21’de belirtilen grafik ortaya konmuştur. Buna göre Q20-30-50 değerleri için benzer optimum aralıkları çıkmıştır ve mod aralığı %25 ile %40 aralığındadır. Q20 değerinin altında düşme süresi çok azaldığı için katılımcıların algılamaları ve değerlendirmeleri zorlaşmış, standart sapma artmıştır (Fazenda ve Wankling 2008).



Şekil 2.21 : İki komşu mod arasındaki optimum frekans aralığı (Fazenda ve Wankling 2008)

Öznel değerlendirme yöntemi ile elde edilen sonuçlar gösteriyor ki; alçak frekanslarda daha yakın aralıklı modlar tercih edilmekte ve kötü bir mod yerleşimi özellikle frekans düştükçe daha algılanır hale gelmektedir. 250 Hz üzerinde mod sayısının artması ve mod aralıklarının daralması nedeniyle modların algılanması zorlaşmaktadır, bunun

yanı sıra Q10 değeri yapılan değerlendirmelerde algı zayıfladığı için sonuçlarda sapma oluşmuştur. Q16 değeri modların ve aralıklarının algılanmasında eşik değeri olarak belirlenmiştir (Stephenson 2012).

2.2.1.8 Modal düşme süresi (Modal Decay Time)

Reverberasyon süresi kaynak kapatıldıktan sonraki enerji yoğunluğunun 60 dB düşmesi olarak tanımlanmaktadır. Dağınık bir ortamda (Schroeder frekansının üstü), ses davranışı istatistiksel ve frekans tepkisi düz bir eğriye sahiptir. Bunun nedeni, oluşan modların sık olması ve oda rezonanslarının yakınlığı nedeniyle birbirinden ayırt edilememesidir. Bu durumda basitçe reverberasyon, belirli bir frekansta zamansal enerji azaltımının ortalanmasıyla hesaplanabilmektedir. Modların etkili olduğu bir ses alanında ise rezonansların etkileşimiyle azalım eğrisinde farklı eğriler oluşmaktadır. Modların algılanmasında frekanslardaki düzey değişimlerine ek olarak o frekanslardaki düşme süreleri de etkilidir. Dolayısıyla modların etkisiyle modal frekanslarda oluşan indirekt azalım süresi frekans tepkisinde oluşan tepe etkisinin ve keskinliğinin (Q-faktör) analizi ile belirlenebilmektedir. Bu nedenle modların etkin olduğu frekanslarda modal düşme süresi (MT_{60}) dolaylı olarak Eq (5)'te verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır (Prato, Casassa, ve Schiavi 2016).

$$T_{modal} = \frac{2.2 \times Q}{f_c} \quad (2.23)$$

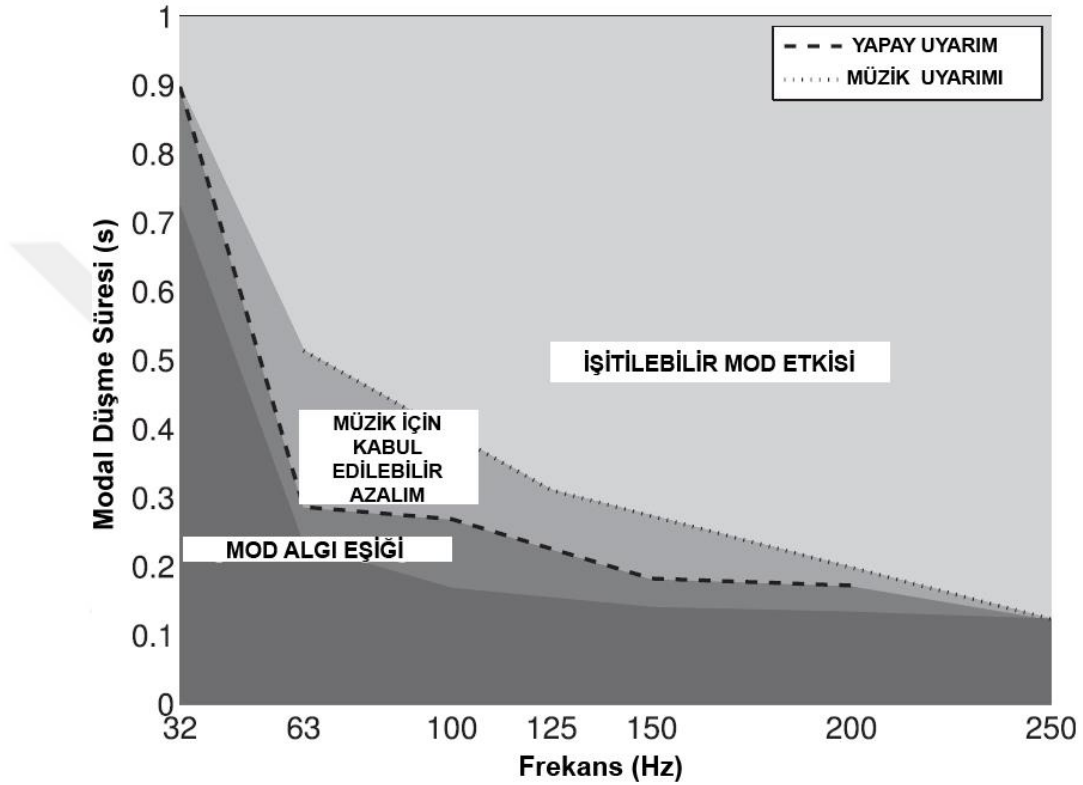
T_{modal} : Modal düşme süresi, MT_{60} (s)

Q: Kalite faktörü

f_c : Mod frekansı (Hz)

Modal düşme süresinin frekans ve ses düzeyi ile ilişkisini araştıran, kayıt stüdyoları kapsamında yapılan ve öznel dinleme testleri ile desteklenen çalışmalarda, algının uyarım tipine bağlı olarak değiştiğini ve frekans yükseldikçe eşik değerinin azaldığı görülmektedir (Şekil 2.22). Müzik tipi uyarımda, yapay sinyal tip uyarımdan farklı olarak maskeleme etkisi dahil edilmiştir ve maskelemenin etkisiyle mod algı eşiği yükselmiştir. Özellikle bu etki işitmenin 63 Hz'de daha belirgin hale gelmiştir ve işitme hassasiyet eşiğine bağlı olarak değişmektedir. Daha detaylı bir şekilde test sonuçlarına ve grafik gösterimine bakıldığında, yapay uyarımda eşik seviyesinin 100 Hz'ye kadar hızlı bir şekilde düştüğü görülmektedir. Müzik tipi uyarımda ise eşik seviyesinin monoton bir şekilde azaldığı görülmektedir. Yapay uyarımda, ortalama olarak eşik

seviyesi 32 Hz'de 0.9 s, 63 Hz'de 0.3 s, 100 Hz'de 0.27 s, 150 Hz'de 0.18s ve 200 Hz'de 0.17s'dir. Bunun yanı sıra müzik tipi uyarımda ise ortalama eşik değerleri 63 Hz'de 0.51 s, 125 Hz'de 0.3 s, 250 Hz'de 0.12 s'dir. Mod kontrolü için yapılan tasarımların etkinliğinin değerlendirilmesinde eşik seviyesinin bilinmesi önemli rol taşımaktadır. Böylelikle yutucu sistemlerin tasarımı ve yerleşimi mod algısının eşik değerlerine uygun olarak sağlanabilmektedir (B. Fazenda, Stephenson, ve Goldberg 2015).



Şekil 2.22 : Modal düşme süreleri uyarım tipine bağlı algı eşiği bölgeleri (B. Fazenda vd. 2015)

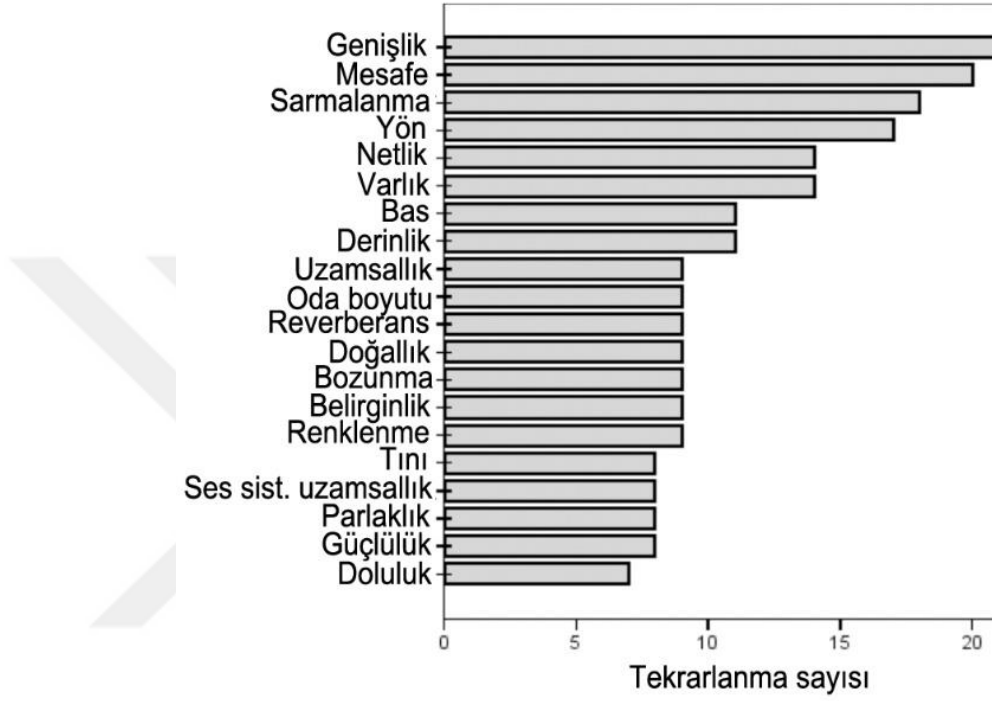
2.2.2 Küçük hacimlerde öznel değerlendirme parametreleri

Pek çok çalışmada araştırmacıların amacı öznel ve nesnel parametrelerin tutarlı bir şekilde müzisyen izlenimlerini, ihtiyaçlarını ortaya koymasıdır. Nesnel parametreler vasıtasıyla, çeşitli matematiksel modelleri, benzetim yöntemi ya da çeşitli ölçeklerde inşa edilen fiziksel modeller ile elde edilen fiziksel ortam değişkenlerinin etkisi gerçeğe çok yakın bir şekilde ortaya konmaktadır. Bununla birlikte öznel çalışmalar ise kullanıcı izleniminin ortaya konmasında ve nesnel verilerin desteklenmesinde büyük önem taşır. Çizelge 2.3'te müzik odalarının değerlendirilmesinde en çok kullanılan terimler ve açıklamaları verilmiştir (Long 2006).

Çizelge 2.3 : En çok kullanılan hacimlerin öznel değerlendirmelerinde en çok kullanılan terimler ve tanımları (Long 2006)

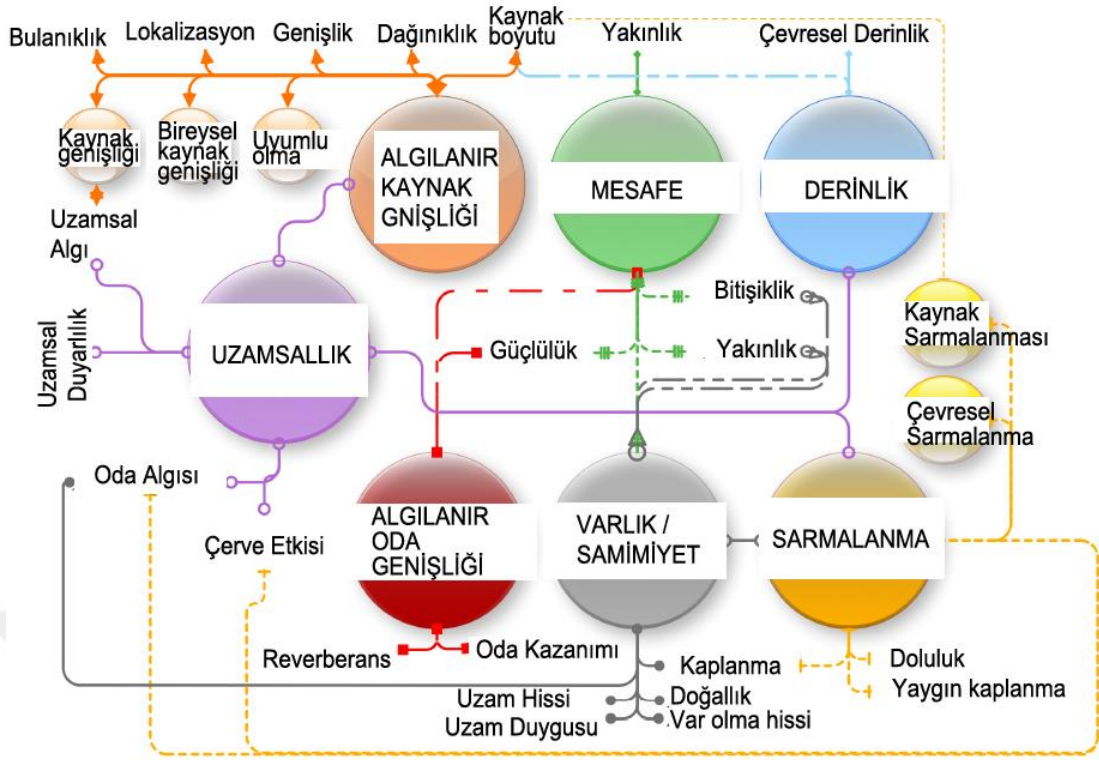
Terim	Tanım / İlgili Akustik Faktör
Akustik denge (Balance)	Vokal ve enstrümanlar arası eş gürlük olması
Akustik harmanlanma (Blend)	Enstrümanların harmonik karışımı
Parlama (Brilliance)	Yüksek frekanslarda geç azalışa sahip, net, parlak ve harmonik olarak zengin bir ses
Sesin netliği (Clarity)	Hızlı bir şekilde art arda gelen seslerin ayırt edilebilmesi
Sesin belirginliği (Definition)	Netlik ile benzer
Kuru ve ölü (Dry and Dead)	Reverberasyon eksikliği
Dinamik aralık (Dynamic Range)	Odada duyulan ses düzeyi aralığı. Arka plan düzeyi ile en yüksek düzey aralığı
Yankı (Echo)	Yeterli düzeyden sonra dileyiciye dönen uzun süreli yansımalar
Birlik (Ensemble)	Müzisyenlerde uyum içinde çalma algısı
Sarmalanma (Envelopment)	Dinleyiciye sesin her yönde gelmesi ile oluşan sarmalanma izlenimi
Kamaşma (Glare)	Düz yüzeylerden gelen aynasal yansımalar ile oluşan yüksek frekanslardaki sesin sertliği
Yakınlık (Immediacy)	Odanın bir sese çabuk yanıt vermesi. Erken yansımaların alıcıya çabuk iletilmesi ile ilişkili
Samimiyet (Intimacy)	Müziğin küçük bir hacimde çalınıyormuş gibi algılanması. Kısa ilk gecikme aralığı (ITDG) ile ilişkili
Canlılık (Liveness)	Orta ve yüksek frekanslarda reverberasyon süresi artışı (350 Hz üzeri)
Varlık (Presence)	Kaynağa yakın olma hissi, yüksek direkt – reverberant ses oranı ile ilişkili
Reverberasyon (Reverberation)	Kaynak kapatıldıktan sonra mekânda kalan ses
Uzamsallık (Spaciousness)	Kaynağın görünen limitlerinin ötesinde geniş algılanması
Doku (Texture)	Dinleyicinin, aldığı ardışık yansımalar ile edindiği öznel izlenim
Ses tınısı (Timbre)	Bir enstrümanı diğerinden ayıran sesin kalitesi
Ses rengi (Tonal color)	Farklı frekans aralıklarının birbiriyle dengeli olması
Ton kalitesi (Tonal quality)	Mekândaki tonların doluluğu
Sesin tekdüzeliği (Uniformity)	Ses dağılımının eşitliği
Sıcaklık (Warmth)	Alçak frekans reverberasyonu

Şekil 2.23'te mekân ve kaynak karakteri ilişkilendirilmesi ile ilgili kayıt stüdyoları kapsamında yapılan araştırmalarda, atıfların tekrar sayısı dağılımı verilmiştir. Buna göre üst kısımda yer alan atıflar mekân ile ilişkiliyken altı kısımlara doğru kaynak yapısı ile ilişkilendirilmektedir. En çok atıf sayısının mekân ile ilişkili olduğu, enstrüman ile ilişkili olan atıfların daha az sayıda olduğu görülmektedir (Rumsey 2002).



Şekil 2.23 : Öznel değerlendirmelerin mekân ve kaynak ilişkisi sıralaması (Rumsey 2002)

Küçük bir hacim ile büyük bir hacim arasındaki farklılıklar 3 kategoride toplanabilir: Sesin yayıldığı fiziksel ortamın özellikleri, ortamı tahrik eden kaynağın karakteri ve alıcının psikolojik ya da psikofiziksel durumu. Şekil 2.24'te küçük hacimlerle ilgili yapılan literatür taraması sonucunda elde edilen öznel değerlendirmeler arası ilişki ağı verilmiştir. Küçük hacimler kapsamında yapılan araştırmalardan elde edilen ilişki ağında büyük dairesel gösterim müzisyen izlenimini etkileyen ana atıfları, daha küçük daire ile belirtilenler ise olası alt kategorileri, kesikli çizgiler ise birbirleri arası ilişkiyi temsil etmektedir. Çalışmada reverberasyon süresinin büyük hacimlerde açıklayıcı olduğu, fakat küçük hacimlerde erken yansımaların algı tanımlayıcılarının açıklanmasında daha önemli olduğu ortaya konmaktadır. Atıfların geneli hacimdeki fiziksel koşullar ile ilişkiliyken, turuncu ile gösterilen ilişkiler ve atıflar kaynakla ilişkilidir (Kaplanis vd. 2014).



Şekil 2.24 : Öznel değerlendirmelerde ana kategoriler ve ilişkili oldukları alt kategoriler verilmiştir (Kaplanis vd. 2014)

2.2.2.1 Yansımaların algılanabilirliği

Hacimlerde yansıyan sesin algılanmasında genelde öznel olarak iki olay deneyimlenir:

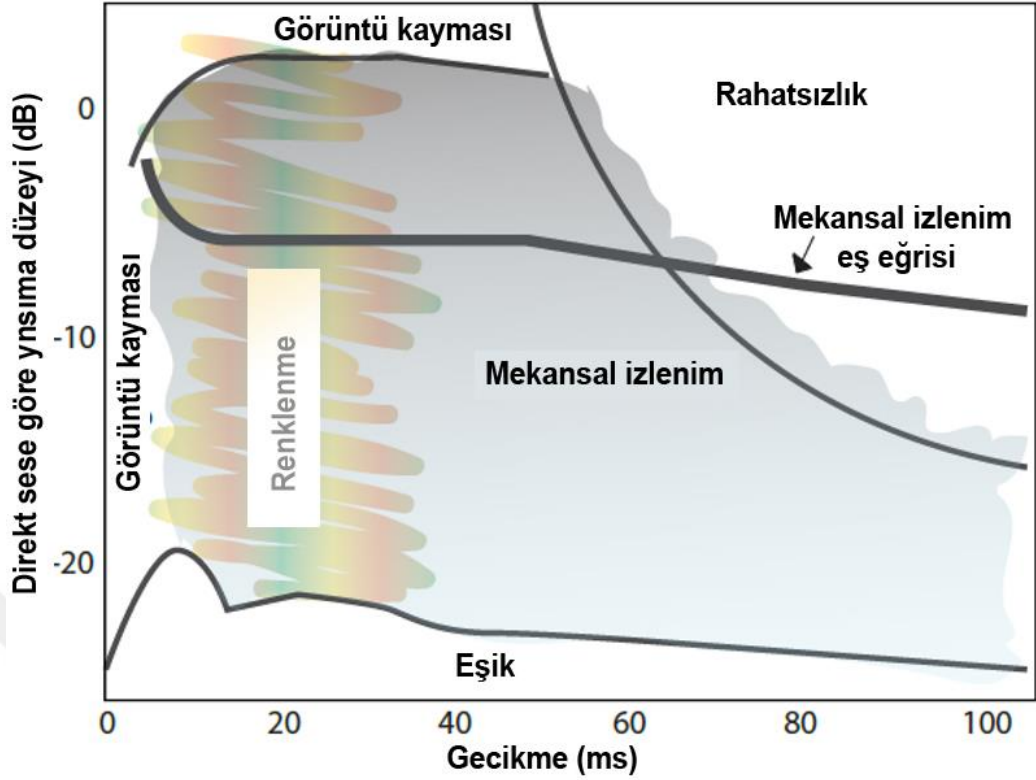
- Yansımalar belirli koşullar altında yankı halini alır. Kapalı hacimlerde ise bu olayın algılanması reverberasyon ile maskelendiği için daha zordur.
- Diğer bir ortak deneyim ise ses kaynağının yerinin belirginliğidir.

Eğer kapalı hacimde duvarların sönümlemesi çok değil ise, bütün yüzeylerden gelen yansımaların toplamı ile ses kaynağının yerini ve yönünü bir alıcı kolayca belirleyebilmektedir. Açıkça bu algıyı sağlayan, alıcıya ulaşan ilk ses sinyalıdır ve Kremer bu olayı ‘ilk dalga cephesi kanunu’ (the law of first wave front) olarak adlandırır (Kuttruff 2009). Yansımanın algılanabilirliği ele alınırken temelde cevaplanması gereken 2 soru vardır. Yansıma hangi koşullar altında tamamen algılanır olur ve hangi koşullar altında direkt ses tarafından maskelenir? Diğer bir soru da yansımanın hangi koşullar altında dinleyicide rahatsızlık yarattığı, yankı ve renklenme gibi sorunlara yol açtığıdır. Yansımasız hacimlerde yapılan dinleme testleri ile yapılan psikoakustik analizlerde, alıcıların öznel olarak algılama eşikleri elde edilmiştir. Bu testlerde yansımalar, gecikme süreleri ve düzeyleri değişken bir şekilde dinleyiciye

iletilmiş, sinyal tipine bağılı olarak 50 ms sonra gelen yansımaların algılanabilir olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca işitme sistemimiz yatay bileşenlere daha duyarlı olduğu için yanal yansımaların üst bölgeden gelen yansımalara göre daha etkin olduğu bilinmektedir. Bunun yanı sıra maskelemenin etkisi yanal yansımalara göre üst taraftan gelen yansımalarda daha fazladır. Shubert'in yaptığı çalışmalara göre, yansımalar konuşma yerine bir müzik sinyali ise, işitmemiz daha az duyarlı olmaktadır ve reverberasyon süresi arttıkça algılanabilir yankı eşik düzeyi de artmaktadır (Kuttruff 2009).

Renklenme sadece küçük hacimlerde değıl aynı zamanda konser salonlarında, sahne alanında yerleştirilen kanopi gibi yansıtıcı tavan panelleri ya da yansıtıcı sahne kabuğundan da kaynaklanabilmektedir. Orkestra üzerine yerleştirilen yansıtıcı paneller bütünlük koşullarını iyileştirirken, orkestranın bir kutu içerisine konulma etkisine neden olmaktadır. Bu etki istenmeyen renklenme olarak değıerlendirilir. Sinyal tepkisinin ilk ve erken kısımlarına bakılarak analiz edilebilir. 5-20 ms aralığında ve 50-200 Hz aralığında oluşan taraklama etkisine renklenme bölgesi denilebilir (Halmrast 2000). Naylor, müzisyenin kendi enstrümanın düzeyi ile diğıer enstrümanın düzeyi arasındaki denge noktasını araştırmıştır. Sonuç olarak yansımanın algılanabilirliğı enstrüman tipine bağılı olarak değıışmekle beraber eğıer diğıer enstrümanın düzey aralığı 15 dB ile -8 dB aralığında ise kendi enstrümanının duymakta güçlük çekmemektedir (Naylor ve Craik 1988).

Yansımaların spektral içeriğı ile beraber zamana bağılı değıışimi de algı değıışiminde önemli rol oynamaktadır. Barron tarafından erken yansımaların düzey ve geliş süresine göre öznel değıerlendirmede oluşan izlenimle ilgili klasik müzikle yapılan çalışmalarda ise Şekil 2.25'teki grafik oluşturulmuştur. Çalışmada direkt sestten sonra 100 ms'lik bir süre analiz edilmiştir. Buna göre 10 ms'nin altında gelen yanal yansımalarda, gelen yansımanın yönüne doğru görüntü kayması oluşmuştur. 10 ms sonrasındaki gecikmede ise uzamsal algıyı oluşturan erken yansımalar sese doluluk ve yapı kazandırmaktadır. Daha geç ve yüksek düzeyde gelen yansımalar yankıyı oluşturmaktadır (echo disturbance). Uzamsal algıda 40 ms'ye kadar olan erken yansımalar renklenmeyi oluşturmaktadır. Uzamsal algı eğrisinin üzerinde gelen yüksek düzeyde ve erken gelen yansımalarda ise olumsuz renklenme oluşmaktadır. Yansımaların bağılı düzeyinin -20 dB altında kalması durumunda ise işitme eğıişinin altında kaldığı görülmektedir. Eşik eğrisi 100 ms'ye doğru azalmaktadır. (Barron 1971).



Şekil 2.25 : Direkt sese göre gelen yansımanın süresine ve düzeyine göre oluşturduğu öznel etki değerlendirmesi (Barron 1971)

2.2.2.2 Reverberans ve netlik

Kaynak kapatıldıktan sonra hacimde kalan sesin öznel olarak algılanmasıdır. Sanders'ın salon koşullarını değerlendirmek amaçlı sahada anket yöntemi ile yaptığı çalışmada genel izlenim ve destek arasında yüksek bir ilişki bulmuş, kötü olarak değerlendirilen salonlarda reverberasyon düşük olarak değerlendirilmiştir (Sanders 2003). Prova hacimlerinde yapılan çalışmalarda, sönümlenmiş oda koşulları müzisyenler tarafından tercih edilse de uzun dönem prova koşulları için fazla "ölü" bulunmuştur (Osman 2005). Dolayısıyla yeterli reverberasyon süresinin elde edilmesi, müzisyen algısı ve performansı üzerinde etkilidir.

Aynı zamanda ideal durumda salon koşulları ile prova odaları koşullarının tutarlı olması beklenmektedir. Bu nedenle düşük reverberasyona sahip oda koşullarında yapılan provaların performansı etkilendiği belirtilmiştir. Diğer bir yandan enstrüman farklılığına bağlı olarak reverberasyon ihtiyacı değişmektedir. Dolayısıyla farklı enstrümanların kullanıldığı ortamlarda, farklı yutucu ve yansıma özelliğine sahip sistemler ile esnek koşulların sağlanması önerilmektedir (Halmrast 2013).

2.2.2.3 Uzamsal algı ve varlık

Kapalı bir hacimde olma ve sınırları algılama olarak değerlendiren varlık (presence), küçük hacimlerde öncelikli parametrelerdendir, konser salonlarındaki samimiyet ile denktir. Sarmalanma parametresi de küçük hacimlerde varlık ile benzer özellikler gösterir. Uzamsal algılamada varlığa katkı sağlayan zamansal değerlendirme parametresi ise ilk gecikme aralığıdır (ITDG). Zaman-gecikme spektrometresi (time-delay spectrometry) ile analiz edilen parametrede, özellikle taraklamanın etkin olduğu erken yansımaların etkisini ortaya koyar. Küçük hacimlerde özellikle sarmalanma, mekânsal algılamayı sağlayan parametrelerin analizinde kullanılabilecek nesnel parametreler, 80 ve 50 ms sınırlarını içermeyen yankı yoğunluğu ve merkez zaman parametreleridir (Kaplanis vd. 2014).

2.3 Küçük Hacimlerde Ses Alanını Etkileyen Fiziksel Parametreler

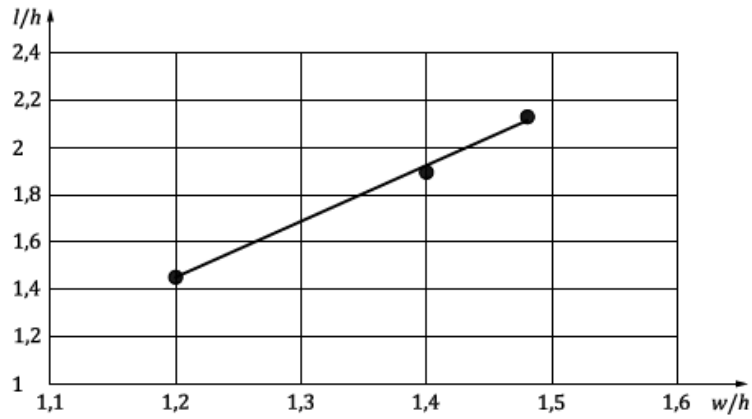
2.3.1 Oda hacmi ve boyutları

Tipik prova odalarında tavsiye edilen zemin alanı oturan bir vokal için 1,5 m² ve enstrüman çalan bir müzisyen için 3 m²'dir. Tavan yüksekliği ise 5 m ya da daha yüksek tercih edilir. Küçük prova hacimlerinde ise zemin alanı 20-45 m² arası değişmektedir. Çalışmalar göstermektedir ki bu alanların ses yüksekliği büyük gruplar için oldukça fazladır. Alçak tavanların dezavantajlarının tavanda kullanılan saçıcı ve ses yutucu sistemler ile minimize edilmesiyle birlikte büyük hacimli mekanların çok daha iyi ses alanına sahip olduğu bilinmektedir (Kleiner 2014). Son olarak ISO 23591:2021 standardı ile uygun hacim değeri ve buna bağlı olarak Reverberasyon süresi enstrüman ses gücü ve sayısına göre belirlenmektedir. Bölüm 1.4.2.1'de detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Uygun hacmin yanı sıra küçük hacimlerde uygun boyut oranlarının seçilmesi uygun mod dağılımının sağlanması amacıyla ilk tasarım adımıdır. 1896 yılında Rayleigh'in yaptığı çalışmalarda kapalı bir dörtgen hacimde sonsuz sayıda dalga titreşimleri ile modların oluştuğu ortaya konmuştur. Bu modların uygun dağılımı ile ilgili Gurin ve Nixon 1945'te yaptıkları çalışmalarda ile yükseklik, derinlik ve uzunluk arasında olması gereken oda boyutları için modların gruplanmasını minimize edecek şekilde öneriler ortaya konmuştur. Bonello'nun önerisi ise modların oluştuğu oktav bant açıklıklarının çok fazla olması durumunda frekans tepkisinde yarattığı tepe ve

vadilerin artması varsayımına dayalıdır. Bonello'nun önerdiği diğer bir ölçüt de mod frekanslarının çakışmıyor olmasıdır (Everest ve Pohlmann 2009).

ISO 23591:2021 'de 300 m³ altı odalar 20-200 Hz aralığı alçak frekanslarda modlara bağlı akustik kusurların önlenmesi için 1:1,2:1,44 ve 1:1,4:1,89 ve 1:1,48:2,12 oranları önerilmiştir. Bu odalar için önerilen ideal oda boyut oranları regresyon eğrisi Şekil 2.26'daki gibidir. Regresyon eğrisine ait denklem aşağıdaki gibidir. Aynı zamanda standartta, 300 m³ üzeri odalarda modların daha az öncelikli olduğu belirtilmekte fakat yine de kübik oda boyutundan kaçınılması gerektiği ve dağınıklık sorunu nedeniyle uzunluk/en oranının 1.6'yı geçmemesi gerektiği belirtilmiştir (International Standard Organization 2021)



w/h odanın eninin yüksekliğine oranı

l/h odanın boyunun yüksekliğine oranı

Eğri doğrusal regresyon çizgisidir.

Şekil 2.26 : İdeal boyut oranı için standartta belirtilen regresyon eğrisi
(International Standard Organization 2021)

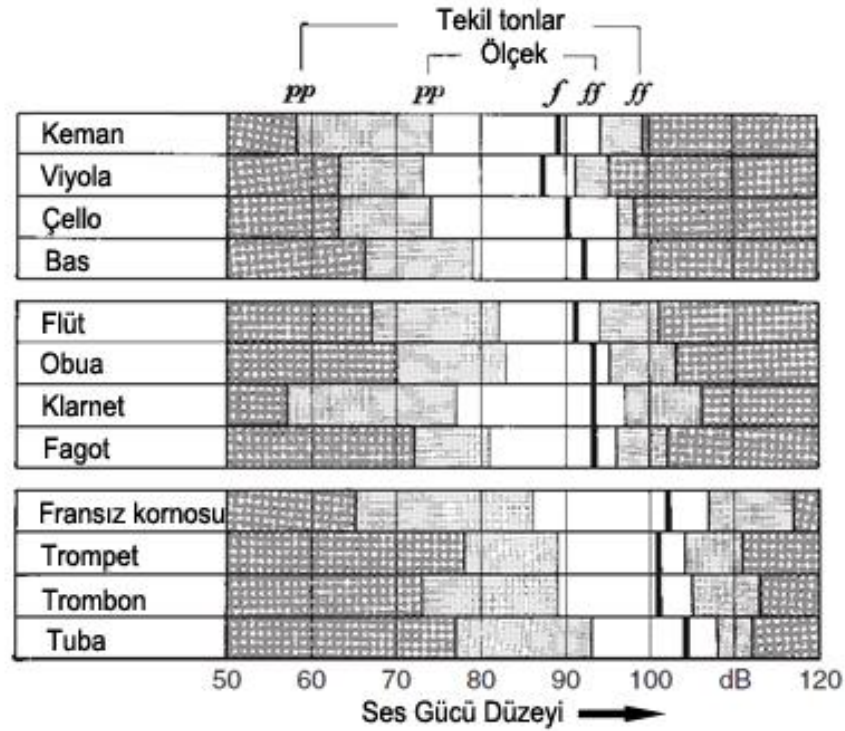
2.3.2 Enstrümanların karakteristik özellikleri

Müziği, perde, ses yüksekliği ve ton rengi bilgileriyle algılarken, perdenin durağanlığı, yükseklikteki dalgalanmalar, ton geçişlerinin ani ya da yumuşak oluşu, notanın düşüşü ile bazı yargılara varırız. Bütün bu detaylar, hangi enstrümanın çalındığı ve tınısı ile ilgili enstrümanın karakterini oluşturmaktadır (Meyer 2009).

Enstrümanın yarattığı müzikal bir ton gibi karmaşık sistemler sadece saf tondan oluşmamakta, aynı zamanda temel frekans ve üst harmonikleri olan üst seslerinden oluşmaktadır. Bu üst harmonikler temel frekansın katlarında oluşurlar. Temel frekans ilk harmoniktir ve n'inci sıradan olan üst ses (n-1)'inci harmonik adını alır. Müzikal ölçekte bu tonun bağıl pozisyonuna perde denir. Perde temelde frekansa karşılık gelse

de aynı zamanda iki komşu harmonik içerik arasındaki mesafeyi tanımlar (Rindel 2011).

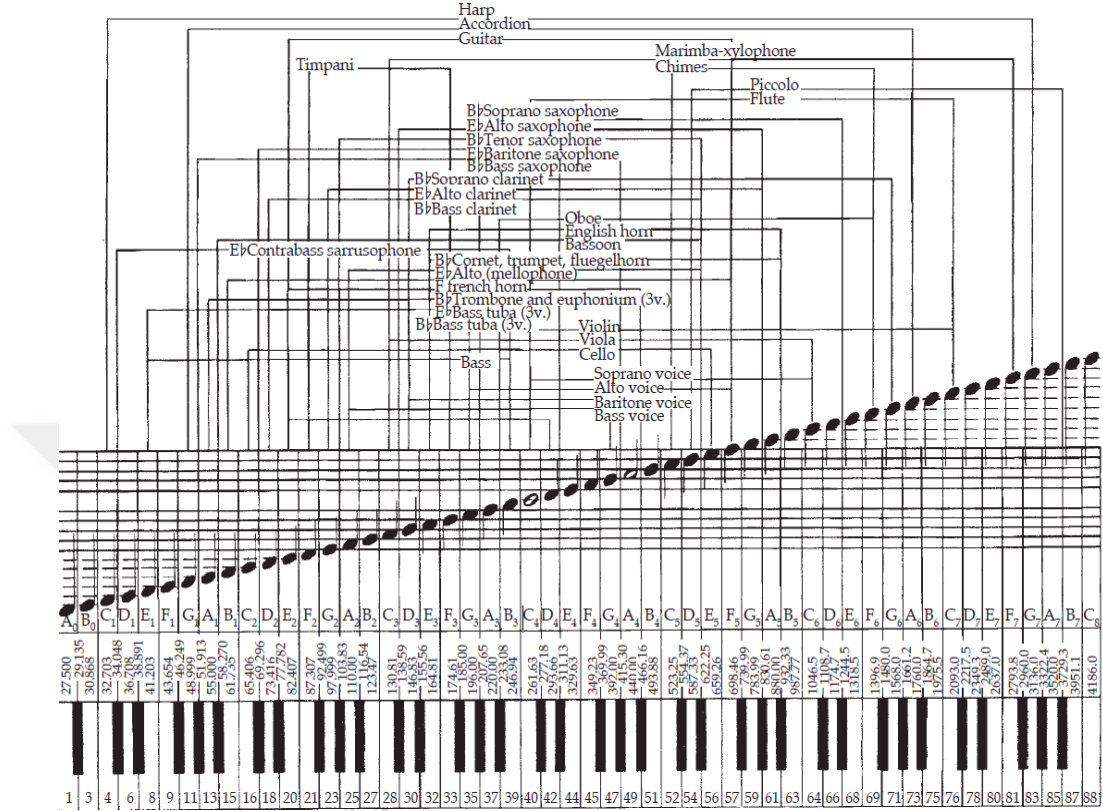
Enstrümanların akustik alan ile ilişkilerini belirleyen bileşenler enstrüman ses gücü, yayımı ve frekans spektrumudur. Enstrüman ses gücü hacim ISO 23591:2021 standardında, farklı kaynaklardan elde edilen enstrüman ses gücü düzeyi bilgileri verilmiştir. Şekil 2.27’de Meyer’in yaptığı erken çalışmalardan elde edilen enstrüman tipine göre dinamik aralık ve ses gücü düzeylerinin dağılımı verilmiştir (Meyer 2009). Dağılıma bakıldığında en alçak seviyede yaylı, orta seviyede üflemeli, en üst seviyede ise bakır üflemeli enstrüman grubu bulunmaktadır. Bununla birlikte dinamik aralığın genişliğine bakıldığında, yaylı grupta kemanın, ahşap üflemeli grupta klarnetin, bakır üflemeli grupta ise Fransız kornosunun diğerlerinden daha geniş dinamik aralığa sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 2.27 : Orkestra enstrümanlarının dinamik aralığına bağlı olarak ses gücü düzeyleri (Meyer 2009)

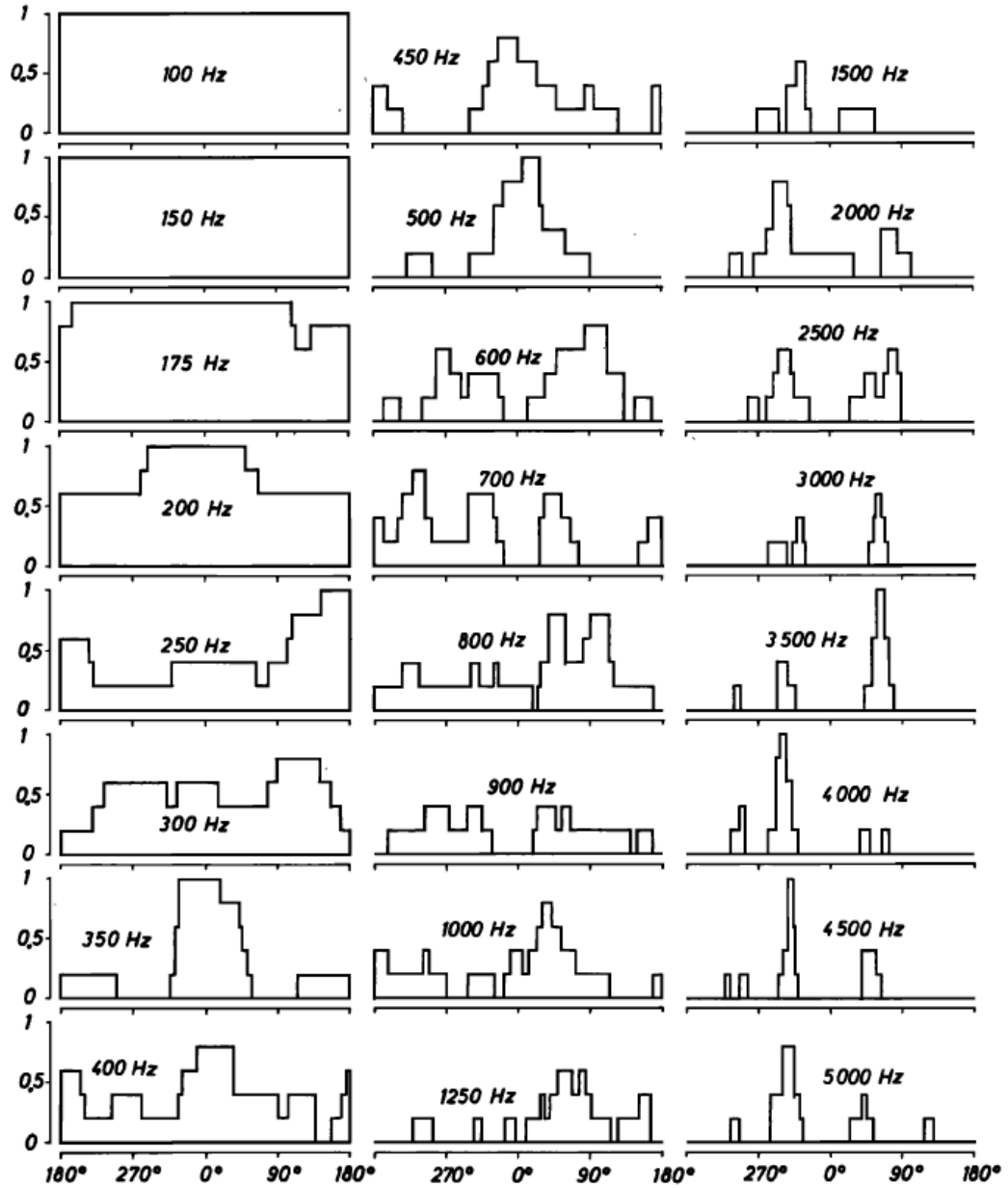
Enstrümanların frekans spektrumları fiziksel sınıflandırma açısından önemli bir bileşendir. Etkin oldukları frekans aralığına göre farklı akustik ihtiyaçları değişmektedir ve buna bağlı olarak farklı yüzey tasarımları gerekmektedir. Şekil 2.28’de enstrümanlara ait frekans spektrumları değer aralıkları, piyano notaları ile karşılaştırılarak verilmiştir. Verilen aralıklar dışında kalan alanlarda ise frekans

değişimi bir müzikal algı farklılığı yaratmadığı için sınırlar bu şekilde belirlenmiştir. Piyanonun ise en geniş frekans spektrumuna sahip enstrüman olduğu anlaşılmaktadır (Pierce 1983).



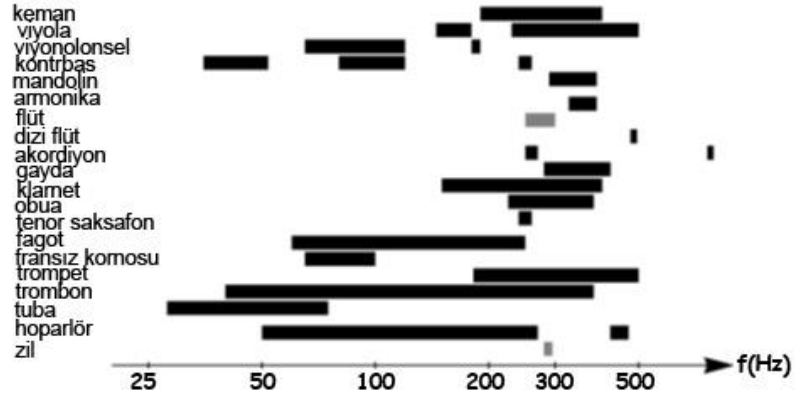
Şekil 2.28 : Piiano notaları ve müzik ölçeği ile ilişkilendirilmiş enstrümanların frekans spektrumları (Everest ve Pohlmann 2009)

Kapalı hacimlerde enstrümanın karakteri yönelime bağlı ton rengi olarak adlandırılabilir. Enstrüman, formuna, yapısına, malzemesine bağlı olarak her yöne farklı frekanslarda yayım yapmaktadır. Şekil 2.29’da yansısız odada ölçülen çellonun yönelme örüntüsü verilmiştir. Y ekseninde ölçeklendirilmiş ses basıncı düzeyi, X ekseninde ise plan düzleminde açılal değişim verilmiştir. Buna göre alçak frekanslarda her yöne benzer yayım yapmasına rağmen frekans yükseldikçe yöne bağlı farklılaşma oluşmaktadır. Şekilde enstrümanın 100 Hz, 150 Hz ve 175 Hz’de monopol davranış sergilediği, frekans artıka dipol, quadrupol ya da tek yönlü yayıma geçtiği görülmektedir (Meyer 1971). Bununla birlikte yönelme karakterinin hacim içerisindeki etkisinin analiz edildiği çalışmalarda, farklı yönelme özelliğinin hacim akustiği parametrelerinin dağılımında farklılık yarattığı görülmüştür. Benzetim sonuçları ile dinleme testleri karşılaştırıldığında, yönelme farklılığının sadece algılanabilir ses yüksekliği değerlerinde olduğu görülmüştür (Otondo ve Rindel 2004).



Şekil 2.29 : Çellonun frekansa bağlı yönelme karakteri (Meyer 1971)

Şekil 2.30'da orkestra enstrümanlarının alçak frekanslardaki yönelme özelliklerinin dalga teorisine uygun olarak yayım tipi değerlendirmesi yapılmıştır. Veriler Meyer'in çalışmasından alınarak hazırlanmıştır. Buna göre kaynakların noktasal yayım yapması genel olarak alçak frekans ile ilişkilendirilse de enstrümanın alçak frekanslarda farklı yayım yaptığı da görülmektedir. Siyah gösterim monopol yayım tipini belirtmekte ve gri gösterim dipol yayımı belirtmektedir. Özellikle alçak frekanslarda baskın olan fagot ve trombon gibi enstrümanların ya da hoparlör gibi ses kaynaklarının alçak frekanslarda monopol tipi yayım özelliğinin daha belirgin olduğu görülmektedir. (Ziemer 2014).

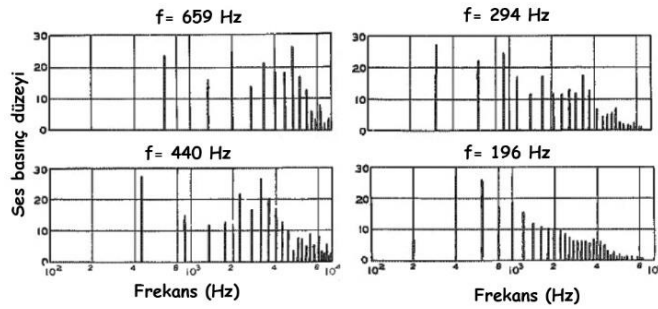


Şekil 2.30 : Enstrümanların monopol yayım yaptığı frekans aralıkları (Ziemer 2014)

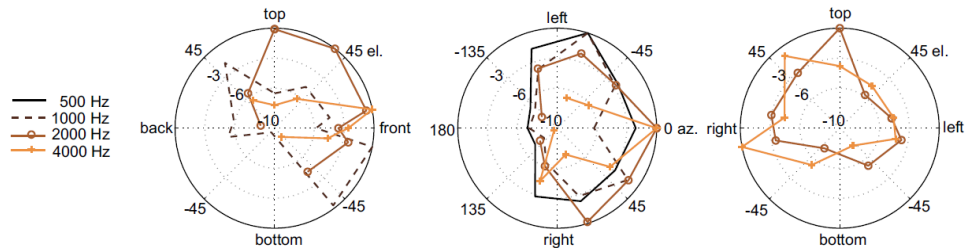
2.3.2.1 Telli enstrümanlar

Keman:

Şekil 2.31'de kemanın tellerine ait temel frekans ve üst harmonik bileşenleri grafiği verilmiştir. En üst tel ile en alttaki tel arasındaki fark çok belirgindir. Altındaki tel (196 Hz) çok daha harmoniktir. Bütün telli enstrümanların içinde bulunan harmonikler kemanda yer almaktadır. Bu da kemanın sesini güzel yapan faktörlerdendir (Olsson 1967). Şekil 3.32'de kemana ait yönelme özelliği 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz ve 4000 Hz'de verilmiştir. 500 Hz altı çok yönlü olmakla beraber 2000-6000 Hz aralığında ileri yönlü bir yayım vardır. Aynı zamanda zemin yönelimindeki ses basıncı çok azdır.



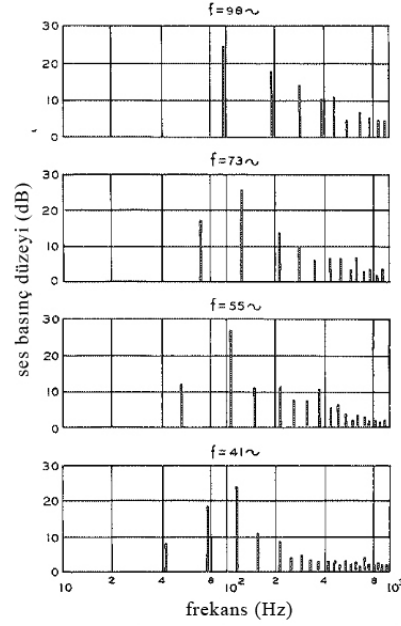
Şekil 2.31 : Kemanın temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967)



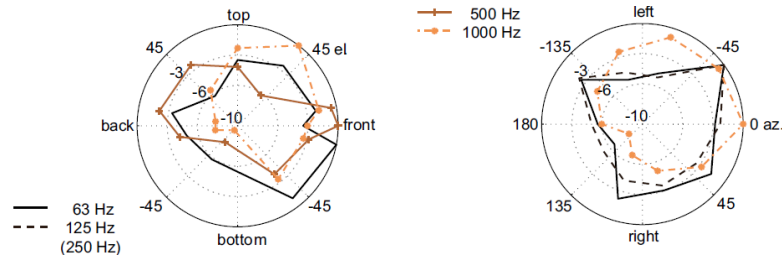
Şekil 2.32 : Kemanın plan ve kesit düzleminde çeşitli frekanslarda yönelme özelliği (Pätynen ve Lokki 2010)

Kontrbas:

Şekil 2.33'te kontrbasa ait temel frekans ve üst harmonik bileşenleri grafiği verilmiştir. Kemana yakın bir spektrumu vardır. 100 Hz'nin altındaki değerlerde temel tonlar zayıftır. Tek başına zayıf olsa da orkestrada bas sesleri güçlendirmede kullanılır (Olsson 1967). Şekil 2.34'te kontrbasa ait yönelme özelliği 63 Hz, 125 Hz, 500 Hz ve 1000 Hz'de verilmiştir. 500 Hz ve altı çok yönlü yayılım yapmaktadır. 1000 Hz'de ise yayım öne yönlü olmaktadır.



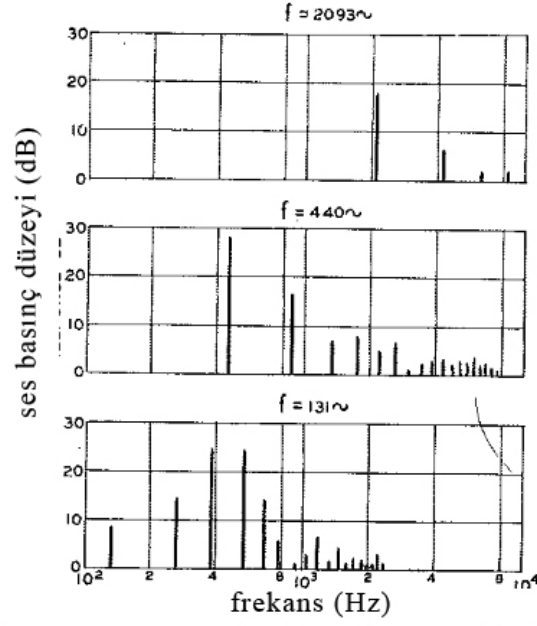
Şekil 2.33 : Kontrbasın temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967)



Şekil 2.34 : Kontrbasın plan ve kesit düzleminde çeşitli frekanslarda yönelme özelliği (Pätynen ve Lokki 2010)

Piyano:

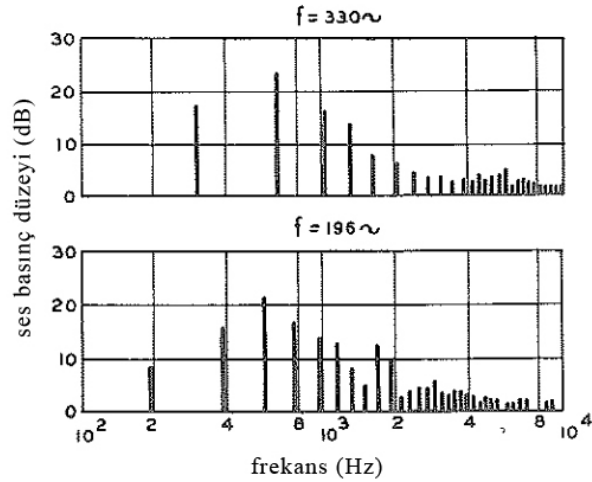
Şekil 2.35'te piyanoya ait temel frekans ve üst harmonik bileşenleri grafiği verilmiştir. Keman gibi piyanoda da bütün harmonik tonlar bulunmaktadır. Üst ton yapısı tuşlara basış hızıyla da alakalıdır. Şiddete bağlı olarak piyanist farklı ton kalitelerinde ses üretebilir. Üst oktavlarda frekansa bağlı ses basınç düzeyinde azalmalar daha fazladır. Alçak frekanslarda harmonikler açısından daha zengindir (Olsson 1967).



Şekil 2.35 : Piyanonun temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967)

Gitar:

Çekmeli telli enstrümanlardır. Şekil 2.36’da 2 tele ait temel frekans ve üst harmonik bileşenleri grafiği verilmiştir. Piyanodaki gibi telin şiddetine göre üst ton değerleri değişmektedir. Orta frekans harmonikleri ses basınç düzeyi daha yüksek iken yüksek frekanslarda ses basınç düzeyi daha düşüktür. Fakat üst harmonikler açısından zengindir (Olsson 1967).



Şekil 2.36 : Gitarın temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967)

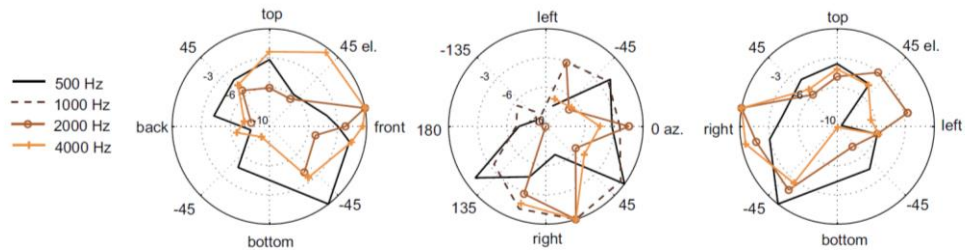
2.3.2.2 Ahşap üflemeli çalgılar

Üflemeli çalgıların diğer enstrümanlardan en önemli farkı ses üretme mekanizmalarının kendi içerisinde de farklılık göstermesidir. Flüt mekanizmasında

kesikli bir kenardan hava üflenmesi ile boru içerisinde titreşim yaratılır. Klarnette titreşen tek bir kamış kullanılırken, obua ve fagotta çift kamış kullanılır. Her durumda da deliklerin açılıp kapanması ile etkin uzunluk değiştirilerek bir uyum yakalanır.

Flüt ve Pikolo flüt

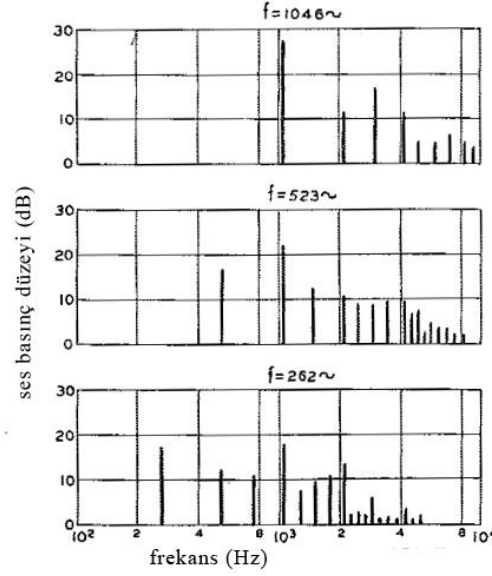
Helmholtz rezonatör sistemi ile çalışan senfoni orkestrası enstrümanlarından. Ağızlık kısmı diğer çift ve tek kamışlı enstrümanların aksine ses yayımı yapar. Açık, uzak ucu ve delikleri tekli harmoniklerde ses yayımı yaparken bütün delikler kapalıyken çiftli harmoniklerde ses yayımı yapar. Açık delikler özellikle orta frekanslarda yayım yaparken, açık ucu yüksek frekanslarda yayım yapar. Flüt yönelme özellikleri Şekil 2.37'deki gibidir. Şekilde hafif sesli (piano), güçlü (forte) ve daha güçlü (fortissimo) dinamik değerlerinin ortalaması alınarak yönelme özellikleri ortaya çıkarılmıştır. Müzisyenin yönü ön tarafa baktığından flütün açık ucu müzisyenin sağ tarafına bakmaktadır. Frekans bazında yönelme özellikleri karşılaştırıldığında 500 Hz'de yayım bölgelere ayrılırken, 2000 ve 4000 Hz'de daha homojen bir yayım oluşmuştur. 500 Hz'de ön bölgeye doğru bir yayım olurken, önemli bir kısım da müzisyenin soluna kaymaktadır. 4000 Hz'de yönelme özelliği artıran enstrümanın açık ucunda ses basınç düzeyi artmıştır (Pätynen ve Lokki 2010).



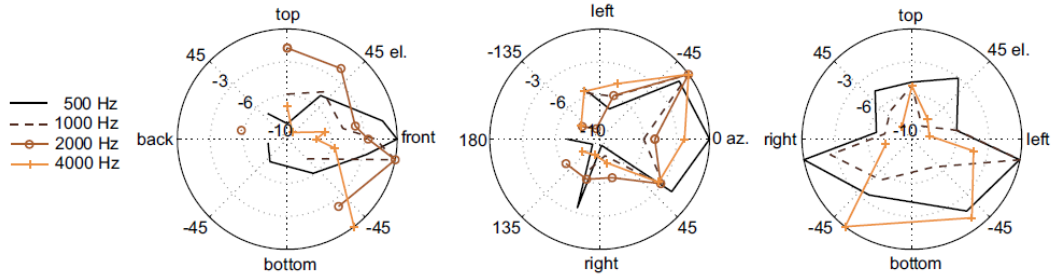
Şekil 2.37 : Flütün plan ve kesit düzleminde çeşitli frekanslarda yönelme özelliği (Pätynen ve Lokki 2010)

Obua:

Çift kamışlı enstrümanlara örnektir. Şekil 2.38'de obuaya ait temel frekans ve üst harmonik bileşenleri grafiği verilmiştir. Enerji en çok 500 Hz – 1500 Hz frekans aralığında toplanmıştır. Obuanın tonu parlak ve nettir. Alt tonları harmonik açıdan zengindir (Olsson 1967). Şekil 2.39'da obuaya ait yönelme özelliği 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz ve 4000 Hz'de verilmiştir. 500 Hz altında önemli bir yayım karakteri yoktur. Büyük ölçüde ön yarım küreye ve aşağı yönde yayım yapmaktadır (Pätynen ve Lokki 2010).



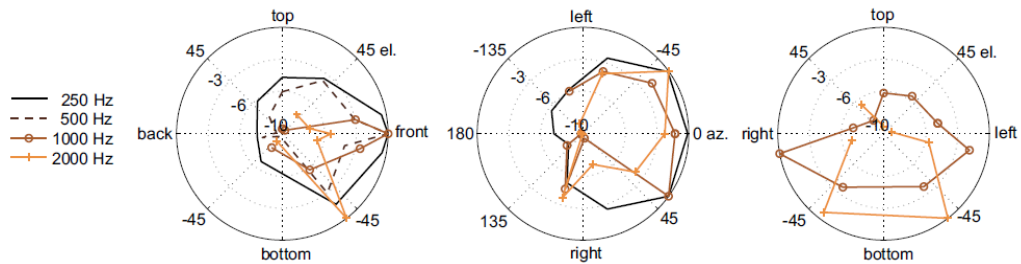
Şekil 2.38 : Obuanın temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967)



Şekil 2.39 : Obuanın plan ve kesit düzleminde çeşitli frekanslarda yönelme özelliği (Pätynen ve Lokki 2010)

Klarnet:

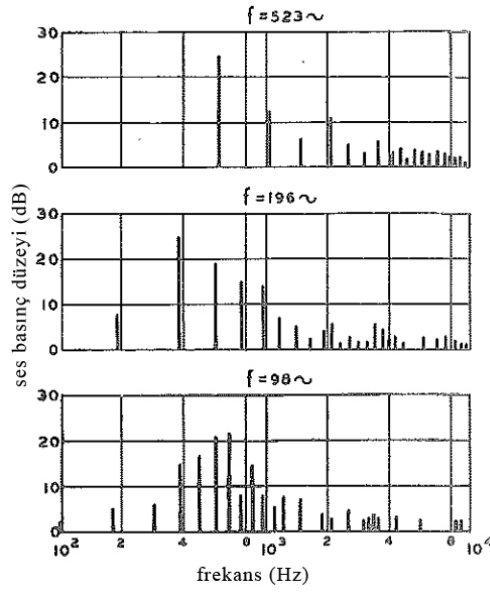
Fiziksel yapı ve görüntü olarak obua ile benzeşse de akustik açıdan çok farklı bir enstrümandır. Obuanın konik şekilde açılan yapısı varken klarnet silindirikdir. Bu nedenle harmoniklerde dahi ses düzeyi azdır. Şekil 2.40’da yönelme özelliği verilen oktav bantlarda genel olarak ön yarım küreye yayım yaptığı, 1000 Hz ve 2000 Hz’de alt tarafa doğru bileşenlerin arttığı görülmektedir (Pätynen ve Lokki 2010).



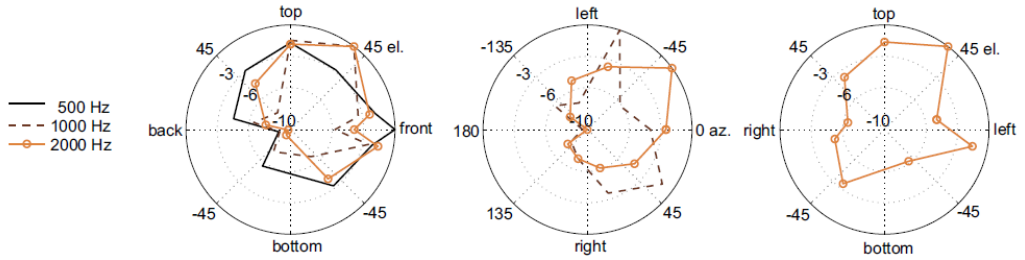
Şekil 2.40 : Klarnetin plan ve kesit düzleminde çeşitli frekanslarda yönelme özelliği (Pätynen ve Lokki 2010)

Fagot:

Çift kamışlı enstrümana örnektir. Şekil 2.41’de fagota ait temel frekans ve üst harmonik bileşenleri grafiği verilmiştir. 500 Hz civarı en baskın karakterli aralıktır. Sesi öznel olarak ‘garip’ şeklinde değerlendirilir (Olsson 1967). Şekil 2.42’de fagota ait yönelme özelliği 500 Hz, 1000 Hz ve 2000 Hz’de verilmiştir. Genel olarak plan düzleminde ön yarım küreye, kesit düzleminde ise her yöne yayım yaptığı görülür (Pätynen ve Lokki 2010).



Şekil 2.41 : Fagotun temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967)

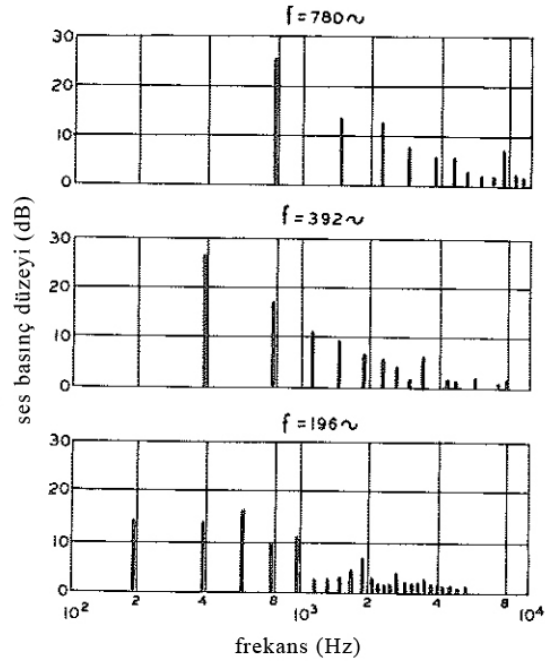


Şekil 2.42 : Fagotun plan ve kesit düzleminde çeşitli frekanslarda yönelme özelliği (Pätynen ve Lokki 2010)

2.3.2.3 Bakır üflemeli çalgılar

Saksafon:

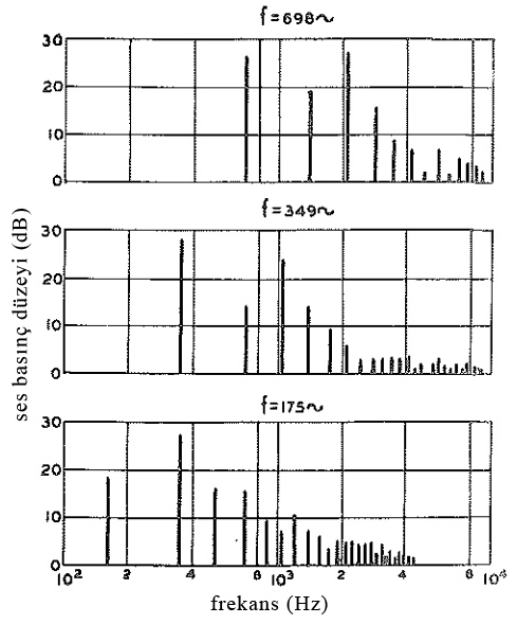
Tek kamışlı enstrümanlara örnektir. Şekil 2.43’te saksafona ait temel frekans ve üst harmonik bileşenleri grafiği verilmiştir. Üst tonlar enerji açısından kuvvetlidir. Tonu zengindir (Olsson 1967).



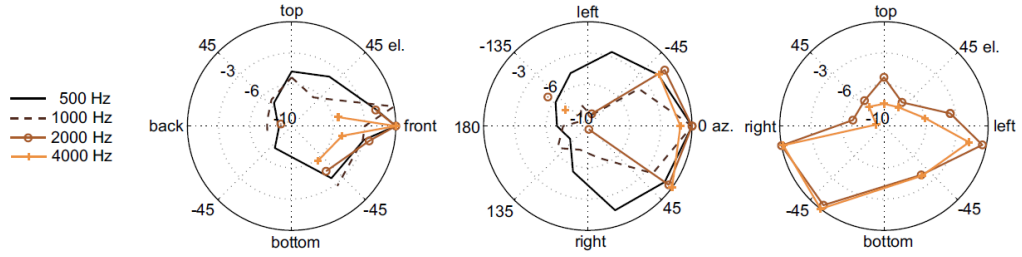
Şekil 2.43 : Saksafonun temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967)

Trompet:

Şekil 2.44'te trompete ait temel frekans ve üst harmonik bileşenleri grafiği verilmiştir. Harmonikler açısından zengindir. Tonu çok net ve parlak olarak değerlendirilir. Aynı zamanda yumuşak ve zengin olabilir (Olsson 1967). Şekil 2.45'te trompete ait yönelme özelliği 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz ve 4000 Hz'de verilmiştir. Büyük ölçüde ön yarım küreye ve alt kısma yayım yapmaktadır.



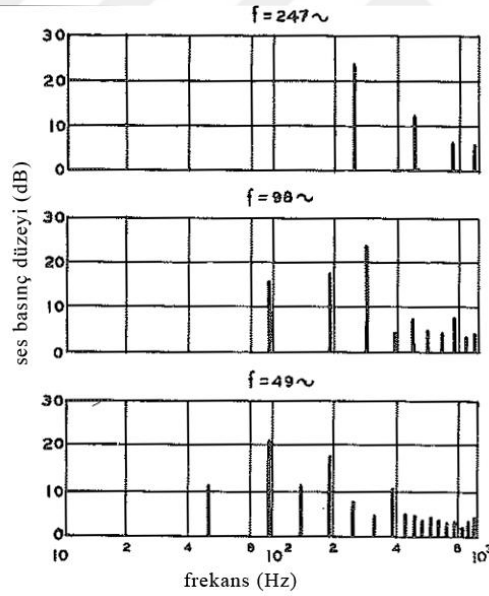
Şekil 2.44 : Trompetin temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967)



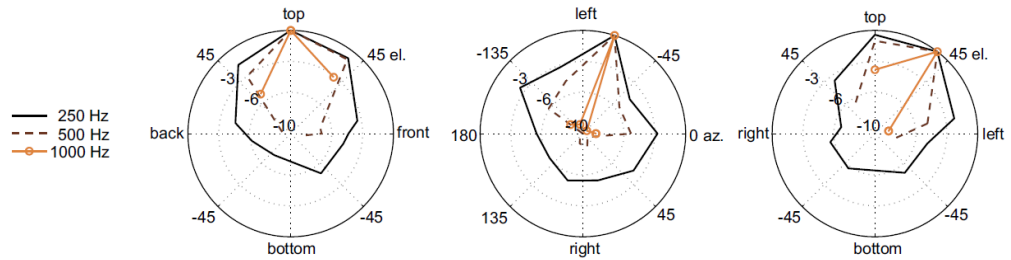
Şekil 2.45 : Trompetin plan ve kesit düzleminde çeşitli frekanslarda yönelme özelliği

Tuba:

Şekil 2.46’da tubaya ait temel frekans ve üst harmonik bileşenleri grafiği verilmiştir. En büyük ağırlıklı enstrümandır. 100 ve 300 Hz arası baskındır. Büyük oranda alçak frekansta ses üretir (Olsson 1967). Şekil 2.47’de tubaya ait yönelme özelliği 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz’de verilmiştir. Büyük ölçüde tüm yönlere yayım yapmaktadır (Pätynen ve Lokki 2010).



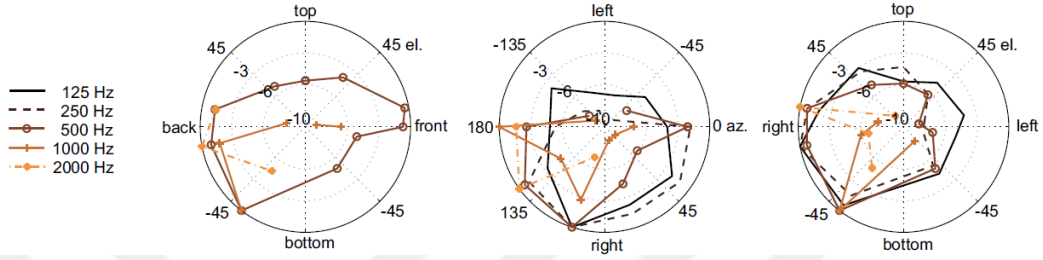
Şekil 2.46 : Tubanın temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967)



Şekil 2.47 : Tubanın plan ve kesit düzleminde çeşitli frekanslarda yönelme özelliği (Pätynen ve Lokki 2010)

Korno:

Bakır enstrümanlarda dinamik aralığa göre titreşen tonlar değişmektedir. Fortissimo çalınması durumunda özellikle korno enstrümanında üst tonlar daha çok tahrik olmaktadır. Şekil 2.48’de kornoya ait yönelme özelliği 125Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz ve 2000 Hz’de verilmiştir. Alçak frekanslarda çok yönlü bir yayılımı vardır. Alt kısma yönelen bileşenleri fazladır (Pätynen ve Lokki 2010).



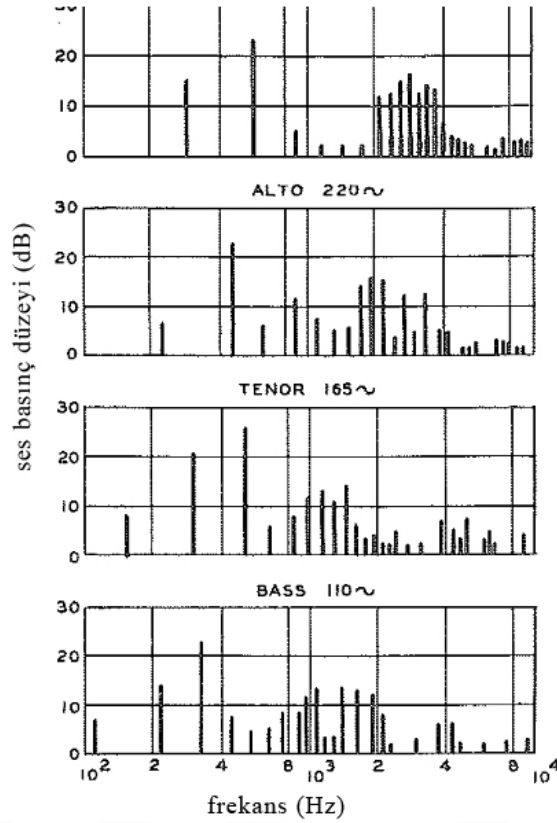
Şekil 2.48 : Kornonun plan ve kesit düzleminde çeşitli frekanslarda yönelme özelliği (Pätynen ve Lokki 2010)

2.3.2.4 Vokal

Vokalistlerle (bariton, soprano, alto) yapılan çalışmalarda (Marshall ve Meyer 1985), öncelikli olarak yansısız ortamda yönelme ölçümleri yapılmış, müzisyenler için gerekli olan koşullar kompleks ton ve tını, müzikal strüktür, bütünlük açısından değerlendirilmiştir. Hacimlerin tepkisi müzisyenler tarafından “oda rezonansı” olarak ifade edilmiş ve en çok RT ve erken yansıma karakteri öncelikli değerlendirme parametreleri olarak ifade edilmiştir. Çalışma sonucunda, ses tınısının 80° (azimuth)’den sonra fark edilir şekilde azaldığı, yansıtıcıların da buna uygun olarak tasarlanması gerektiği ortaya konmuştur. Yansımalarla ilgili diğer bir sonuç da müzisyenin önündeki 2 m ile 5 m arasının etkin alan olduğu ve bu alanda halı gibi yutucu malzeme kullanılmaması gerektiği olmuştur. Ayrıca tavan yansıtıcılarından çok yanal yansıtıcıların önemli olduğu (özellikle 60° bakış açısında) belirtilmiştir. Yansısız koşullar ya da çok yutucu ortamlar (ses kayıt stüdyolarında vokal kabin alanları) entonasyonda zorluk yaratırken, ortamdaki fazla yansıma ise, bütünlüğün zayıflamasına ve birlikte şarkı söylemenin zorlaşmasına neden olmuştur (Pätynen ve Lokki 2010).

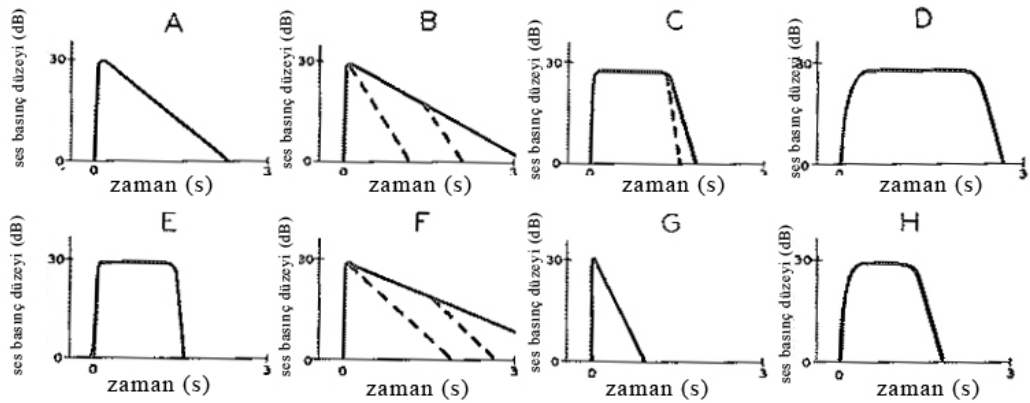
En esnek frekans aralığına sahip müzikal ses kaynağı vokaldır. Temel ve tek çift harmoniklerine sahiptir. Şekil 2.49’da bas tenor, alto ve soprano ses karakterlerinin

temel frekans ve üst harmonikleri verilmiştir. Akustik harmonik karakterleri aynıdır, fakat frekansları farklıdır (Olsson 1967).



Şekil 2.49 : İnsan sesinin temel frekansı ve harmonikleri (Olsson 1967)

Sesin yükselme ve alçalma karakteri, ses tonunun tınısını ve yüksekliğini belirlemektedir. Şekil 2.50’de farklı enstrümanların yükselme ve alçalma karakterleri verilmiştir.



Şekil 2.50 : Enstrümanların yükselme – durgun hal – alçalma karakterleri verilmiştir. A: tezeneli (çekmeli) çalgılar, B: vurmali telli çalgılar, C: yaylı telli çalgılar, D: org, E: üfleli çalgılar, F: perküsyon çalgıları, G: davul, H: insan sesi (sesli harf) (Olsson 1967).

A' da verilen tezeneli çalgıların yükselme süreleri kısadır ve hemen alçalmaya başlarlar. B' de verilen piyano gibi vurmali telli enstrümanların yükselme süreleri kısadır. Durgun hal süreleri yoktur ve hemen alçalma eğilimine geçerler. Alçalma süreleri diğer enstrümanlara göre daha uzundur. C' de verilen keman gibi yayli telli çalgıların yayın tekrar vurmasına kadar geçen süre uzundur. Durgun hal süreleri uzun olsa da çabuk snmlenirler. D ile gösterilen grafikte orgun yükselme süresi ve durgun hal süresi uzundur, fakat ses çabuk sönümlenir. E' de gösterilen üflemeli enstrümanlarda ses çabuk oluşur ve sesin durgun hal süresi fazladır. Bununla birlikte sesler çabuk sönümlenir. F' de verilen zil gibi perküsyon elemanlarında ses çabuk oluşur, hemen alçalma eğilimine geçer ve sönümlenme süresi en uzun enstrüman grubudur. G' de verilen davul grubu çabuk yükselip çabuk alalırlar. Vokalde ise ses yavaş yükselir, durgun hal süresi uzundur. Fakat abuk sönümlenme olur. En uzun durgun halde kalan enstrüman orgdur. Bunun yanı sıra en kısa sürede oluşup sönümlenen enstrüman davuldur. Enstrüman tipine bağlı olarak sesin oluşma mekanizmaları aşağıdaki gibidir.

Tezeneli algılar: Tel çekilip bırakılarak alınır. ekildiği zaman potansiyel enerji yüklenir ve tel bırakılır. Yükselme zamanı çok kısa olmasına rağmen titreşimi fazla olduğu için alçalma süresi fazladır. Gitar, harp gibi enstrümanlar bu tipe örnektir.

Vurmali telli algılar: eki darbesi ile teli titreştiren algılardır. Piyano bu tip çalgıya bir örnektir. ekiteki kinetik enerjinin tele geçmesi ile ses enerjisi ortaya çıkar. Dolayısıyla sesin yükselmesi kısa sürede olur. Pedal ile alçalma süresi ayarlanabilir.

Yayli telli algılar: algının telleri ile onu almakta kullanılan yayın kıllarının birbirine sürtülerek çekilmesi sonucu ses üretilir. Kısa sürede ses yükselir. Tel serbest bırakılırsa alçalma süresi uzundur. Fakat tele tekrar yay değerse süre kısaltılır. Kısalma süresi nokta olarak gösterilmiştir. Büyük borulu orglarda yükselme süresi diğerlerine göre daha uzundur. Alçak frekanslı türlerinde yükselme süresi artar.

flemeli aletler: Çoğunlukla orta frekanslarda işlev görürler. Ses titreşimi konik silindirik ya da kıvrık boru içinden geçtiği için yükselme süresi alçalma süresinden çok daha kısadır.

Perküsyon enstrümanları: Ses, darbe ile çıkar, dolayısıyla bu durumda yükselme süresi çok kısadır. Titreşim çok fazla olduğundan alçalma süresi çok fazladır. Davullarda

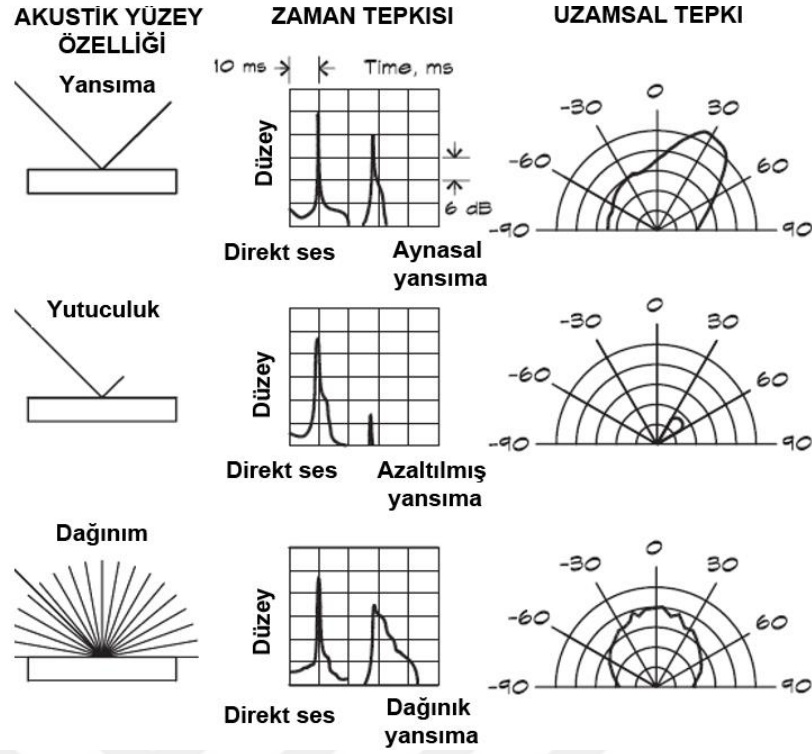
titreşimi sağlayan darbe olduğundan yükselme süresi kısadır. Titreşme engellemesi fazla olduğundan alçalma süresi kısadır.

Vokalde ise sesli harflerin yükselme süreleri fazladır. Sesli harf 0,2' den 1 s' ye kadar durgunluk süresine sahiptir (Olsson 1967).

2.3.3 Küçük hacimlerde akustik düzenleme sistemleri ve ses alanına etkileri

Modların etkin olduğu bir hacimde sesin sönümlenmesi dağınık bir alandan farklı olur. Durağan dalga bütün yüzeylere doğru yansımadağı, belirli ve daha az sayıda yüzeydeki yutuculuktan etkilendiğı için daha geç sürede sönümlenmektedir. Temel farklılık modal ses dalgasının rastlantısal gelişe sahip olmaması nedeniyle yüzeyin etkinliğı ve yutuculuk katsayısı azalır. Aynı zamanda alçak frekanslarda ses dalgasının rastlantısal açılarda gelmemesi nedeniyle mod frekanslarındaki seslerin düşme süreleri uzamaktadır. Dolayısıyla hacimde zamana ve ortalama yutuculuk değerine bağı tek bir logaritmik düşme eğrisi yoktur. Bunun yerine farklı frekanslarda, farklı uzunluklarda modal düşme eğrileri oluşmaktadır. Aynı zamanda yüzey mesafesine bağı olarak yansımalar arası zaman değışkendir. Modların sönümlenmesi, sadece yutuculuğun değışmesine bağı olarak değıil aynı zamanda yansımalar arası zaman uzunluğuna bağı olarak da dağınık bir ortamdan farklılaşır.

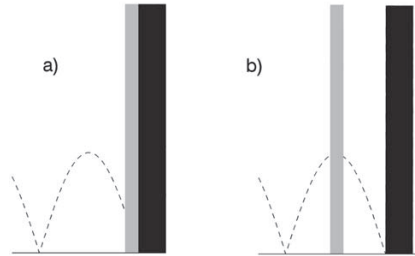
Saçıcıların oda modlarına etkisi analiz edildiğinde ise geometrik saçıcı sınır koşullarının mod yoğunluğunu artırdığı ve buna bağı olarak mod aralıklarının daraldığı görülmüştür. Frekans tepkisine bakıldığında ise tepe ve vadi noktalarının düzgün geometrideki hacme göre daha az olduğu saptanmıştır. Fakat mod şekilleri her iki durumda da oda boyutlarının değışmemesine bağı olarak değışmemiştir (Angus 1999). Şekil 2.51'de yüzeye bağı yansıyan dalganın zaman tepkisi ve uzamsal basınç dağılımında oluşturduğu tepki verilmiştir. Düzgün ya da aynasal yansıma olması durumunda alıcı noktasına ilk olarak direkt ses sonrasında ise geliş açısı ise aynı açıyla yansıyan, enerjisi yüksek ses dalgası ulaşır. Yüzeyin yutucu olması durumunda yansıma, yüzey yutuculuk katsayısına bağı olarak sönümlenerek enerjisi daha düşük bir şekilde alıcı noktasına ulaşır. Enerji-zaman eğrisinde yansıyan enerji düzeyi düşüktür. Yüzeyin saçıcı olması durumunda ise ses yansıması her yöne doğru gerçekleşir. Alıcı noktasına ise enerjisi giderek azalan ve zamana yayılan yansımalar ulaşır (Kuttruff 2009).



Şekil 2.51 : Yüzey sistemlerinin uzam-zaman etkileşimi (Kuttruff 2009)

2.3.3.1 Sesin sönümlenmesi ve sönümleyici sistemler

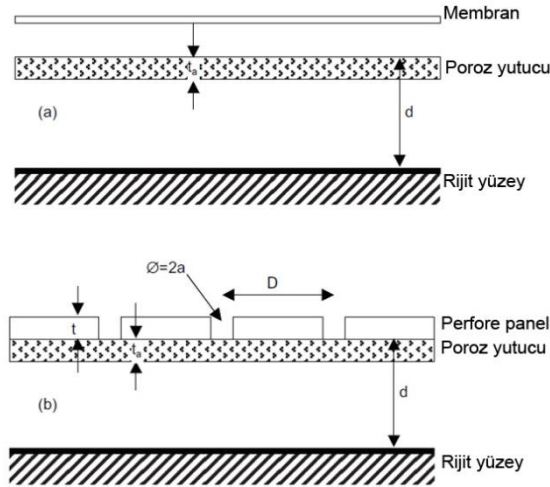
Poroz tip yutucular: Yutuculuğun belirlenmesinde kullanılan temel değişkenler; akış direnci (flow resistivity), gözeneklilik, kalınlık ve uygulama şeklidir. Akış direnci, havanın gözenekler içerisine girişini ve malzeme strüktürü boyunca hava akışının nasıl bir dirençle karşılaştığını belirler. Malzeme porozitesi, havanın hacminin malzeme hacmine oranıdır (Cox ve D'Antonio 2004). Şekil 2.52'de poroz tip yutucunun uygulama şeması verilmiştir. Arkasında hava boşluğu uygulanması durumunda boşluğun derinliğine bağlı olarak alçak frekanslardaki etkinliği bir miktar artmaktadır.



Şekil 2.52 : Gözenekli malzemenin duvar yüzeyinde uygulanışı a) arkasında hava boşluğu olmadan b) arkasında hava boşluğu ile (Kuttruff, 1973)

Rezonant tip yutucular ve bas tuzakları: Rezonant sistemler yaya bağlı titreşen bir kütle mekanizmasına benzer şekilde çalışırlar. Membran tip yutucular ve Helmholtz

rezonatörleri olarak iki ayrı sistemde incelenebilirler. Boşluğun derinliğine bağlı olarak rezonant frekansı belirlenir.



Şekil 2.53 : Tipik a) membran tip b) Helmholtz rezonatörü (Cox ve D'Antonio 2004)

Membran tip yutucular: İnce bir kütle ile titreşen bir zar sisteminden oluşur. Rijit duvar yüzeyi ile arasında kalan hava boşluğu ise yay gibi çalışır. Duvar yüzeyinde parçacık hızı minimum basınç maksimum olduğu için bu basıncı titreştirerek ısı enerjisine dönüştürür. Özellikle belirli frekanslarda oluşabilecek oda modlarının kontrolü amacıyla köşelerde ve yüzeyde uygulanabilecek ses yutucu sistemlerdir. Şekil 2.53'te iki sisteme ait fiziksel değişkenler gösterilmiştir. Rezonant tip sistemlerin hava boşluğunda herhangi bir gözenekli malzeme olmaması durumunda etkin olduğu frekans aşağıdaki bağıntıya göre hesaplanır (Long 2006).

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{md}} \quad (2.24)$$

f_0 : rezonant frekansı

m : panelin ağırlığı (kg/m^2)

d : hava boşluğunun derinliği

Helmholtz rezonatörleri: Perfore sistemlerde çalışma prensibi, kütle yükünün ve yay davranışı gösteren panel arkasında kalan hava boşluğu ve deliklerdeki hava boşluğunun entegrasyonuna dayanır.

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi a^2}{t'V}} \quad (2.25)$$

$$d = \frac{V}{D^2} \quad (2.26)$$

f_0 : Rezonant frekansı

c_0 : Sesin havadaki hızı

a : delik yarıçapı (m)

d : boşluk derinliği

t' : perfore panelin kalınlığı

D : delikler arası mesafe

V : her bir perfore hücrenin hacmi

2.3.3.2 Sesin saçılması ve saçıcı sistemler

Küçük hacimli prova odalarında ve çalışma alanlarında hacimler 5-50 m³ arası değişmekte ve genelde dikdörtgen plan şemasına sahiptirler. Bu hacimlerde tekrarlayan yankı, odaklanma oluşamaması için eğer yüzeylerde saçıcı ya da yutucu özellikte sistemler kullanılmıyorsa, özellikle dairesel ya da dörtgen plan şemalarından kaçınılmalıdır. Tekrarlayan yankı, özellikle karşılıklı paralel yansıtıcı duvarlardan gelen tekrarlayan yansımaların reverberasyon ile maskelenememesi durumunda oluşan bir akustik kusurdur. Tekrarlayan yankı ve renklenme, ses kaynağı ve dinleyici birbirine çok yakın ise daha fazla duyulabilir hale gelmektedir. Plan şemasının geometrik olarak değiştirilmesinin mümkün olmadığı durumlarda yüzey özellikleri önem kazanmaktadır. Tekrarlayan sinyal tepkisi yutucu ve saçıcı sistemlerin kullanımı ya da paralel olmayan duvar elemanları ile elimine edilmektedir.

Saçıcı yüzeylerin, mekanın içerisindeki sesin homojen dağılması, yankının engellenmesi, odaklanmanın engellenmesi, akustik kamaşmanın engellenmesi gibi pek çok olumlu etkilerinin yanı sıra reverberasyon süresinin azalımı, ses düzeyinin azalımı gibi de olumsuz etkileri vardır (Shtrepi vd. 2016). Eğer tavan yüksekliği odanın en ve boy uzunluğundan daha kısa ise tavanda saçıcı sistem kullanımı önerilmektedir. Saçıcılık tercihi, uygulandığı yüzey, etkin frekans spektrumu gibi özellikleri enstrüman bazında değişmektedir. Olson'un yaptığı çalışmada (Olsson 1967) trompet çalan müzisyenlerin arka duvarında bulunan saçıcı sistemlerin şiddetli negatif renklenmeye neden olması, müzisyenlerin 500-2000 Hz aralığında saçıcı olmayan hacimler tercih etmesine neden olmuştur. Benzer şekilde Fransız kornosu gibi arka kısma da yayım yapan bazı tip enstrümanların arka duvar yüzeylerinde yansıtıcı sistemlerin kullanılması şiddetli renklenmeye ya da yüksek yutucu sistemlerin

kullanılması sesin boğuklaşmasına neden olmaktadır (Kleiner 2014). Vital ve Shtrepi'nin yaptığı çalışmada, saçıcılık algısı, alıcı mesafesine, saçıcılık düzeyine ve ses örneğinin spektral karakterine göre değişmektedir (Shtrepi vd. 2015).

QRD sistemler gibi kuyu tip saçıcılar, ses yutuculuk katsayılarının yüksek olması sebebiyle yansıma süresinde artış istenildiği durumlarda dezavantaj oluşturabilmektedir. Bu gibi durumlarda örneğin saçıcılığı yüksek fakat yutuculuğu düşük amorf yüzeylerin kullanılması tercih edilebilmektedir.

Çoklu silindirik sistemler ise panel tip yutuculuk mekanizması ile oluşturulması ve alçak frekanslarda yutuculuklarının yüksek olması sebebiyle orta ve yüksek frekanslarda yutuculuk istenmeyen hacimlerde etkin sistemlerdir (Shtrepi vd. 2016). Sahne koşullarında özellikle yaylı enstrümanlar ve üflemeli enstrümanlar yan al yansıtıcılarından en çok yararlanan gruplardır. Genel olarak yüzey tasarımları uygun boyutlarda dış bükey ya da düzensiz şekillenmiş geometrilerle dağınık yansıma yapacak şekilde oluşturulmalıdır. Saçıcı tasarımında düzenli tekrarlarla yerleştirilen basit yüzeylerin renklenmeye sebep olduğu görülmektedir (Gade 2015).



3. SES ALANLARININ ÖLÇÜM İLE MEVCUT DURUMLARININ ANALİZİ

Çalışma kapsamında İTÜ Dr. Erol Üçer Müzik İleri Araştırmalar Merkezi'nde (MIAM) seçilen 2 odanın hacim akustiği ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm çalışmasının amacı aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Ölçüm sonuçlarından edilen nesnel verilerin ISO 23591:2021'de belirtilen prova odaları akustik kalite ölçütleriyle karşılaştırılarak odaların enstrüman bazında prova amacına uygunluğunun değerlendirilmesi
- Olası mod kusurlarının araştırılması
- Anket sonuçlarından elde edilen müzisyen izlenimleriyle ilişkilendirilmek üzere odaların nesnel verilerinin elde edilmesi
- Benzetim yönteminde elde edilen modelin geçerliliğinin test edilmesi

Analiz edilecek hacimlerin akustik ölçümleri için TS EN ISO 3382-1:2010 “Odaların akustik parametrelerinin ölçülmesi - Bölüm 1: Gösteri mekânları (ISO 3382-1:2009) (TS EN ISO 3382 2010) ve TS EN ISO 3382-2:2009 “Odaların akustik parametrelerinin ölçülmesi -Bölüm 2: Sıradan odalarda Reverberasyon süresi” (TS EN ISO 3382-2 2009) standartları kullanılmıştır. Aynı zamanda yapı elemanı ses yalıtımı saha ölçüm standardı olan TS EN ISO 16283-1:2014’ te “Binalarda ve yapı elemanında ses yalıtımı saha ölçümü – hava doğuş ses yalıtımı”, 25 m³’ten küçük odalarda alçak frekansların değerlendirilmesi için reverberasyon süresi ölçüm prosedürü tanımlamaktadır. İlgili standartlarla ilgili bilgiler Bölüm 1.4.2’de detaylı bir şekilde verilmiştir. TS EN ISO 3382-1:2010’da terimlerin tanımları, düşme eğrisinden parametrelerin elde edilmesi, kaynak-mikrofon konumları ve mesafeleri, sinyal içeriği ve ölçütler tanımlanmış olup, TS EN ISO 3382-2:2009’da ise ölçüm belirsizliklerine ilişkin tespit ölçütleri tanımlanmıştır. Ölçüm belirsizliklerinin nedeni küçük bir odada ölçülen azalım eğrisinin genellikle doğrusal olmayan eğriler olmasıdır. Azalımın başlangıç kısmı sonraki kısımlarından bir miktar daha yüksek eğime sahiptir. Bu davranışın sebebi, azalımın, farklı azalım oranlarına sahip modların karışımını temsil ediyor olmasıdır. Modların etkin olduğu ya da yutucu sistemlerin eşit dağılmadığı

durumlarda dağınık olmayan ses alanı oluşur ve bu alanda modların azalım oranları farklılaşmaktadır. Doğrusal olmayan azalım eğrisi ölçümleri kullanılarak hesaplanmış reverberasyon süresi, azalım eğrisinin hangi kısmının kullanıldığına bağlı olarak değişkenlik göstereceği anlamına gelir. Dolayısı ile sonuç, azalım eğrisinin doğrusal olduğu durumdan daha az güvenilirdir. Eğrilik parametresi “C”, 20 dB ve 30 dB olmak üzere iki hesaplanma aralığına dayanmaktadır ve tam düz bir çizgiden yüzdesel sapma olarak tanımlanmaktadır. Aşağıdaki bağıntıya uygun olarak hesaplanır. C’nin tipik değerleri %0 ila %5 arasındadır. %10’dan yüksek değerler azalım eğrisinin düz bir çizgi olmadığını gösterir ve azalım eğrisi kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanan Reverberasyon süresi daha az tutarlı sonuçlar verebilir. Aşağıda verilen bağıntıya göre hesaplanan Eğrilik derecesi sonuçları negatif olmamalıdır. Sonuçların negatif olması ölçümlerin güvenilirliğini azaltmaktadır.

$$C = 100x \left[\frac{T_{30}}{T_{20}} - 1 \right] \quad (3.1)$$

C: Eğrilik derecesi (%)

T₃₀: -10 dB’ den -40 dB’ ye kadar geçen süre (s)

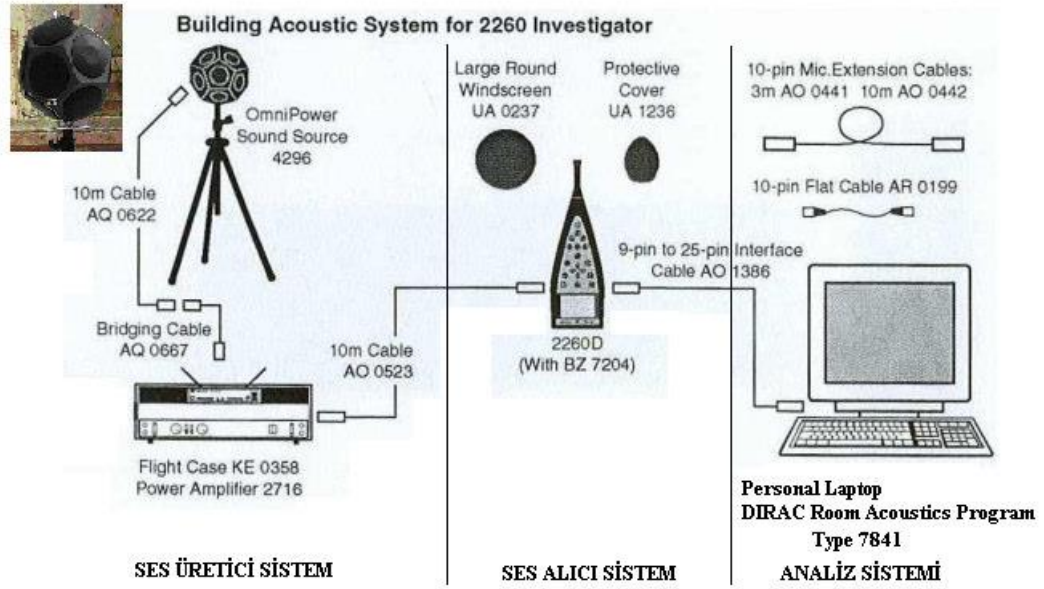
T₂₀: -5 dB’ den -25 dB’ ye kadar geçen süre (s)

Standartlarda belirtilen yönergeler ek olarak küçük hacimlerin alçak frekans ses alanı özelinde oluşan bu belirsizliğin azaltılması amacıyla çalışma öncesinde odaların ölçümüne yönelik sinyal tipinin belirlenmesi, kaynak-mikrofon mesafesinin etkisinin irdelenmesi, düşme eğrisindeki sapmaların çözümleri gibi konularda literatürde ölçüm ile ilgili workshop çalışmalarının raporları ve diğer çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir. İlgili çalışmalar Bölüm 1.4.1.2’de detaylı bir şekilde sunulmuştur.

3.1 Metodoloji ve Kapsam

Ölçüm çalışması öncesinde MIAM Müdürlüğü’ne gerekli bilgilendirme yapılmış, kayıt stüdyosunun takvimine uygun olarak 25 Aralık 2017’de ölçüm çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ölçümler öncesinde rölövesi alınan odaların ölçüm noktaları standarda uygun olarak belirlenmiş, duvarlardan mesafeler ölçülerek ölçüm konumları işaretlenmiştir. Bunlar daha sonra bilgisayar ortamında oda planları üzerine işlenmiştir. Süreç ve koşullar fotoğraflanarak belgelenmiştir. Ölçüm sıralamaları ve özel durumlar not defterine yazılmıştır. Ölçüm sonuçları DIRAC 4.1 yazılımı

(Acoustics Engineering 2007) ile raporlanmıştır. Ölçüm düzeneği, kullanılan ekipmanlar ve bağlantı şemaları Şekil 3.1’deki gibidir.



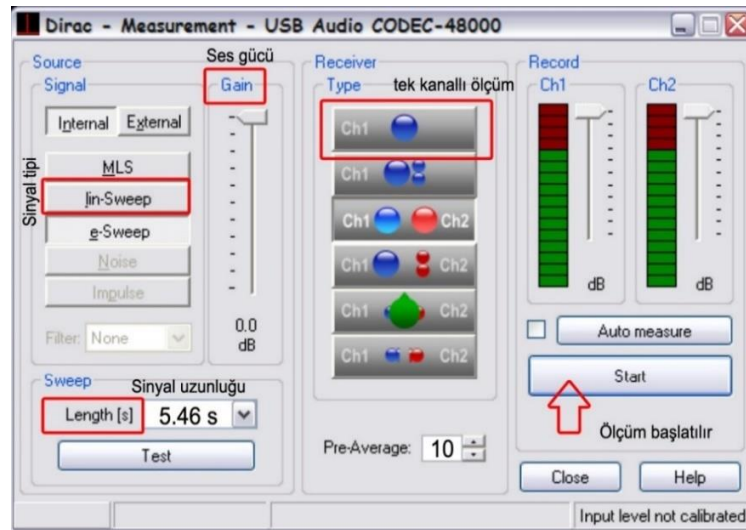
Şekil 3.1 : Ölçüm düzeneğini oluşturan ekipmanlar (T. Bayazıt 2006)

Ölçümde kullanılan ekipmanların detaylı açıklamaları aşağıda verilmiştir.

- **Kaynak:** Çalışmada kullanılan ses kaynağı B&K 4296 tipinde on iki yüzünde hoparlör bulunan çok yönlü (omnidirectional) bir kaynaktır. Kaynağın yaratacağı ses basınç düzeyi arka plan gürültüsünden etkilenmeden, istenen minimum aktif alanda azalma eğrileri sağlayacak verimlilikte olmalıdır. Ölçümler sırasında arka plan gürültüsünden minimum 45 dB daha yüksek ses basıncı üretmek için B&K 2716 tipinde ses gücü yükselticisi (power amplifier) kullanılmıştır
- **Alıcı:** Mikrofonlar mümkün olduğu kadar küçük, tercihen maksimum diyafram çapı 13 mm olmalıdır. Çalışmada, ses alıcı sistem olarak kullanılan ekipmanlar B&K 2260D ses basınç düzeyi ölçer ve mikrofondur. Ses dalgalarını her yönde toplayan (omnidirectional) çok yönlü mikrofona kullanılmıştır. Uygun yüksekliğin sağlanması için mikrofonlar tripod ayaklar üzerine sabitlenmiştir.
- **Analiz Sistemi:** B&K 2260 D ses alıcı sistemi ile ölçülen veriler, bir diz üstü bilgisayarına yüklenen B&K 7841 tipi “DIRAC Hacim Akustiği” yazılımı yardımı ile TS EN ISO 3382-1:2010’a uygun olarak analiz edilmiş ve ölçümlerden hesaplama yöntemine uygun olarak nesnel akustik parametreler

elde edilmiştir. Analizler 50-10000 Hz aralığında 1/3 ve 1/1 oktav bant frekanslar için yapılmıştır.

Düzenegin çalışma prensibine göre çok yönlü hoparlör cihazı sinyal-gürültü oranını artırmak için ses yükseltici sisteme bağlanmıştır. Ses yükseltici sistem ise ses kartı ve yazılımın bulunduğu bilgisayarın hoparlör çıkışına bağlanmıştır. Çok yönlü mikrofon benzer şekilde bilgisayarın mikrofon çıkışına bağlanmıştır. Lisanslı program DIRAC yazılımının aktif olması için kullanılması gereken program kilidi bilgisayarın USB girişlerinden birine takılmıştır. Yazılım arayüzünde sinyal tipi, kaç kanaldan kayıt yapılacağı, oluşturulacak ses gücü düzeyi gibi bilgilerin ayarları yapılmaktadır (Şekil 3.2). Bilgisayarın mikrofon ve hoparlör çıkışlarını birbirine bağlayan kısa devre kablosu takılarak ölçüm yapılmış ve sinyalin temiz bir sinüs eğrisi olup olmadığı kontrol edilmiştir. Mikrofon ve ses kartı kalibrasyonu sonrasında yapılan ölçüm ayarları Şekil 3.2'deki gibidir. Ses gücü en yüksek ayara getirilmiş, sinyal uzunluğu 5,46 saniye alınmıştır ve ölçüm tekrarı (pre-average) 10 kez olacak şekilde ayarlanmıştır. Ölçümler, arka plan gürültüsüne ve zaman varyansına daha az duyarlı olması sebebiyle, linear sinüs süpürme sinyali kullanılarak yapılmıştır (Bjor ve Nikolic 2004). Presizyonu artırmak amaçlı her ölçüm 2 kere yapılmıştır. Sinyal uzunluğu, ses gücü ve ölçüm tekrarı ne kadar fazla ise sinyal-gürültü oranı o kadar yüksek çıkmaktadır.



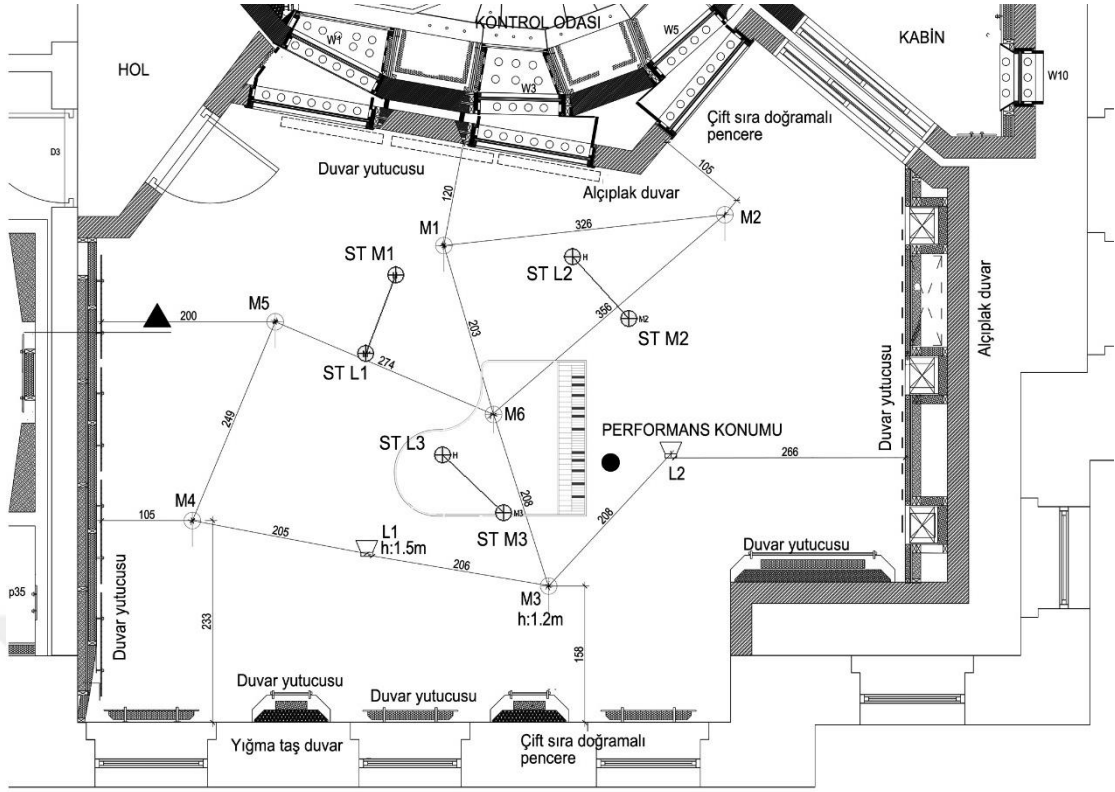
Şekil 3.2 : DIRAC yazılımı ölçüm arayüzü

Ölçümler önce stüdyo odasında sonra prova odasında yapılmıştır. Her ölçüm öncesinde mikrofon ve ses kartı kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sırasında sadece 1 kişi hacim içerisinde bulunmuştur. Ses kaynakları TS EN ISO 3382-1:2010

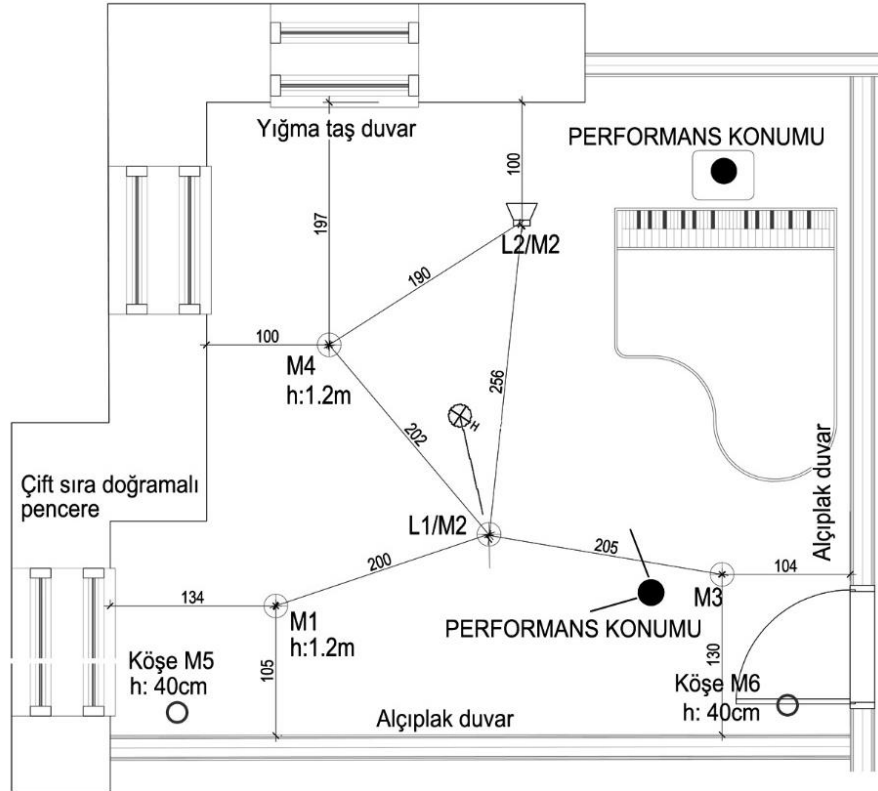
standardına uygun olarak yerden 1,5 m yükseklikte yerleştirilmiş ve mikrofonlar dinleyicinin kulak hizasında olması için yerden 1,2 m yükseklikte tutulmuş, aralarındaki uzaklıkların en az 2 m olması ve mikrofon pozisyonlarının en yakın yansıtıcı yüzeye ve yere en az mesafesinin 1 m olmasına dikkat edilmiştir. Standarda göre destek parametresi için ölçüm noktaları kaynağın akustik merkezi ile mikrofon mesafesi 1.5m ve aynı yükseklikte olacak şekilde tanımlanmıştır. Bu parametre için kullanılan kaynak ve mikrofon konumları ayrıca plan şemalarında gösterilmiştir. Alıcı ve kaynak konumlarının belirlenmesinde yönergelere uygun olarak katılımcıların anket sırasında icra ettiği ve oda içerisinde genel olarak kullanabilecekleri konumlar baz alınmıştır. Değerlendirmelerde, ölçülen sonuçların her kaynak pozisyonu için aritmetik ortalamaları alınmıştır. Hacimlerde reverberasyon süreleri mühendislik metodu ile uyumlu olarak iki hoparlör konumunda ve altı mikrofon pozisyonunda ölçülmüştür. Oda boyutlarına bağlı olarak alıcı ve kaynak nokta sayısı değişmiştir. Buna göre stüdyo odasında 2 kaynak ve 6'şar alıcı noktası kullanılmış, prova odasında ise 2 kaynak 4 alıcı noktası ve karşılaştırma amaçlı 2 köşe alıcı noktası kullanılmıştır. Destek parametresi için stüdyo odasında 3 kaynak noktası kullanılmış, prova odasında ise uygun mesafelerin sağlanabildiği tek kaynak noktası kullanılmıştır. Alıcı (M1, M2, M3, M4, M5, M6) ve kaynak noktalarının (L1, L2) yerleşimi stüdyo odasında Şekil 3.4'teki gibidir. Stüdyo odasının alanı 57 m², hacmi 296 m³'tür. Prova odasının ise alanı 29 m², hacmi 103 m³'tür. Alıcı (M1, M2, M3, M4) ve kaynak noktalarının (L1, L2) yerleşimi prova odasında Şekil 3.5'teki gibidir. Her iki hacim de 25 m³'ten büyük olduğu için sadece prova odasında keşif amaçlı köşe ölçümleri yapılmıştır. Şekil 3.3'te ölçüm sırasında kaydedilen fotoğraflar verilmiştir.



Şekil 3.3 : Ölçüm sırasında çekilen fotoğraflar a) stüdyo odası
b) prova odası



Şekil 3.4 : Stüdyo odası planı ve ölçüm sırasında alıcı ve kaynak noktalarının yerleşimi



Şekil 3.5 : Prova odası planı ve ölçüm sırasında alıcı ve kaynak noktalarının yerleşimi

3.2 Ölçüm Sonuçlarının Nesnel Parametreler ile Değerlendirilmesi

Nesnel değerlendirme parametreleri EDT, T_{30} , $C_{50}-C_{80}$, T_s ve ST_{erken} , ölçümden elde edilen uyarı yanıtının TS EN ISO 3382-1:2010'da belirtilen yöntemle uygun olarak DIRAC yazılımı vasıtasıyla hesaplanarak elde edilmiştir. Sonuçlar alıcı bazında 1/1 ve 1/3 oktav bantta EK-A bölümünde verilmiştir. Ölçüm sonuçları iki kaynak noktasının ve altı alıcı noktasının her bir oktav bantta değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmış ve standart sapmaları ile gösterilmiştir. Standart sapma, özellikle alçak frekanslarda oluşan modlar nedeniyle ölçüm noktalarında farklı azalım eğrileri oluşmasına bağlı olarak artmıştır. Çizelge 3.1'de iki odaya ait sinyal-gürültü oranı değerleri 1/1 oktav bantta 63 Hz- 8000 Hz aralığında verilmiştir. T_{60} değerleri 63 Hz'de $SNR \geq 45$ dB koşulu sağlanamadığı için kullanılamamıştır, fakat $SNR \geq 35$ dB koşulu yaklaşık olarak sağlanmış olup koşullar T_{30} parametresi üzerinden değerlendirilmiştir. Her alıcı noktasında eğrilik faktörü kontrol edilmiş, C'nin çoğu alıcıda 0'ın üzerinde olduğu görülmüştür. Stüdyo odasının 300 m³'e yakın bir hacme ve düzgün olmayan bir geometriye sahip olması ve yutucu sistemlerin yüzey bazında eşit bir şekilde dağılmış olması nedeniyle ölçümlerde belirsizliğin azaldığı anlaşılmaktadır. Prova odasında ise yutucu malzemenin sadece tavanda uygulanmış olması ve yanal yüzeylerin tamamının yansıtıcı olması ölçüm belirsizliğini azaltmıştır.

Çizelge 3.1 : Odaların 1/1 Oktav bantta SNR değerleri

Odalar	Frekans (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SNR Stüdyo Odası	35	39	38	39	43	46	42	35
SNR Prova Odası	33	36	38	36	39	42	41	41

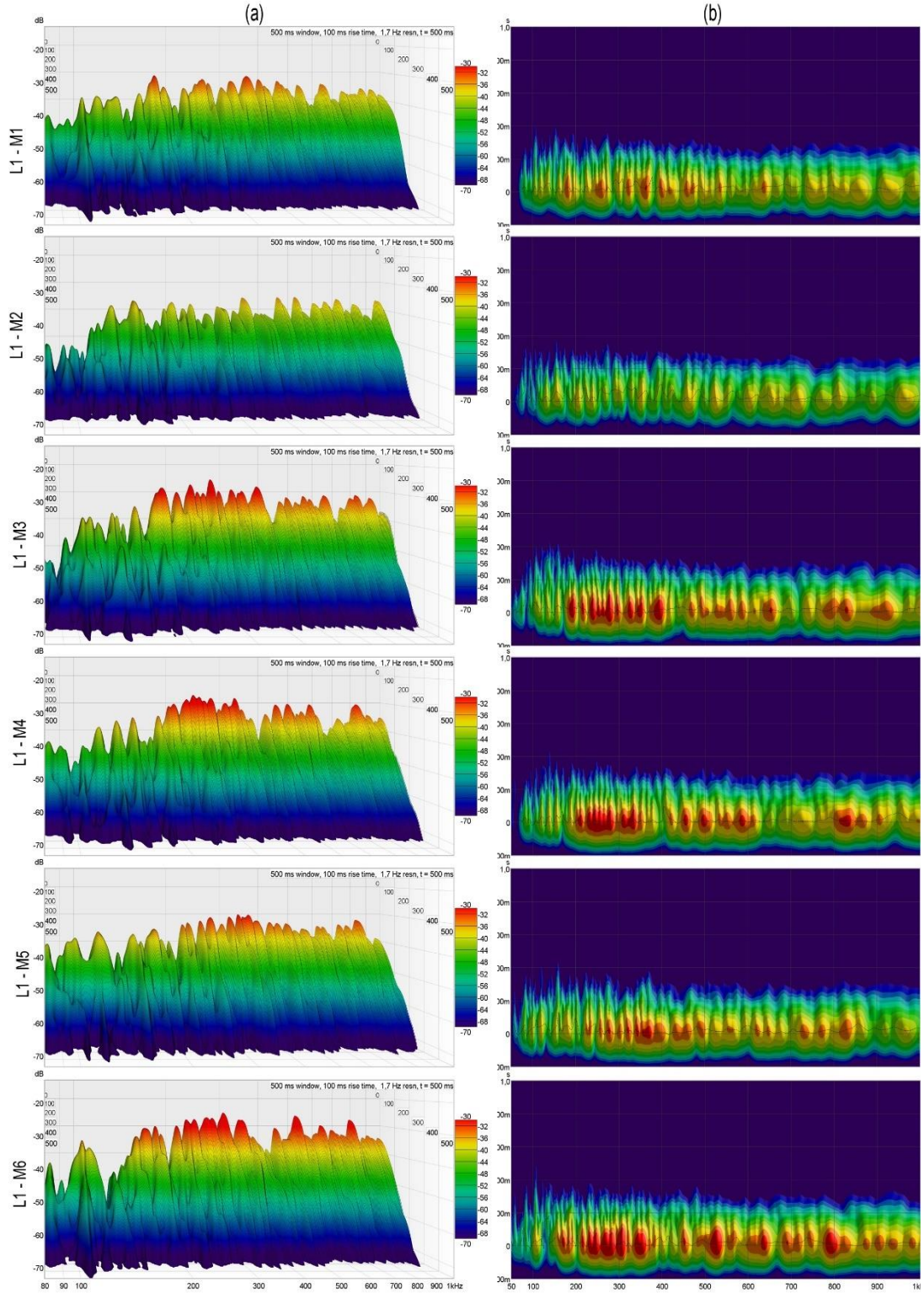
3.2.1 Birikimli izgesel düşüş (Cumulative Spectral Decay, CSD)

Birikimli izgesel düşüş (Cumulative Spectral Decay, CSD) odanın ya da bir sistemin hakkında faydalı bilgiler sunar (Bunton ve Small 1982). Temelde bir frekans tepkisi tablosudur, ancak eklenen zaman ögesi frekans cevabının nasıl geliştiğini gösterir. Dolayısıyla uyarı sinyali kapatıldığında, bazı frekanslardaki ses basınç düzeyi yavaş yavaş azalır ve grafikte zaman doğrultusunda ses basıncı yüksek kalan frekanslar görülür. Bu, oda rezonanslarının bir göstergesidir. X ekseninde basınç değişimi (dB), y ekseninde frekans değişimi (Hz), z ekseninde ise zaman değişimi (ms) verilmiştir. 3 eksenli bir gösterim olduğundan şelale modeli ile gösterilir.

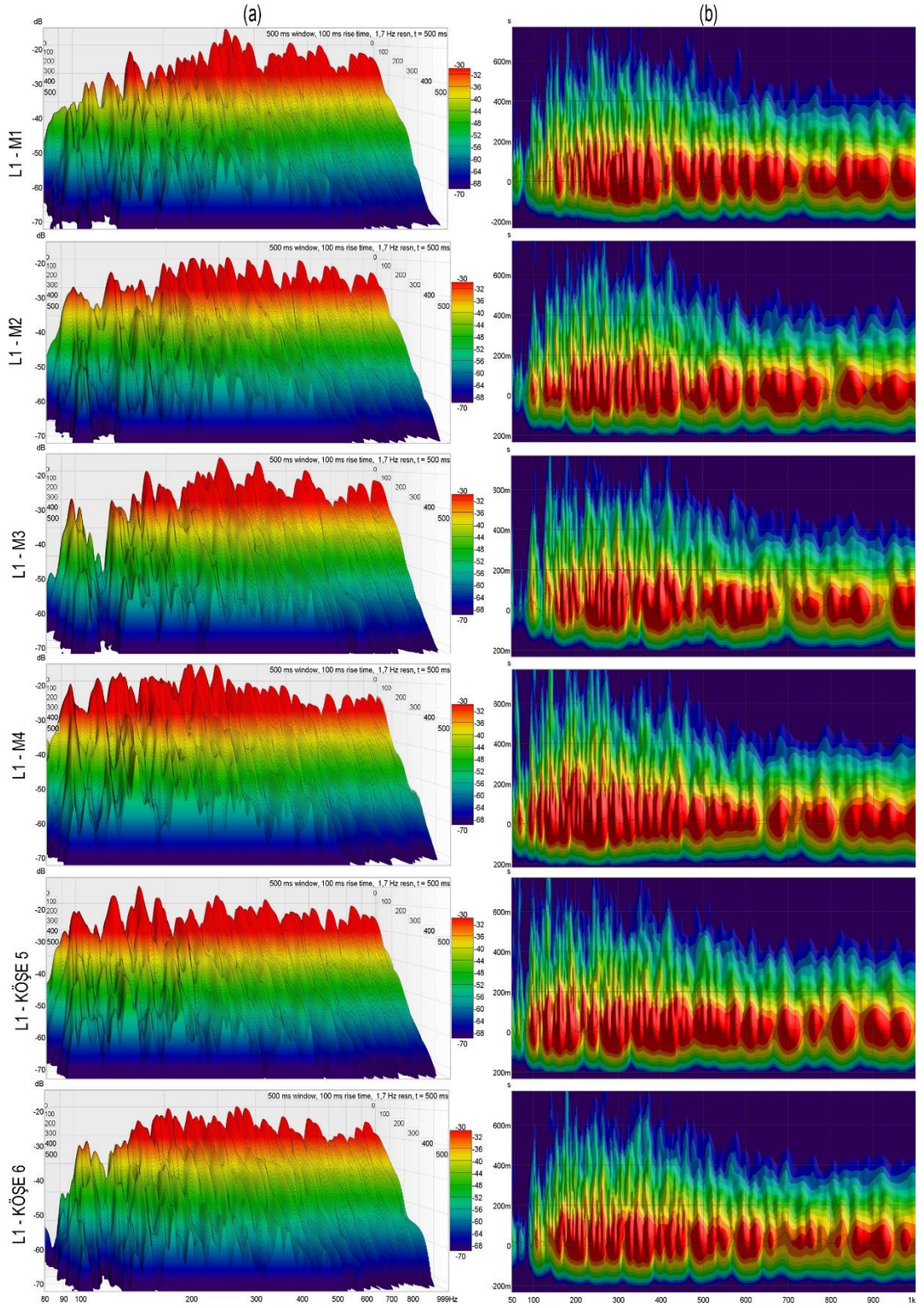
Birikimli izgesel düşüş (CSD) özünde zaman tanım alanında frekans cevabının bir temsilidir ve o frekanstaki azalımın seyrine göre rezonant frekanslar belirlenebilmektedir. Aynı zamanda iyileştirme önerilerinde bu frekanslar hedef alınarak akustik düzenlemeler önerilebilmektedir. Şekil 3.6-a'da L1 kaynak konumu durumunda 6 alıcı noktasının (M1-M6) ölçüm sonuçları CSD gösterimi frekans tanım alanında 80 Hz-1000 Hz aralığı, zaman tanım alanında ise 0-500 ms aralığı kullanılarak sunulmuştur. Şekil 3.6-b'de ise 2 boyutlu frekans cevabının zaman boyutunda ses basıncı değişimi verilmiştir. Her iki grafik tipi de benzer bilgileri göstermektedir. Fakat spektrometre gösteriminde frekans tepkisinde oluşan tepelerin sıklığı daha belirgindir. Referans değeri alınmadığı için bir alıcı noktasındaki frekans cevabı kendi içeriğinde ve diğer alıcı noktaları ile karşılaştırılmıştır. Stüdyo odasına ait şelale gösterimine bakıldığında bütün alıcı noktalarında kırmızı renk ile gösterilen frekanslarda enerjinin daha yüksek olduğu ve buna bağlı olarak azalımın daha uzun sürdüğü görülmektedir. Tepe ve vadilere bakıldığında ise yaklaşık olarak 80 Hz - 200 Hz aralığında tepe noktalarının ayrıştığı sonrasında ise modların yoğunlaşmasına bağlı olarak frekans tepkisinin daha homojen bir yapıda olduğu görülmektedir. Alıcı noktaları arasındaki frekans cevabı karşılaştırıldığında ise M1, M2, M5 noktalarının konuma bağlı olarak daha az yansıma aldığı, diğer bir yandan M6 (merkeze yakın konum) alıcı noktasında her yönde gelen yansımalarla enerji düzeyinin arttığı görülmektedir. Dolayısıyla hacim sönümlenmesi yüksek olsa da konumlar arası farklı ses düzeylerinin oluştuğu görülmektedir. Azalım sürelerine bakıldığında ise genel olarak 80 Hz ve 1000 Hz arası bütün frekanslarda 400 ms'de 60 dB azalıma ulaşıldığı görülmektedir. Bu da alçak ve yüksek frekansların dengeli bir şekilde dağıldığını göstermektedir.

Şekil 3.7'de prova odasına ait L1 hoparlör konumunda iken 6 alıcı noktasının ölçüm sonuçlarının şelale modeli (a) ve spektrogram gösterimi (b) verilmiştir. Buna göre özellikle alçak frekanslarda azalımın yavaş olduğu görülmektedir. Geçiş frekansı irdelendiğinde, frekans cevabında, 350 Hz'ye kadar tepe ve vadilerin olduğu, sonrasında ise tepelerin yumuşadığı görülmektedir. Azalım sürelerinin orta ve yüksek frekanslarda -60 dB'nin düşüşün 400 ms'de gerçekleştiği, alçak frekanslarda ise bu sürenin 800 ms'ye çıktığı görülmektedir. Modların etkisiyle eğrinin farklı kırıklardan oluştuğu görülmektedir. Eğri doğrusallığının değişimi irdelendiğinde yine 350 Hz'ye

kadar olan düşüşlerde çok farklı eğrilikler oluşurken, 350 Hz sonrasında ses alanının dağınıklığına bağlı olarak düşüş eğrilerinin doğrusallaştığı görülmektedir.



Şekil 3.6 : Stüdyo odası ölçümünde hoparlör L1 konumunda iken 6 alıcı noktasında zamana bağlı ve frekansa bağlı ses basınç düzeyi değişimi a) şelale modeli b) spektrogram gösterimi

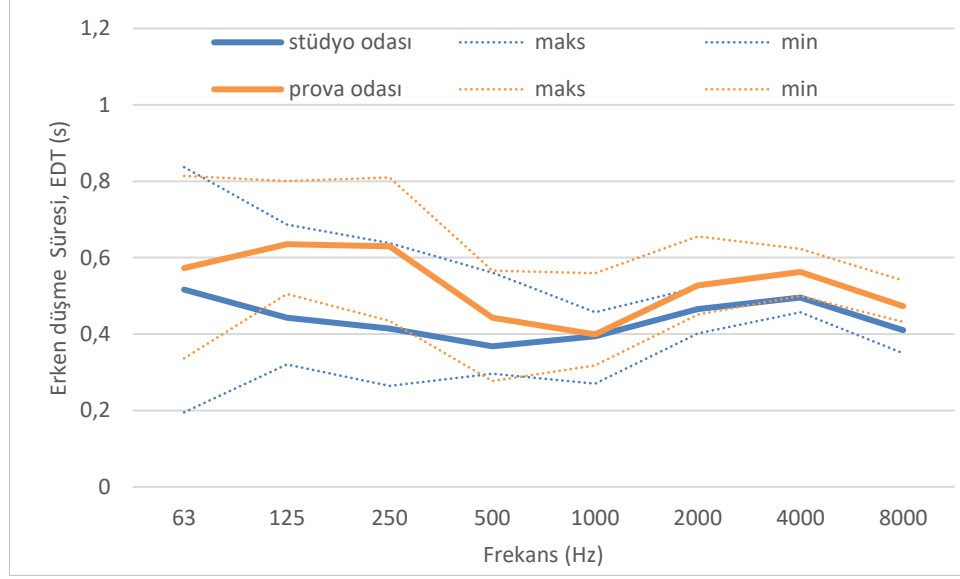


Şekil 3.7 : Prova odası ölçümünde hoparlör L1 konumunda iken 4 orta alıcı 2 köşe alıcı noktasında zamana bağlı ve frekansa bağlı ses basınç düzeyi değişimi a) şelale modeli b) spektrogram gösterimi

3.2.2 Erken düşme süresi (Early Decay Time, EDT) ölçüm sonuçları

Erken düşme süresi, direkt sestten sonra ilk 10 dB azalım için geçen süredir (0 dB ve 10 dB aralığı). Özellikle küçük hacimlerde, öznel açıdan algılanan reverberasyon ile ilişkilendirilmektedir (Bradley 2010). Şekil 3.8’de stüdyo ve prova odalarına ait EDT değerleri 2 kaynak konumu, sırasıyla 12 ve 8 alıcı konumuna ait ortalama, maksimum ve minimum değerleriyle beraber verilmiştir. İki hacim karşılaştırıldığında orta ve yüksek frekanslarda benzer değerlerin çıktığı görülmüştür. Benzer şekilde her iki hacimde de alçak frekanslarda sapmalar modlara bağlı olarak artmıştır. EDT’deki sapmalarla Şekil 3.9’da verilen T_{30} değerlerindeki sapmalar karşılaştırıldığında modların erken yansılarda belirgin olduğu ve düşme eğrisinin ilk kısmının modlardan daha çok etkilendiği görülmüştür. Mod etkinliği nedeniyle konuma bağlı standart sapmaların nedeni benzetim çalışması bölümünde detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. EDT, yüzey özelliklerinin ses alanına etkisinin değerlendirilmesi açısından daha tutarlı sonuçlar vermektedir. Her iki hacimde de yutucu sistemlerin orta ve yüksek frekanslarda daha etkin olması nedeniyle özellikle 1000 Hz ve daha yüksek oktav bantlarda erken düşme süresi ve reverberasyon sürelerinde bir azalım olmuştur. Aynı zamanda prova odasında alçak frekanslardaki mod etkinliği nedeniyle bu frekanslarda EDT değerleri, geç sönümlenme nedeniyle yüksek çıkmıştır.

EDT değerlerinin yanı sıra EDT- T_{30} ilişkilendirmesi de bize ses alanı ile ilgili bilgiler vermektedir. Öncelikle, ideal durumda EDT- T_{30} değerleri birbirine maksimum %5 sapma oranı ile yakın çıkması beklenmektedir (Bradley 2010). Fakat, küçük hacimlerin boyutuna bağlı olarak alıcı-kaynak konumunun yakın olması sebebiyle EDT değerleri düşük çıkmaktadır. Prova odasında, duvarların yakın ve yansıtıcı olması enerji yoğunluğunu artırdığından, bu frekanslarda enerjinin geç düştüğünü ve EDT yüksekliğini açıklamaktadır. Stüdyo odasında ise EDT ve T_{30} değerleri karşılaştırıldığında, duvarlardan gelen yansımaların ses yutucu sistemlerle sönümlenmiş olması nedeniyle EDT, T_{30} ’dan düşük çıkmıştır. Bu da erken yansımaların etkinliğinin azaldığını göstermektedir. Güncel çalışmalarda yapılan JND EDT değerleri, alçak frekansları da kapsayan geniş bant aralığı için %26 olarak verilmektedir (Dorrego ve Vigeant 2022). Dolayısıyla iki hacim arasında ilk yansımalarındaki farkın alçak frekanslarda fark eşiğinin üzerinde olduğu görülmüştür. Fakat bu farkın orta ve üst oktav bantlarda azaldığı görülmektedir.

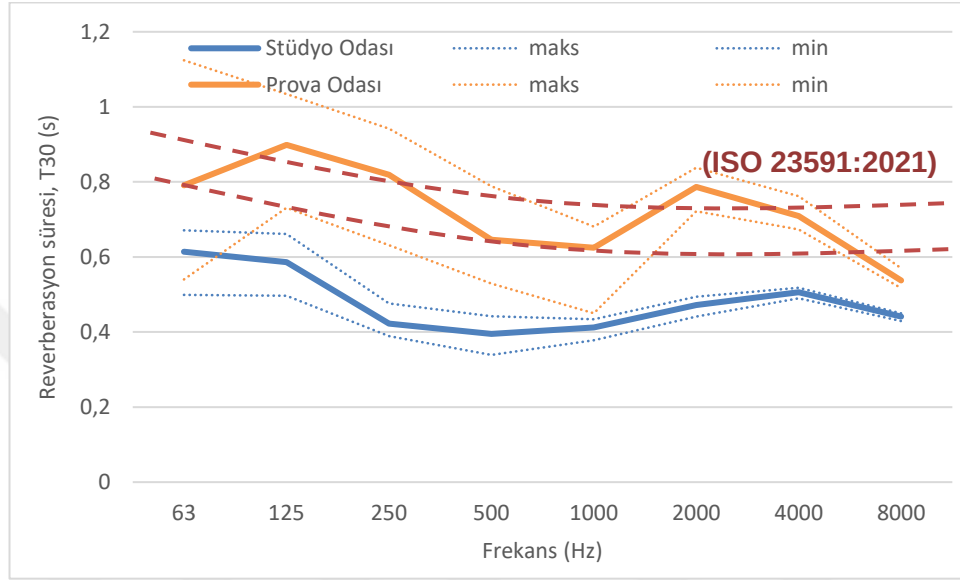


Şekil 3.8 : Stüdyo odası ve prova odası EDT ölçümü karşılaştırması

3.2.3 Reverberasyon süresi (Reverberation Time, T_{30}) ölçüm sonuçları

Direkt sestten sonra 60 dB' lik ses basıncının düşmesine kadar geçen süredir. Pratikte daha küçük (30 dB' lik) aralık ile sınırlandırılmıştır. Bununla beraber -5 dB' den -35 dB' ye kadar geçen süre yine 60 dB düşüş eğrisine bağlı olarak alınır (TS EN ISO 3382 2010). Reverberasyon süresi (T_{30}), erken yansımalarla beraber geç yansımaların etkisiyle değişmektedir ve öznel değerlendirmelerden daha çok iyileştirme çalışmaları gibi fiziksel ortamın karşılaştırması açısından önem taşımaktadır (Bradley 2010). En temel gösterge olması sebebiyle, ISO 23591:2021'de, optimum koşulları sağlayan değer aralıkları net hacim ve müzik tipine bağlı T_{orta} (500 Hz ve 1000 Hz'nin ortalaması alınarak) parametresi üzerinden tanımlanmıştır. Aynı zamanda hacimlerde frekansa bağlı tolerans limit aralıkları analiz edilen bandın orta frekanstaki reverberasyon süresine oranı olarak ($T_{30,f}/T_{orta}$) tanımlanmıştır. Şekil 3.9'da stüdyo ve prova odalarına ait T_{30} değerleri 2 kaynak konumu, sırasıyla 12 ve 8 alıcı konumuna ait ortalama, maksimum ve minimum değerleriyle beraber verilmiştir. Standart 23591:2021'de önerilen T_{30} değer aralıkları 300 m³ hacme sahip olan stüdyo odasında alçak sesli enstrüman grubu için 0,9-1,2 s ve yüksek sesli enstrüman grupları için 0,7-1 s'dir. 150 m³ hacme sahip olan prova odasında alçak sesli enstrümanlar için 0,75-1s arası T_{30} önerilirken, yüksek sesli enstrüman grubu için 0,55-0,8 s aralığı önerilmektedir. Buna göre, ortalama olarak 0,4 s olan T_{30} değerleri stüdyo odasında her iki enstrüman grubu için istenen ölçütlerden düşük çıkmıştır. Diğer bir yandan prova odasında 0,65 s olan T_{30} değerlerinin istenen ölçütleri yüksek sesli enstrümanlar

için sağladığı, alçak sesli enstrüman grubu için ise ölçütlere yakın çıktığı görülmüştür. Aynı zamanda standartta orta frekansa göre her oktav bant için en yüksek ve en düşük reverberasyon süreleri (T_{30}/T_{mid}) tolerans değerleri tanımlanmıştır. Buna göre stüdyo odasında 63Hz ve 125Hz’de sapma oranı tolerans değerlerinden yüksektir ($p_{63Hz}=\%155>\%140$, $p_{125Hz}=\%147>\%120$, $p_{250Hz}=\%108<\%110$). Bununla birlikte prova odasında sapma oranları tolerans değerlerinin içinde kalmıştır.



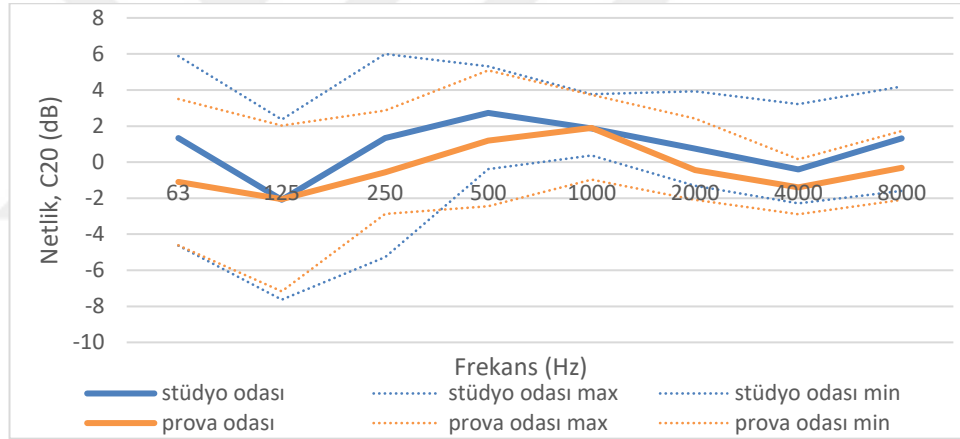
Şekil 3.9 : Stüdyo odası ve prova odası T₃₀ ölçümü karşılaştırması

3.2.4 Netlik indeksi (Clarity index, C₂₀-C₅₀ -C₈₀) ve merkez zaman (Center time, Ts) ölçüm sonuçları

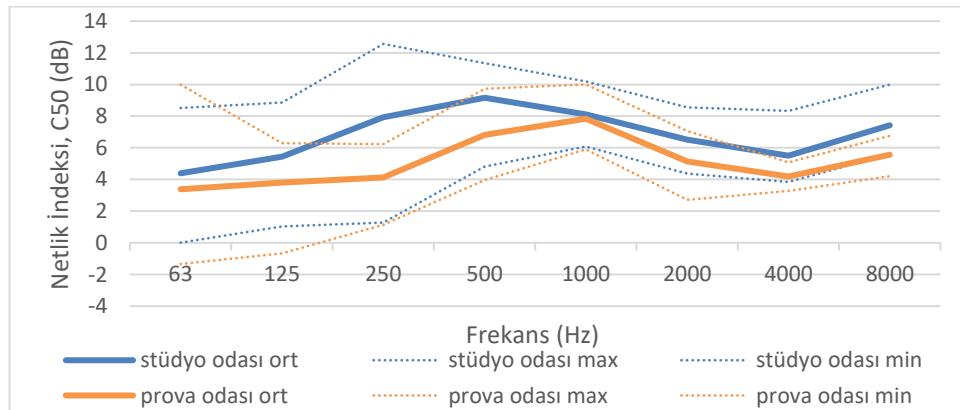
Erken enerji oranının analizi olan netlik parametresi alıcı noktasındaki 0 – 80 ms arası gelen enerji ile 80 ms- ∞ arası gelen enerji oranıdır. Güncel çalışmalarda, konuşma için laboratuvar koşullarında yapılan dinleme testleriyle C₈₀JND değeri 1.1 dB olarak belirlenmekte, fakat gerçek koşullarda bu değer 3 dB civarlarında olduğu varsayılmaktadır (Bradley vd. 1999). Bununla birlikte yapılan benzer çalışmalarda test metoduna, motifine ve içeriğine bağlı olarak değerlerin değiştiği görülmektedir. Dolayısıyla herhangi bir iyileştirme ya da karşılaştırma çalışmasında, 3 dB’nin altında elde edilen sonuçların algılanabilir bir fark yaratmadığı vurgulanmıştır (Vigeant vd. 2015). Netlik (C₈₀) değerinin küçük pozitif sayı olarak çıkması odanın kuru olduğunu, negatif çıkması reverberant bir hacim olduğunu gösterir. Geç enerjinin yoğunluğunda ya da oluşan modların etkisiyle netlik azalır. Reverberasyon süresi ile kuvvetli zıt ilişkisi vardır ve iyi bir akustik tasarım için aralarında bir optimum denge noktası oluşturulmalıdır.

$$C_{80} = 10 \log \left[\frac{\int_0^{80ms} h^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} h^2(t) dt} \right] \quad (3.2)$$

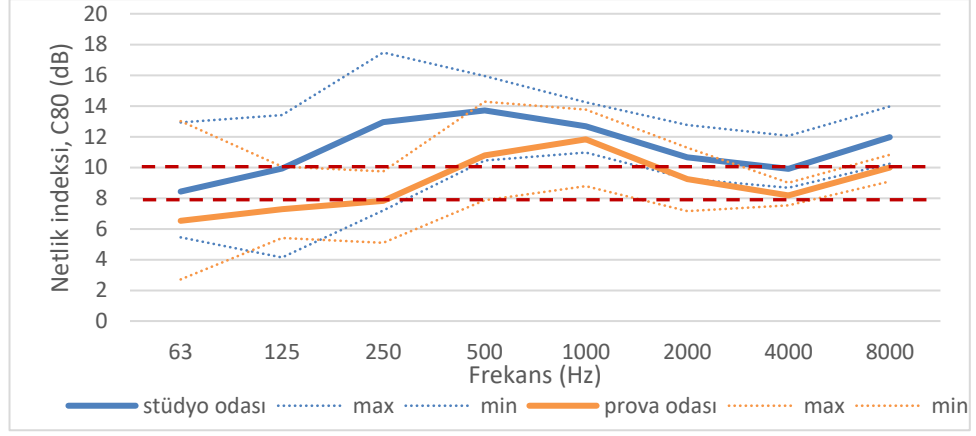
Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de stüdyo ve prova odalarına ait C_{20} , C_{50} ve C_{80} parametrelerinin ortalama ve maksimum-minimum değerleri verilmiştir. ISO 23591:2021 standardında optimum bir değer belirtilmemekle beraber literatürdeki diğer kaynaklarda prova sınıflarında yapılan ölçümlerde ideal durumlarda değerlerin 8-10 dB aralığında değiştiği görülmektedir (Cabrera 2007). Buna göre netlik indeksi (C_{80}) prova odasında netliğin 500- 1000 Hz aralığı dışında ideal koşulları sağladığı, diğer bir yandan, stüdyo odasında ortalama 10-14 dB olan C_{80} indeksinin ideal düzeyin çok üzerinde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte C_{20} ve C_{80} değerleri karşılaştırıldığında ilk yansımalarla geç yansımaların oldukça farklı olduğu görülmektedir. İki hacimde ölçülen C_{20} değerlerin ortalamasına bakıldığında fark eşliğinin (3 dB) altında olduğu görülmektedir. İki hacim arasındaki farkın C_{50} ve C_{80} ’de arttığı görülmektedir.



Şekil 3.10 : Stüdyo odası ve prova odası netlik indeksi (C_{20}) değerleri



Şekil 3.11 : Stüdyo odası ve prova odası netlik indeksi (C_{50}) değerleri



Şekil 3.12 : Stüdyo odası ve prova odası netlik indeksi (C₈₀) değerleri

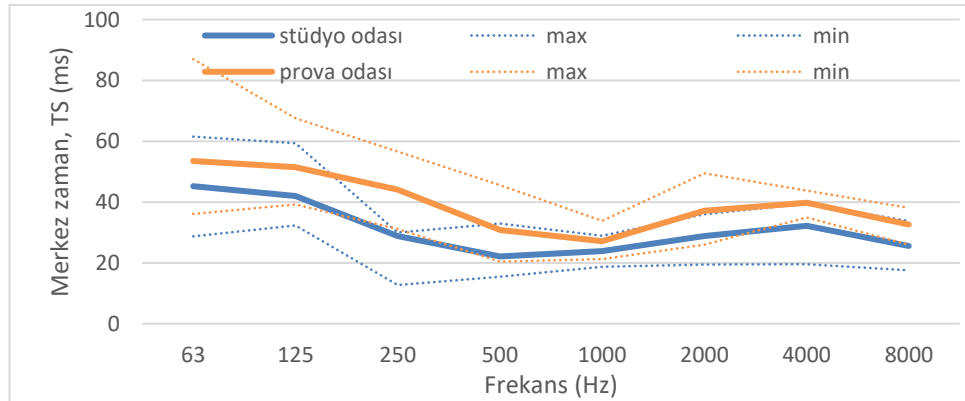
Merkez zaman parametresi, hacim içerisinde belirli bir noktada elde edilen seslerin erken ya da gecikmiş olup olmadığını belirlediğinden, açıklık, netlik (C₈₀) ve Erken Düşme Süresi (EDT) ile ilişkilidir. Aşağıdaki bağıntıya göre hesaplanır.

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} t^1 p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (3.3)$$

p: ses basıncı

t: denge noktası için geçen süre (ms)

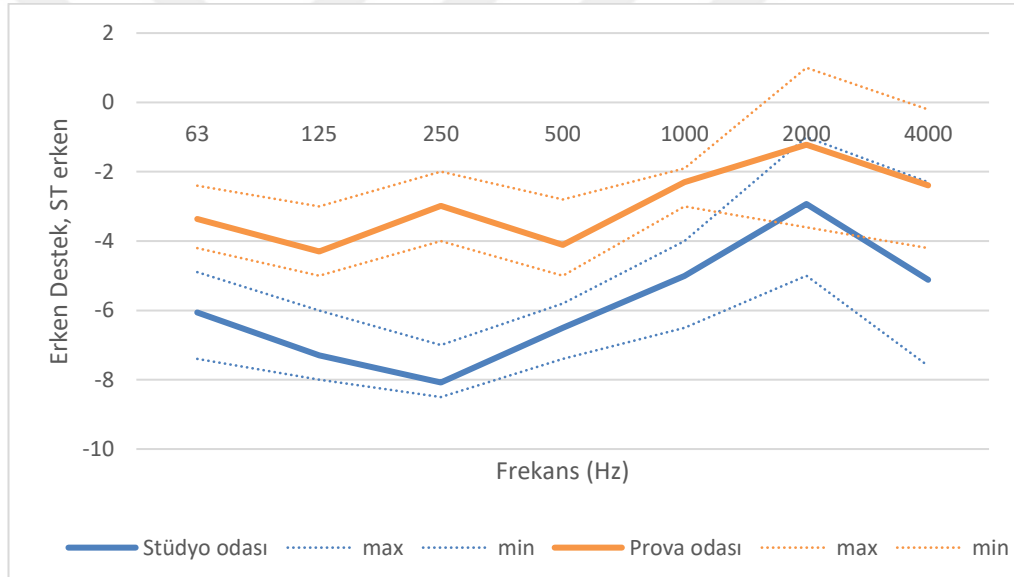
Şekil 3.13'te stüdyo ve prova odalarına ait TS değerleri 2 kaynak konumu, sırasıyla 12 ve 8 alıcı konumuna ait ortalama, maksimum ve minimum değerleriyle beraber verilmiştir. Prova odasında geç yansıma yoğunluğunun daha fazla olduğu, ağırlık merkezinin daha geç bir sürede oluştuğu görülmektedir. Prova odasında alçak frekanslardaki standart sapmasının stüdyo odasına göre çok daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 3.13 : Stüdyo odası ve prova odası merkez zaman (TS) değerleri

3.2.5 Destek_{erken} (Early Support, ST_{early}) ölçüm sonuçları

Sahne değerlendirmelerinde en çok kullanılan parametre olarak ölçüm prosedürü açısından diğer parametrelerden farklıdır. Diğer düşme süresi parametrelerine ilişkin ölçümlerde ise standartta kaynak ve alıcı noktası mesafesi minimum 1.5 m olarak belirlenmektedir. Destek parametresi ölçümü için kullanılan alıcı – kaynak konumları stüdyo odası ve prova odası için sırasıyla Şekil 3.4 ve 3.5’te verilmiştir. Müzisyenlerin icra sırasında hacim tarafından yansımaların etkisiyle ne kadar desteklendiğini (self-support) ölçmek üzere ST_{erken} parametresi analiz edilmiştir. Şekil 3.14’te stüdyo ve prova odalarına ait ST_{erken} değerleri 3 kaynak ve alıcı konumu için prova odasında ise tek kaynak ve alıcı konumu için ortalama, maksimum ve minimum değerleriyle beraber verilmiştir. Stüdyo odasındaki değerlerin prova odasına göre çok daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 3.14 : Stüdyo odası ve prova odası destek (ST_{erken}) ölçümü karşılaştırması

3.2.6 Bas oranı (Bass Ratio, BR) ölçüm sonuçları

Alçak frekanslardaki (125 Hz + 250 Hz) reverberasyon süresi ortalamasının, orta frekanslardaki (500 Hz + 1000 Hz) reverberasyon süresine oranıdır. Malzemelerin frekans bazında yansıtıcılık ve yutuculuk değerlerine göre şekillenmektedir. Her enstrümanın kendi tınısı olduğu gibi hacim, malzemelerin çeşidi ve etkin frekanslara göre her hacmin de kendisine göre bir tınısı olmaktadır. Odanın tınısı, sesin yüksek, orta ve alçak frekans değerlerinin oranından etkilenmektedir. Ses tonu ile sertlik, aydınlık, sıcaklık, boşluk gibi değerlendirmeler ile ilişkilendirilmektedir. BR, alçak

frekanslardaki reverberasyon süresinin orta frekanslara oranıdır. TR, yüksek frekanslardaki reverberasyon süresinin orta frekanslara oranıdır. Aşağıdaki bas oranı ve tiz oranı sırasıyla aşağıdaki bağıntılara uygun olarak hesaplanır.

$$BR = \frac{T_{125Hz} + T_{250Hz}}{T_{500Hz} + T_{1000Hz}} \quad (3.4)$$

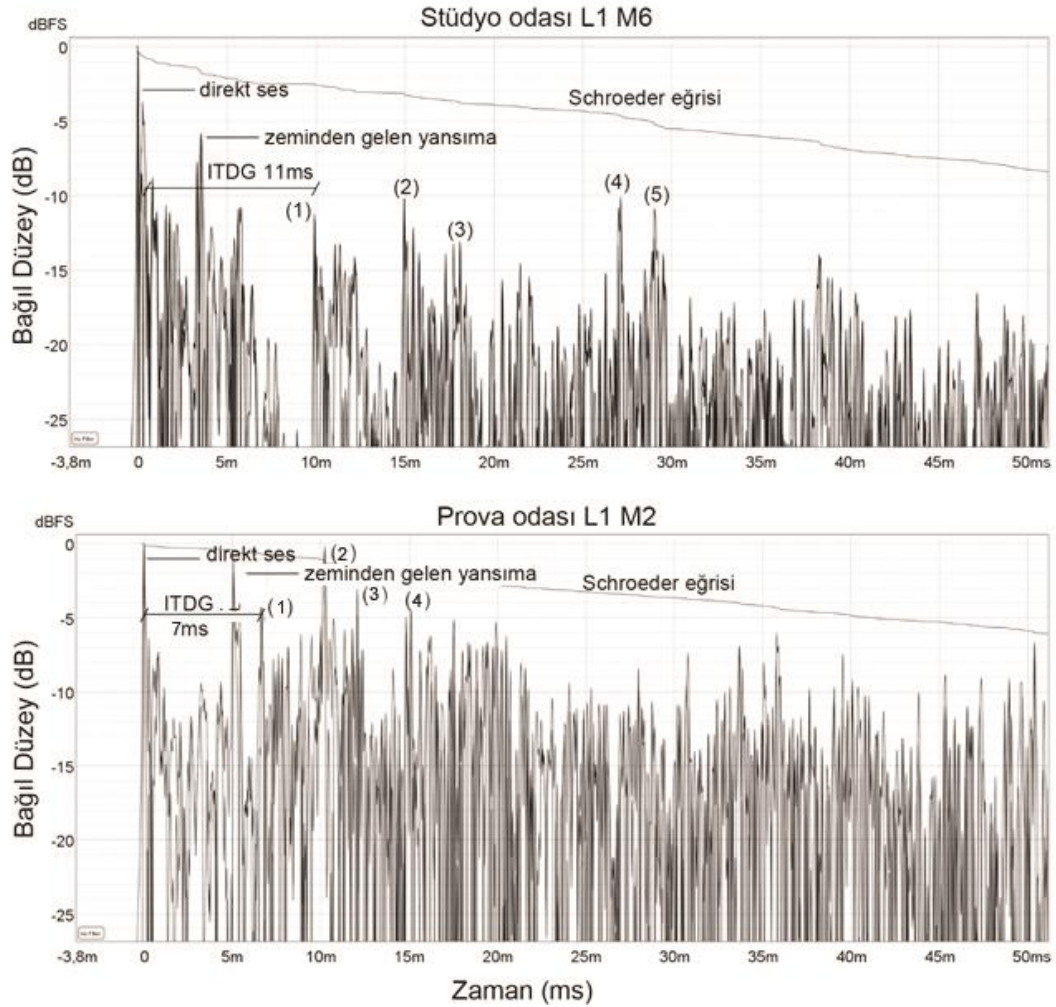
$$TR = \frac{T_{2000Hz} + T_{4000Hz}}{T_{500Hz} + T_{1000Hz}} \quad (3.5)$$

Reverberasyona dayalı bas oranı, ankette baslılık, doğallık izlenimi, rezonans algısı gibi öznel atıflar ile ilişkilendirmek üzere değerlendirilmiştir. BR için genel olarak T_{20} değerleri kullanılır. Müzik için bu değer 1 ile 1,3 arası olurken konuşma için 0,9 ile 1 değerleri arası olabilir (Bradley 2010). Konuşmada orta frekanslar etkili iken, müzikte alçak frekanslar daha çok önem kazanır. Stüdyo odasında ve prova odasında reverberasyona bağlı bas oranı sırasıyla 1.2 ve 1.3'tür. Tiz oranı ise stüdyo odasında ve prova odasında sırasıyla 1,21 ve 1,27'dir. Her iki hacimde de değerlerin ideal aralıkta olduğu görülmektedir.

3.2.7 İlk gecikme aralığı (Initial Time Delay Gap, ITDG) ölçüm sonuçları

İlk gecikme aralığı, yakınlık, lokalizasyon gibi öznel parametreler ile ilişkili olarak hacmin ilk yansımalarının algı üzerine etkisinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. İlk gecikme aralığı alıcı-kaynak konumuna göre değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle konuma bağlı olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada ölçümlerin algı ile ilişkilendirilecek olması nedeniyle, icra konumlarındaki sinyal tepkisi analiz edilerek yansımaların gecikme süreleri ve genlik değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 3.15'te stüdyo odasında L1 kaynak konumu ve M6 alıcı noktası için, prova odasında ise L1 kaynak konumu ve M2 alıcı noktası için ilk 50 ms zaman aralığında enerji-zaman eğrileri verilmiştir. Aynı zamanda direkt ses, ilk gecikme aralığı ve ilk 5 sıra yansımalar şekilde gösterildiği gibidir. Buna göre, stüdyo odasında zeminden gelen yansımalar çıkarıldığında ilk yansımanın 11.5 ms gecikme ile ve -11.5 dB bağlı genlik düzeyi ile geldiği görülmektedir. Prova odasında ise ilk yansıma benzer şekilde 7 ms gecikme ile ve -5 dB bağlı genlik düzeyi ile gelmektedir. İlk gecikme aralığında stüdyo odasında zemin yansımalarının oldukça etkili olduğu görülmektedir. Fakat zeminden gelen yansımalar sonrasında direkt sestten sonra gelen yansıma düzeylerinin tekil yansımalar dışında düşük olduğu görülmektedir. Prova

odasında ise ilk 5. sıra yansımalarında dahi direkt sese göre azalmanın 10 dB’den az olduğu görülmektedir.



Şekil 3.15 : a) Stüdyo odasında L1 kaynak durumu için M6 alıcı konumunda ve b) prova odasında L1 kaynak durumu için M2 alıcı konumunda enerji-zaman eğrileri

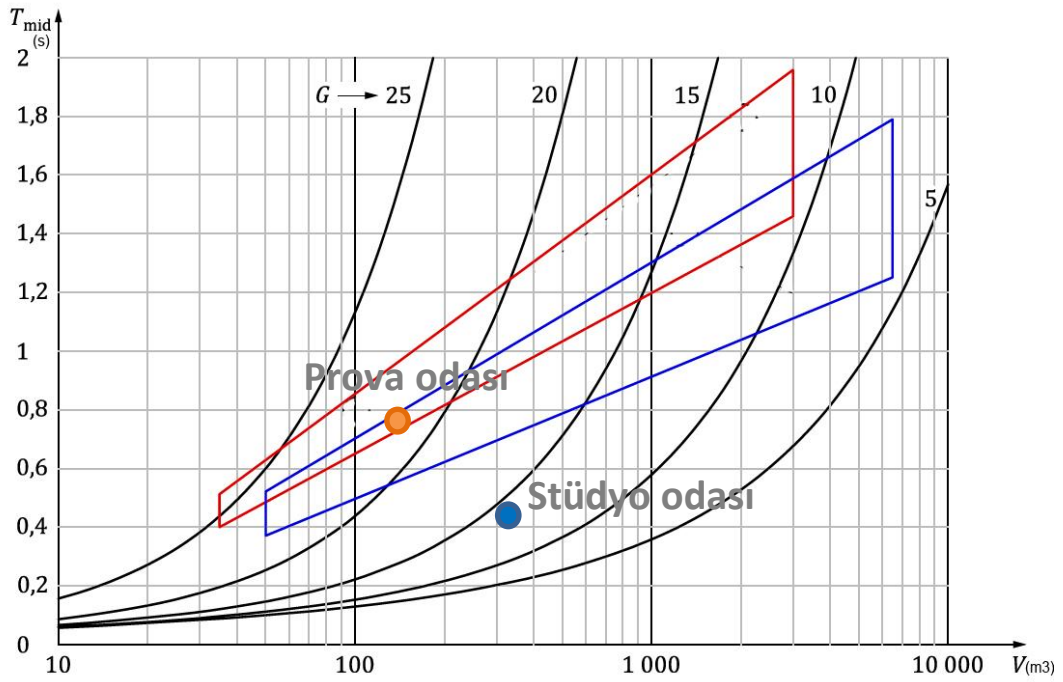
3.2.8 Güçlülük (Sound Strength, G) hesaplama sonuçları

Bir sesin, tamamen yutucu (yansımatsız) bir odada kaynaktan 10 m uzaklıktaki ses basıncı ile normal mekândaki basınç düzeyi farkına denir. Aynı zamanda mekândaki total enerjinin 10 m mesafede kaydedilmiş direkt ses oranından da elde edilebilir. Aşağıdaki bağıntıya göre hesaplanır.

$$G = \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}{\int_0^{tdir} h^2_{10m}(t) dt} \quad (3.6)$$

Aynı zamanda ölçüm yapılamadığı durumlarda, standartta verilen grafik gösterimi ile güçlülük (G), T_{mid} ve hacme bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Bu tabloya göre

stüdyo odasında hesaplanan ses yüksekliği düzeyi 13 dB'dir (Şekil 3.16). Bir enstrümanın hacim bazında uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla enstrüman ses gücü düzeyine ve odanın G düzeyine göre ses düzeyinin hesaplanması ISO 23591:2021'e göre yapılmıştır. Sonuç olarak, $L_{p(forte)}$ 'nin ideal durumlar için değer aralığı 85-90 dB olduğu varsayıldığında bu hacimde icra edilen keman, akustik gitar, kontrbas, çello, flüt ve klarnet gibi düşük ses gücüne sahip enstrümanların yeterli ses basınç düzeyini sağlayamadığı görülmektedir. Diğer bir yandan, prova odasında grafiğe göre hesaplanan G düzeyi 22 dB'dir (Şekil 3.16). Ses gücü düzeyi düşük enstrümanlar için yeterli ses seviyesi sağlansa da piyano, trombon, trompet, İngiliz kornosu gibi ses gücü yüksek enstrümanlarda ses seviyesi istenen düzeyinin çok üzerine çıkmıştır.

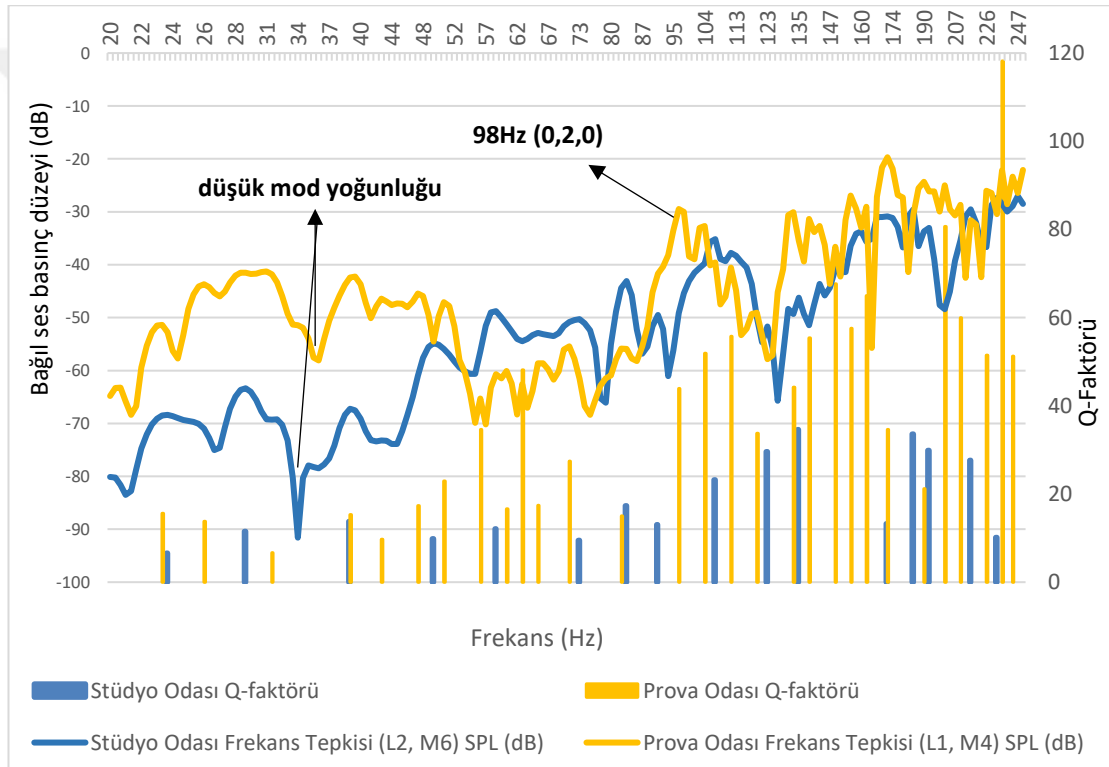


Şekil 3.16 : Reverberasyon süresine ve hacme bağlı olarak değişen ses güçlülüğü (G) değerleri

3.2.9 Kalite faktörü (Q-Faktör) ve modal düşme süresi ölçüm sonuçları

Mod analizi ya da özfrekans analizinden elde edilen ses basınç dağılımı ile hacim boyutlarının, oranlarının ve geometrisinin ses alanına etkisi irdelenebilmektedir. Bu analizde sınır koşulları göz ardı edilir. Bununla birlikte frekans tepkisi analizi ise alıcı kaynak konumuna ve yüzey özelliklerine bağlı olarak sınır etkileşimi sonucunda alıcı noktasında elde edilen tepkinin frekans açılımını ifade eder. Frekans tepkisi ile ilişkilendirilen Q-faktör (Q-factor) ve modal düşme süresi (Modal Decay Time)

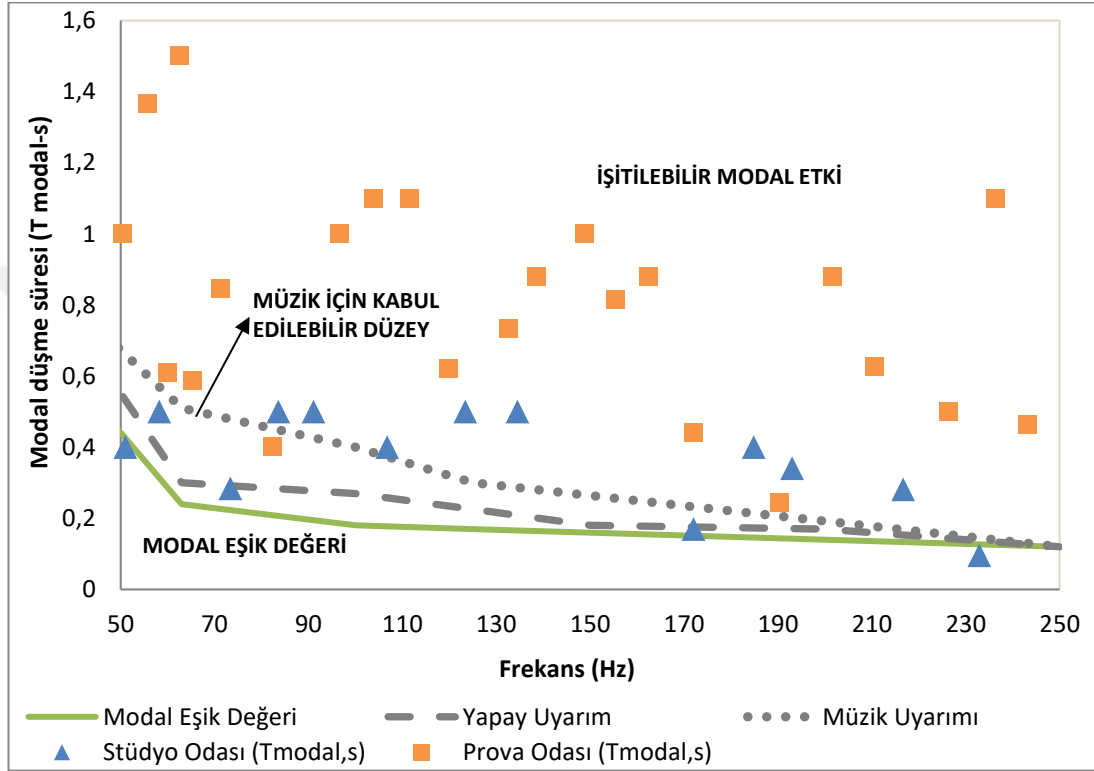
parametreleri ile rezonansların algılanabilirliği ölçülebilmektedir. Q-faktör için eşik değerinin Q16 olduğu çeşitli çalışmalarda ölçülmüştür (Stephenson 2012). Q değerinin artması ilgili frekansta oluşan rezonansın keskinliğinin arttığını ve buna bağlı olarak algılanabilirliğinin arttığını göstermektedir. Her iki hacimde yapılan ölçümler sonucunda (L1-M6 stüdyo odasında, L1-M4 prova odasında) elde edilen frekans tepkisi Q-faktör analizi karşılaştırması Şekil 3.17’de verilmiştir. Buna göre Q-faktör değerinin ortalama olarak stüdyo odasında Q30 değerinin altında olduğu görülürken, prova odasında bu değer Q30 ile Q100 arası değiştiği görülmektedir. Buna göre prova odasında rezonansların algı üzerindeki etkisinin çok fazla olduğu, stüdyo odasında ise çok daha düşük olduğu nesnel olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.17 : Her iki hacimde frekans tepkisi ve frekans tepkisinden elde edilen Q faktörü karşılaştırması

Q-faktörünün yüksek olması aynı zamanda ilgili frekanstaki oluşan sesin geç sönümlenmesi ile ilişkilidir. Modal düşme süresi parametresi ile bu azalım indirekt olarak frekansa bağlı olarak hesaplanır. Modal düşme süresinin optimum değerleri sinyal içeriğine ve frekansa bağlı olarak değişmektedir. Modal eşik değeri 0.2 s olmakla beraber eşik değeri, işitme sistemimize bağlı olarak alçak frekanslarda artmaktadır. Aynı zamanda müzik içeriğinde eşik değeri yapay bir uyarıma göre daha yüksektir (B. M. Fazenda vd. 2015). Fazenda'nın çalışmasından elde edilen modal

düşme süresi ve işitilme ilişkisi grafiğine göre odaların 50 Hz - 250 Hz arası her bir frekansta hesaplanan modal düşme süresi Şekil 3.18'deki gibidir. Stüdyo odasında alçak frekanslarda modal düşme sürelerinin eşik değerinin altında olduğu, daha üst frekanslarda ise eşik değerine yakın olduğu görülmektedir. Bununla birlikte prova odasında ise bu değerlerin frekanstan bağımsız olarak eşik eğrisinin çok üzerinde olduğu görülmektedir.

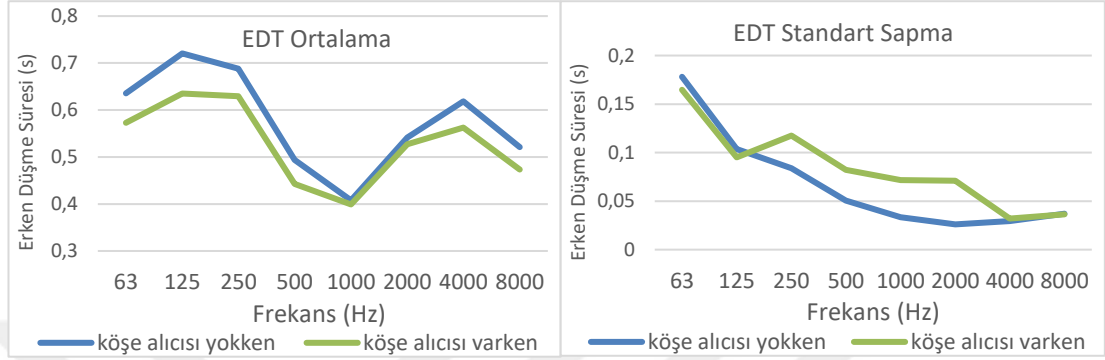


Şekil 3.18 : Her iki hacimde ölçüm sonuçlarından elde edilen modal düşme sürelerinin karşılaştırılması (Fazenda'nın çalışması baz alınarak çizilmiştir.)

3.2.10 Köşe ölçümlerinin nesnel değerlendirmeye etkisi

Prova odası, akustik düzenlemenin olmadığı fakat pek çok müzisyenin de prova ve çalışma alanı olarak kullandığı bir odadır. Prova odası, 150 m³ hacmi ve yansıma düzeyi yüksek yanal yüzeyleri ile rezonansların oldukça etkili olduğu bir ortamdır. Bir yalıtım ölçüm standardı olan ISO 16283-1:2014' te "Binalarda ve yapı elemanında ses yalıtımı saha ölçümü – hava doğuş ses yalıtımı" 25 m³'ten küçük hacimlerde alçak frekans değerlendirmesi için reverberasyon süresi ölçümü prosedürü tanımlanmıştır (TS EN ISO 16283-1 2014). Odanın 25 m³'ten büyük olması nedeniyle köşe ölçümleri keşif amaçlı yapılmıştır. Yalıtım standardında tanımlanan minimum iki köşe ölçümü eklenmesi durumunda elde edilen ortalama değerlerle karşılaştırılması ve değerlerin

değişimi Şekil 3.19'daki gibidir. Nesnel parametreler, iki kaynak pozisyonu ve 4_{orta} alıcı noktası ve $4_{\text{orta}}+2_{\text{köşe}}$ alıcı noktasının aritmetik ortalama ve standart sapma değerleri olarak verilmiştir. Maksimum 1 s olarak hesaplanan sapmaların EDT JND (%18) değerine yakın olduğu görülmektedir. Köşe konumlarında oluşan basınç farklılıkları nedeniyle, ortalamalar benzer çıksa da sapmaların arttığı görülmüştür.



Şekil 3.19 : Prova odasına ait EDT ortalama ve standart sapma değerinin, ortalaması alınan alıcı noktalarının konumuna göre 1/1 oktav bantta değişimi

3.3 Tartışma ve Sonuç

Öncelikli olarak, alçak frekanslarda modal alan ile dağınık alan arasındaki kestirimi belirleyen Schroeder frekansı (f_{kritik}) stüdyo odasında 85 Hz, prova odasında ise 158 Hz'dir. Stüdyo odasında hacmin daha büyük olması ve reverberasyon süresinin düşük olması sebebiyle daha alçak oktavlarda olan geçiş frekansı, daha küçük hacme sahip olan ve reverberasyon süresi daha yüksek olan prova odasında daha yüksek bir oktavda çıkmaktadır. Schroeder teorisine göre hacmin azalması ve reverberasyon yükselmesi ile modal alan ile dağınık alan geçişi daha üst oktavlara kayması ile rezonansalar daha işitilebilir hale gelmektedir. Fakat Schroeder teorisi, kaynak ve sınır etkileşimini hesaba katmadan sadece hacme ve reverberasyon süresine göre geçişi hesaplamaktadır (Dorrego ve Vigeant 2022). Bu nedenle, ölçüm sonuçlarına bakıldığında sınır koşullarına bağlı faz çakışmaları nedeniyle oluşan sapmalar orta frekanslara kadar devam etmektedir. Dolayısıyla sadece dağınık alanın Schroeder teorisine bağlı olarak hesaplanan f_{kritik} bandının daha üzerinde elde edilebildiği görülmektedir. Alıcı noktaları arasındaki ölçüm farklılıklarının sadece modların etkisiyle değil aynı zamanda yüzeyde uygulanan farklı kaplama sistemleri ile de ilişkili olarak oluştuğu görülmüştür.

Her iki hacimde ölçüm sonuçları nesnel değerlendirme parametreleri aracıyla optimum değerler ile karşılaştırılmıştır:

- *Erken düşme süresi* değerlerinde alıcılar arası sapmanın T_{30} 'a göre daha fazla olduğu görülmektedir. İki oda karşılaştırıldığında özellikle farkın alçak frekanslarda olduğu görülmektedir. Bununla birlikte stüdyo odasında yutucu sistemlerin yoğunluğu nedeniyle EDT değerleri düşük çıkmıştır, prova odasında ise yüksek EDT süresine bakılarak erken yansımaların yüksek olduğu söylenebilmektedir. Standart 23591:2021'de önerilen T_{30} değer aralıkları 300 m^3 hacme sahip olan stüdyo odasında alçak sesli enstrüman grubu için 0,9-1,2 s ve yüksek sesli enstrüman grupları için 0,7-1 s'tir. 150 m^3 hacme sahip olan prova odasında alçak sesli enstrümanlar için 0,75-1 s arası T_{30} önerilirken, yüksek sesli enstrüman grubu için 0,55-0,8 s aralığı önerilmektedir. Buna göre, ortalama olarak 0,4 s olan T_{30} değerleri stüdyo odasında her iki enstrüman grubu için istenen ölçütlerden düşük çıkmıştır. Diğer bir yandan prova odasında 0,65s olan T_{30} değerlerinin istenen ölçütleri yüksek sesli enstrümanlar için sağladığı, alçak sesli enstrüman grubu için ise ölçütlere yakın çıktığı görülmüştür. Aynı zamanda standartta orta frekansa göre her oktav bant için en yüksek ve en düşük reverberasyon süreleri (T_{30}/T_{mid}) tolerans değerleri tanımlanmıştır. Buna göre stüdyo odasında 63 Hz ve 125 Hz'de sapma oranı tolerans değerlerinden yüksektir ($p_{63\text{Hz}}=\%155>\%140$, $p_{125\text{Hz}}=\%147>\%120$, $p_{250\text{Hz}}=\%108<\%110$). Bununla birlikte prova odasında sapma oranları tolerans değerlerinin içinde kalmıştır.
- *Netlik indeksi (C_{80})* prova odasında netliğin 500- 1000 Hz aralığı dışında ideal koşulları sağladığı, diğer bir yandan, stüdyo odasında ortalama 10-14 dB olan C_{80} indeksinin ideal düzeyin çok üzerinde olduğu görülmektedir. İki hacim arasındaki farkın C_{50} ve C_{80} 'de arttığı görülmektedir.
- *Q-faktör ve modal düşme süresi* parametreleri ile odaların tek bir alıcı noktasında frekans tepkisine bakılarak rezonansların etkinliği algı ile ilişkilendirilmiştir. Prova odasında yansıma yoğunluğunun daha fazla olması ve yanal yüzeylerde herhangi bir yutucu sistem kullanılmaması nedeniyle modların daha etkili ve belirgin olduğu görülmüştür. Stüdyo odasında ise düzensiz geometri ve yutucu sistemlerin yoğun kullanımı nedeniyle modların eşik değerine yakın olduğu görülmüştür.

- *Destek* parametresi daha çok sahne koşullarının değerlendirilmesinde kullanılsa da bu çalışmada anket kapsamında irdelenen “müzişyenin hacim tarafından desteklenmesi” ile ilgili olarak sunulmuştur. İki oda arasındaki farkın yüksek olduğu ve stüdyo odasındaki değerlerin prova odasına göre çok daha düşük olduğu görölmektedir.
- *Güçlölük (G)* ISO 23591:2021 de belirtilen tabloya göre ampirik olarak hesaplanmıştır. Stüdyo odasında ses gücü düzeyi yüksek ve alçak her iki enstrüman grubu için istenilen değerin altında çıkmıştır. Prova odasında ise ses gücü yüksek enstrümanlar için yüksek, ses gücü düzeyi alçak enstrümanlar için ideal çıkmıştır.
- *İlk gecikme aralığı* belirli bir alıcı noktasında (anket çalışmasında müzişyen konumu) analiz edilmiştir. İlk beş güçlü yansıma zeminden gelen yansımalar göz ardı edildiğinde stüdyo odasında 30 ms içerisinde alıcı noktasına ulaşırken 30 ms içerisinde ulaşmıştır. Aynı zamanda prova odasında güçlü yansımalar yine yüksek düzeyde diğer yansımalar eşlik ederken, stüdyo odasında -15 dB’nin altında kalmaktadır.

JND değerleri, hacimlerin ses alanlarının, işitsel koşullarının farklılaştığı durumlarda etkisinin değerlendirilebilmesi için önemli bir ölçüttür. Fakat JND değerleri TS EN ISO 3382-1:2010 standardında sadece büyük hacimler, orta frekanslar ve belirli parametreler için tanımlanmıştır. Dolayısıyla JND değerlerinin küçük hacim koşullarına bağılı olarak ortaya konması gerekmektedir (Bradley 2010). Bununla birlikte JND değerlerinde kullanılan yöntemle bağılı olarak değışiklikler oluşmaktadır. Güncel çalışmalarda kullanılan yeni yöntemlerle elde edilen değerler, ölçüm standardında belirtilen parametrelerin JND tablosu ile karşılaştırıldığında frak eğişinin daha yüksek olduğu görölmektedir (Dorrego ve Vigeant 2020).

Düşme eğrisindeki sapmaların, özellikle eğrinin ilk kısımlarında mod etkisi ve malzeme farklılığı nedeniyle daha çok olduğu görölmüştür. Düşme süresinin geç kısımlarında ise hacimdeki yansımaların dağınlıklaşmasına bağılı olarak T_{30} ’da düşme eğrisinin ilk kısmının hesaplandığı EDT parametresine göre daha az sapmanın oluştuğı görölmüştür.

4. KÜÇÜK HACİMLERDE MÜZİSYENLERİN ÖZNEL TERCİHLERİ VE ENSTRÜMAN ÖZELLİKLERİ İLE İLİŞKİSİ

Çalışma kapsamında İTÜ Dr. Erol Üçer Müzik İleri Araştırmalar Merkezi'nde (MIAM) prova odası ve kayıt stüdyosunun canlı odası seçilmiş, farklı enstrümanlar çalan 24 müzisyen ile performansa dayalı yüz yüze anket çalışması yürütülmüştür. Anket çalışmasının amacı ve tez kapsamındaki diğer çalışmalarla ilişkisi aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Reverberasyon süresi düşük odalarda oluşan ses alanının müzisyen izlenimine, parametreler arası ilişkiye ve müzisyen performansına etkisinin irdelenmesi
- Yüksek yansıma düzeyine ve etkin oda rezonanslarına sahip ses alanının müzisyen izlenimine, parametreler arası ilişkiye ve müzisyen performansına etkisinin irdelenmesi
- Erken yansımaların müzisyen izlenimine ve parametreler arası ilişki düzeyine etkisinin irdelenmesi
- ISO 23591:2021'de belirtilen akustik kalite kriterleri ile müzisyen izlenimlerinin karşılaştırılması
- Ölçümden elde edilen nicel veriler ile öznel verilerin karşılaştırılmasıyla açıklayıcı parametrelerin elde edilmesi
- Oda rezonanslarının algılanabilirliğinin göstergesi olan Q -faktör ve modal düşme süresi kriterlerinin eşik değerlerinin icra ilişkili olarak öznel değerlendirmelerle karşılaştırılması
- Enstrüman ses gücü, frekans spektrumu, fiziksel yapısı gibi karakteristik özelliklerinin icra edilen odalardaki müzisyen izlenimine ve rezonans algısına etkisinin irdelenmesi

Hacim değerlendirilmesinde parametrelerin değerleri kadar hangi parametrelerin önemli olduğu da önemlidir. Nesnel ve öznel parametreler arası belirli ilişkiler olsa da ortam koşullarının değişmesi ilişkililik önem katsayıları değişebilmektedir. Aynı zamanda benzer çalışmalar incelendiğinde prova odaları kapsamında müzisyen izlenimine ilişkin çalışmaların sınırlı olduğu, buna rağmen yeni standart ISO 23591:2021'in yayınlanması ile çalışmaların arttığı görülmektedir. İlgili çalışmalar 1.4.1.2 bölümünde detaylı bir şekilde sunulmuştur. Nesnel ve öznel ilişki değerlendirmeleri pek çok çalışmaya konu olsa da rezonansların öznel değerlendirmeye etkisi ve nesnel olarak rezonanslarla karşılaştırılmasına ilişkin çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür.

4.1 Metodoloji ve Kapsam

4.1.1 Anket yönteminin belirlenmesi

Akustik ölçümler, hacimlerin analizinde önemli bir rol oynasalar da ses alanı değerlendirmesinde algının duyuşal faktörlere bağlı olması nedeniyle insanların gözlemi belirleyicidir. Öznel değerlendirmeler ile nesnel izlenimler arasında yapılan pek çok çalışmada izlenimlerin hangi faktörlerle ya da parametrelerle etkileşimde olduğu belirlenmeye çalışılmaktadır. Birebir bir ölçümü mümkün olmamakla beraber aynı parametrenin birden fazla değişkene bağlı olduğu durumlar olabilmektedir.

Temelde öznel izlenimleri araştıran iki yöntem vardır: İlk yöntem, ses alanlarının kontrollü değişimlerle sentezlenmiş olan test numunelerinin değerlendirilmesi, diğer metod ise akustik kalitenin değerlendirilmesinin tamamlanmış fiziksel ortamlarda gerçekleşen dinleme ya da performans eylemi üzerinden yapılmasıdır. Her iki yöntem ile pek çok çalışmada önemli bilgiler elde edilmiştir ve her iki yönteme ait avantajlar ve dezavantajlar aşağıdaki gibidir:

- Dineleme testleri, laboratuvar koşullarında benzetim yöntemi ile sentezlenen ve kontrollü bir şekilde oluşturulan varyasyonları üzerinden yapılan karşılaştırmalar ile hızlı sonuç elde etmeyi sağlar. Fakat oluşturulan ses alanı varyasyonlarının ya da test numunelerinin yapay bir karaktere sahip olması kaçınılmazdır. Aynı zamanda test ortamların sanal olarak hazırlanması, test numunelerinin hazırlanması gibi zaman alan bir hazırlık aşaması vardır. Bunun

yanı sıra en büyük avantajı ise araştırılan ya da test edilen konunun sınırlandırılabilmesi ve diğer değişkenlerin etkisinin elimine edilebilmesidir.

- Odanın direkt olarak değerlendirilmesi ise daha güvenilir ve gerçekçi sonuçlar vermekle beraber, sonuçların kısa hafıza performansı nedeniyle hemen değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra en büyük dezavantajı ise değerlendirme sırasında şartların değişkenliği ve kontrollü bir karşılaştırma ortamının sağlanamıyor olmasıdır.

Bu çalışmada özellikle alçak frekanslardaki ses algısını etkileyen rezonansların, çalma eylemi sırasındaki etkisinin analizi için yüz yüze anket yöntemi seçilmiştir. Prosedür olarak, müzisyenlerden sırasıyla stüdyo odası ve prova odasında seçtikleri klasik müzik parçalarını icra ettikten sonra yüz yüze anket sorularını cevaplamaları istenmiştir. Bazı çalışmalarda icra edilen parçanın ortam değerlendirmesine etkisinin çok fazla olmaması (Park ve Jeon 2016; Wankling ve Fazenda 2009) ve çalışmada farklı enstrümanların kullanılması nedeniyle ortam değerlendirmesi için belirli bir parça seçilmemiş, klasik müzik olarak sınırlandırılmıştır. Farklı müzik parçalarının sonuçlara olası etkisinin azaltılması için aynı zamanda müzisyenler kromatik egzersiz ile ses ortamını deneyimlemişlerdir. Sonuçların kesinliğini artırmak amaçlı her parçanın icrası 2 kere tekrarlanmış, her bir icra yaklaşık olarak en az 1 dakika sürmüştür. Her iki hacimde gerçekleştirilen icra ve anket çalışması toplamda yaklaşık olarak 1,5 saat sürmüştür. Akustik hafızanın kısa olması sebebiyle anket çalışması icranın hemen sonrasında gerçekleştirilmiştir. Yüz yüze anket uygulamasının başka bir katkısı da müzisyenlere hacim akustiği ile kavramların tanıtılması ve aynı zamanda anket sırasında doğaçlama gelişen yorumların ve ifadelerin alınmasıdır. Sorular açık uçlu ve kapalı uçlu olmak üzere 2 türlü kurgulanmıştır. Kapalı uçlu sorularda parametrelere ilişkin değerlendirmeler alınırken açık uçlu kısımlarda bu değerlendirmelerin nedenine ilişkin yorumları alınmıştır. İstatistik analizler SPSS programı kullanılarak yapılmıştır (IBM Corp. 2020).

4.1.2 Örneklemenin belirlenmesi

Müzisyenlerle yapılan öznel değerlendirmelerin ölçüldüğü anket çalışmalarında diğer araştırmalardan farklı olarak prova odalarında icraya dayalı bir anket çalışması yürütülmüştür. Örneklem sayısı belirlenirken benzer çalışmalardaki katılımcı sayıları, katılımcıların özellikleri, elde edilen verilerin nasıl analizi edildiği gibi değişkenlere

bakılarak çalışmadaki örneklem sayısı belirlenmiştir. Ayrıca anket yönteminin yüz yüze olması ve icraya dayalı olması katılımcı sayısını belirleyen etmenlerdendir.

Çalışmada rezonans algısı irdelendiğinden odaların seçimi sırasında hacimlerin karşılaştırılabilir olması, olağan dışı oda boyut oranları olmaması, bağlaışık hacimler olmaması, benzer piyano tipinin olması, rezonans etkinliğinin ve yansıma düzeyinin farklı olması hedeflenmiştir. Enstrümanların karakteristik özelliklerinin etkisinin analizi amaçlı enstrüman seçiminde ise ses gücü düzeyi yüksek ve alçak enstrümanlar ve farklı frekans spektrumuna sahip enstrümanlar seçilmiştir. Anket katılımcılarının icra ettikleri enstrümanların ses gücü, ses gücü düzeyi, ISO 23591:2021' e göre ses yüksekliği sınıflandırması yapılmıştır. Ayrıca frekans spektrumu ve enstrüman türüne bağlı katılımcı sayısı Çizelge 4.1'deki gibidir.

Çizelge 4.1 : Ankette kullanılan enstrümanların sınıflandırılması ve katılımcı dağılımı

Enstrüman	Ses Gücü ^a (Forte- mV)	Ses Gücü Düzeyi ^a (dB)	Ses Gücü Sınıflandırma ^a	Frekans Aralığı (Hz)	Katılımcı Sayısı (n)
Piyano ^c	10,0	100,0	Yüksek	28-4186	6
Çello	1,0	90,0	Alçak	65-988	2
Akustik Gitar	0,4	86,0	Alçak	82-1397	2
Keman	0,8	89,0	Alçak	196-4186	2
Saksafon (tenor)	6,3	98,0	Yüksek	104-659	3
Kontrbas	1,6	92,0	Alçak	41-247	1
Fagot	2,0	93,0	Alçak	60-620	1
Trombon	25,1	104,0	Yüksek	60-500	1
Klarnet	2,0	93,0	Alçak	165-1568	3
Trompet	12,6	101,0	Yüksek	165-988	1
İngiliz Kornosu	10,0	100,0	Yüksek	110-880	1
Flüt	1,3	91,0	Alçak	262-1976	1

^a Değerler ISO 23591:2021'e göre alınmıştır.

^b Sınıflandırma ISO 23591:2021'e göre yapılmıştır.

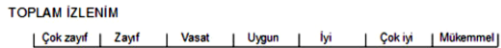
^c Piyano özelinde ilgili standartta belirtildiği gibi MEYER'in çalışması baz alınmıştır.

4.1.3 Anket formunun hazırlanması

Akustik anket çalışmaları, bir ortamın fiziksel koşullarının müzisyen izlenimine, deneyimine ve performansına olan öznel etkinin ölçülebilmesi açısından önemlidir. Müzisyenlerle yapılan çalışmalarda iletişimin sağlanabilmesi için konu ile ilgili ortak terimlerin anlaşılabilir olması, icra sırasında hacimle nasıl iletişime geçtiklerinin ya da hacmi nasıl algıladıklarının ifadesi açısından gereklidir (Gade 2010). Bu tip çalışmalarda ortak terimlerin kullanılması ve sonuçların karşılaştırılabilir olması oldukça önemlidir. Fakat prova odalarına ilişkin akustik anket çalışmaları çoğunlukla gürültü maruziyeti ya da yalıtım değerlendirmesi açısından yapılmıştır ve küçük

değerlendirilmesi amaçlı bir anket formatı hazırlanmıştır.

AÇIKLIK	Kaşık	Açık
REVERBERASYON	Ölü	Canlı
KUŞATILMIŞLIK	Yaygın	Dar
SAMİMİLİK	Uzak	Sıcak
YÜKSEKLİK	Yüksek	Sessiz
DENGE		



Şekil 4.1 : Öznel değerlendirme ölçeği (Barron 1971)

sorulara yer verilmiştir.

da değerlendirilmek istenmiş ve pilot çalışmalarda grup performanslara yer verilmiştir. Fakat yeterli katılımcı sayısına ulaşamadığı için grup performansa yönelik soru içerikleri çalışma kapsamından çıkarılmıştır. Pilot uygulama sonrasında anket formunda anlaşılmayan noktalar tespit edilmiş ve taslak form yenilenmiştir.

Anket çalışması, etik kurallar çerçevesinde “Yükseköğretim Kurulu Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi ile İstanbul Teknik Üniversitesi Sağlık ve Mühendislik Bilimleri İnsan Araştırmaları Etik Kurulu Sosyal ve Beşerî Bilimler İnsan Araştırmaları Etik Kurulu Çalışma Yönergesi” dikkate alınarak yürütülmüştür. Buna yönelik anket formunun başlangıç kısmında çalışmanın kapsamını, amacını belirten ve çalışmanın anonim olduğu ve gizli yürütüleceği bilgilerini içeren bir rıza metni bulunmaktadır.

4.1.4 Verilerin analizinde kullanılan yöntemler

Anket çalışmasında toplanan tüm veriler, temel tanımlayıcı istatistik bilgileri hesaplamak üzere (ortalama, standart sapma, standart hata, cevaplayan kişiler, enstrüman bilgileri) Microsoft Excel v. 14.0.0 programına işlenmiştir. Elde edilen verilerin analizi için iki yöntem kullanılmıştır. Düzenlenen veriler, diğer analizler için IBM SPSS Statistics v. 20 programında soru kalıpları ve cevap ölçekleriyle beraber ayrıca tanımlanmıştır. Elde edilen verilerin analizinde nicel ve nitel olmak üzere iki yöntem kullanılmıştır. Yöntemlerin açıklamaları ve özellikleri aşağıdaki gibidir.

- Nicel veri analizi: Verilerin toplanması, işlenmesi ve anlamlı sonuçlar çıkarılması sürecidir. Nicel veri analizinde mantığa dayalı ve araştırmaya en uygun olan hipotez öne sürülerek test edilir ve genelleme yapmaya çalışılır. Bir problemin bilimsel yolla çözülmesi için öncelikle değişkenler arasındaki ilişkinin tanımlanması gerekir. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki, bu ilişkinin yönü ve etkisinin açıklanması araştırma probleminde çözüme ulaştıran bir basamak niteliğindedir (Ekiz 2020).
- Nitel veri analizi: Üzerinde çalışılan veriyle ilgili anlam üretmek ve veri setinde neyin temsil edildiğine dair açıklamalar geliştirmek amacıyla yapılan bir sınıflandırma ve yorumlama sürecidir (Çelik, Baykal, ve Memur 2020). Bu bağlamda nitel veri analizi esasta üç adımda gerçekleştirilir: (i) Veri azaltımı; araştırma sonunda elde edilen verilerin seçilmesi, incelenmesi, basite indirgenmesi, özetlenip dönüştürülmesi; (ii) veri gösterimi; sonuçların ortaya

konması için toplanan verilerin düzenlenmiş halini oluşturma; (iii) sonuç çıkarma/doğrulama; olay ve nesneler arasındaki nedensel ilişkileri, örüntüleri, olası yapıları ortaya çıkarma, sonuçları geçerlik bakımından test etme (Miles, Huberman, ve Saldana 2014)

4.1.4.1 Nicel analiz yöntemleri

Parametrik bir testle analiz yapılabilmesi için verilerin; rassal ve bağımsız olarak elde edilmesi, normal dağılması, en az interval ölçek kullanılması, ana kitle varyanslarının homojen olması gibi koşullarla birlikte, her testin kendine has ek koşulları vardır. Veriler, çoğu zaman parametrik testlerin uygulanma koşullarını karşılayamadıklarından, içerisinde katı varsayımların bulunmadığı, nonparametrik testler kullanılabilir. Nonparametrik testler için çoğu zaman, verilerin, rassal ve bağımsız olarak elde edilmesi ve nominal veya ordinal ölçek kullanılması yeterlidir. Ana kitle dağılımı veya ana kitle parametreleri hakkında herhangi faraziyelere dayanmayan testlere “nonparametrik testler” ve test istatistiklerine ise “nonparametrik istatistikler” denir. Analiz türünün seçimi verinin yapısına göre değişmektedir. Bu çalışmada, odalar kendi içerisinde analiz edilirken parametreler arası ilişki Spearman sıra korelasyon analizi kullanılarak analiz edilmiştir. Spearman sıra korelasyon katsayısı da ilişkiyi ve ilişkinin derecesini belirler. Bu test parametrik bir analiz olan Pearson korelasyon katsayısının nonparametrik alternatifidir. Veriler bağımsız, rassal ve en az ordinal ölçekle elde edilmiş olmalıdır. Sıfır hipotezi “Olaylar birbirinden bağımsızdır, birbirlerini etkilememektedir, aralarında ilişki yoktur”, alternatif hipotez ise “Olaylar birbirinden bağımsız değildir, birbirlerini etkilemektedir, aralarında ilişki vardır” biçimindedir (Karagöz 2010). Bu analizde $p \leq 0,05$ değeri için sıralı değişkenler arasında pozitif ilişki istatistiki açıdan önemlidir (H1 kabul edilmekte, H0: ‘iki sıralı değişken arasında ilişki olmadığı’ hipotezi reddedilmektedir). Diğer bir yandan normalitenin sağlanması, örneklem sayısı küçük olması durumunda ($n < 30$) zor olduğu için, bu tip analizlerde nonparametrik yöntemlerin kullanımı önerilmektedir.

İstatistiksel bir araştırmada iki tür hipotez kurulur. “Eşit, fark yoktur, önemli değildir, en az(fazla) ... kadardır” biçiminde kurulan hipoteze “yokluk (null), boş ya da sıfır hipotezi” denir ve H0 ile gösterilir. H0 hipotezine karşı test edilen hipoteze ise “alternatif” seçenek ya da “karşıt hipotez” denir ve H1 ile gösterilir.

H0 ve H1 hipotezleri genelde aşağıdaki gibi kurulur;

H₀: Örneklemden elde edilen değer ile anakütlenin bilinen değeri arasında bir fark yoktur. H₁: Örneklemden elde edilen değer ile anakütlenin bilinen değeri arasında bir önemli (anamlı) bir fark vardır. Hipotez testlerinde ‘n’ sayıda örnek için yapılan test ‘n-1’ serbestlik derecesine sahiptir. Yapılan analiz sonuçlarında hesaplanan test istatistiği serbestlik derecesine bağlı olarak kritik tablo değeri ile karşılaştırılır ve tablo değerinden büyükse H₀ reddedilir (istatistik yazılımları bu kontrolü sağlamaktadırlar). H₀’ın reddedilebileceği en küçük anlamlılık düzeyine hipotezin olasılık değeri (p) denmektedir. Sonuçlar olasılık değerine (p) bakılarak yorumlanmaktadır. Olasılık değeri $p < 0,05$ ise sonuç istatistiksel olarak anlamlıdır, $p < 0,01$ ise yüksek düzeyde anlamlılık, $p < 0,001$ ise çok yüksek düzeyde anlamlılık söz konusudur. Öte yandan $0,05 \leq p < 0,1$ ise anlamlılık eğiliminden söz edilebilmektedir. Sonuçlar ‘[test] ([serbestlik derecesi]) = [test istatistiği], p = [olasılık değeri]’ şeklinde gösterilmektedir (Örn: $\chi^2(5) = 4.300, p = 0.507$).

4.1.4.2 Nitel analiz yöntemleri

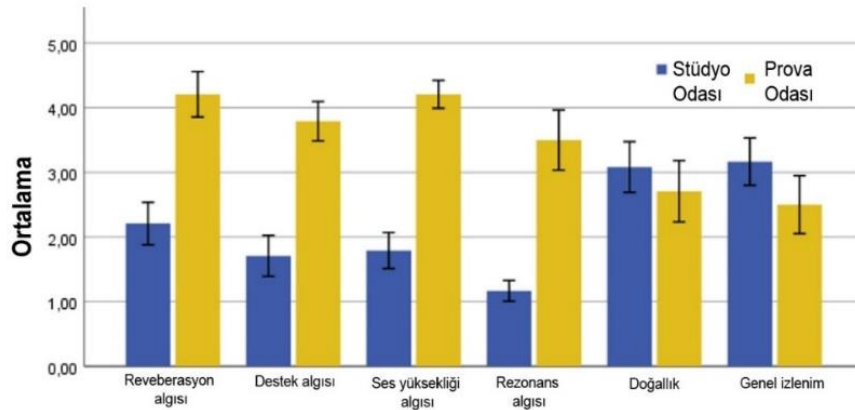
Nitel verilerin içerdiği müzisyenlerin görüşmeler esnasında yaptıkları sözel yorumlar ve açık uçlu sorulara verdikleri cevaplar, ses kayıtlarından elde edilen yorumlar deşifre sürecinde metne dönüştürülerek excel tablosuna işlenmiş, veri aşinalığı sağlamak amaçlı tekrar tekrar okunmuş ve incelenmiştir. Sonrasında metinler anlamlı parçalara bölünmüş (ör: ortam ile ilgili / performans ile ilgili) ve kodlanmıştır. Nitel veri tablosunda tekrar eden kodlar renk ve yazı karakteri değişimi ile işaretlenmiştir. İlişkili olduğu görülen kodlardan yola çıkılarak temalar oluşturulmuştur. Konu başlıkları ve içerdikleri kodların tanımlanmasının ardından kullanıcı yorumları tekrar gözden geçirilmiş ve ankete olan etkilerine göre kategorize edilmiştir. Oda bazında tekrar sayısına bakılarak (number of frequency) temaların dağılımı elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar odalar arası karşılaştırılarak sütun grafiği şeklinde sunulmuştur.

4.2 İstatistiki Analiz Sonuçları

4.2.1 Nicel analiz sonuçları

Şekil 4.2’de her iki odaya ait algı atıflarının ortalama değerleri reverberasyon algısı, destek, gürlük algısı, rezonans algısı, doğallık ve genel izlenim gibi öznel değerlendirme parametreleri üzerinden verilmiştir. Reverberasyon algısı “reverberasyon süresi, sesin uzaması” olarak tanımlanmış, değerlendirme ölçeği (1) hiç– (5) çok fazla arası olacak şekilde belirlenmiştir. Odanın icra sırasında hissedilen

destek etkisinin değerlendirilmesinde ise cevap ölçeği (1) yalnız çalışıyormuş hissi – (5) güçlü destek hissi olarak hazırlanmıştır. Gürlük (ses yüksekliği) değerlendirmesinde “odanın ses yüksekliği tepkisi” sorulmuş, cevap ölçeği (1) hiç – (5) çok fazla olarak hazırlanmıştır. Doğallık (1-yapay/5-çok doğal) atfı genelde kayıt ve dinleme odalarının değerlendirilmesinde kullanılırken pek çok çalışmada aynı zamanda tını ile ilgili izlenimlerin aktarılmasında kullanılmıştır. Rezonans algısı ise “belirli tonların titreşimi” ile tanımlanmış, sunulan cevap ölçeği (1) hiç – (5) çok fazla arası değişmiştir. Sonuçlara bakıldığında, prova odasında gürlük, destek ve reverberasyon algılarının yüksek ortalamaya sahip olduğu, bununla birlikte doğallık parametresinin düşük ortalamaya sahip olduğu görülmüştür. Her iki hacimdeki genel izlenim ortalama değerleri birbirlerine yakın çıkmıştır. Farklı enstrüman tiplerinin sonuçlar üzerindeki etkisi, enstrümanların karakteristik özellikleri ile ilişkili olarak çalışmanın daha sonraki aşamalarında değerlendirilmiştir.



Şekil 4.2 : Her iki odada öznel parametrelerin ortalama değerleri

Öznel değerlendirmelerde, parametreler arası ilişki odanın karakteristik özelliklerine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Parametreler arası etkileşimin irdelenmesi ve hangi parametrelerin genel izlenimde etkin olduğunun araştırılması için non-parametrik Spearman sıra korelasyonu kullanılmıştır. Stüdyo odası değerlendirmesi için yapılan korelasyon analizi sonucu Çizelge 4.2’de verilmiştir. Kullanılan atıflar iki grupta kategorize edilebilmektedir: Oda ile ilgili izlenimler ve odanın icraya etkisi. Stüdyo odasında yapılan değerlendirmelerin korelasyon analizine göre, reverberasyon algısı ve gürlük arasında pozitif bir ilişki varken, dinamik değişimlerde zorluk ve icra sırasında odaklanma sorunu ile negatif bir ilişkisi vardır. Dolayısıyla, hacimde reverberasyon süresinin fazla olması gibi düşük olması da olumsuz koşulları beraberinde getirmektedir. Netlik parametresinin de (1-çok bulanık/5-çok net) aynı

şekilde odaklanama sorunu ile pozitif ilişkisi, netliğin yüksek olması durumunda performansın olumsuz etkilendiği görülmektedir. Toplam yansımaların düzeyi ile ilişkili olarak gürlüğü, destek ve doğallık ile pozitif ilişkili olduğu görülmüştür. Aynı zamanda en yüksek korelasyon katsayısı ile performans üzerindeki en etkin parametre olduğu belirlenmiştir. Düzensiz geometri, uygun boyut oranları ve ses yutucu sistemleri gibi rezonans etkisinin azaltılması amaçlı önlemler alınsa da stüdyo odasında, cam yansıtıcı olan tekil yüzeylerden gelen güçlü yansımalar ile ses yüksekliği arttıkça rezonans algısının da arttığı ve performansı etkilediği görülmüştür. Bu parametrenin daha üst oktav bantlarda oluşan yankı ile ilişkili olarak değerlendirildiği düşünülmektedir. Fakat rezonans etkisinin zayıf olması nedeniyle rezonans algısı ve diğer parametreler arası kuvvetli bir ilişki bulunamamıştır. Bas algısı katılımcılara “işitsel ya da hissiyat olarak algılanan bas düzeyi” olarak tanımlanmış ve cevaplar (1) hiç – (5) çok fazla olarak ölçeklendirilmiştir. Baslılık ve doğallık arasındaki pozitif ilişki, bas eksikliğinin hacmin yapay olarak algılanmasına neden olabileceğini göstermiştir. Sonuç olarak, genel izlenimi en çok açıklayan parametreler; reverberasyon algısı, gürlük ve doğallıktır.

Çizelge 4.2 : Stüdyo odasında öznel değerlendirmeler arası Spearman sıra korelasyonu (*p<0.05, **p<0.01). Gİ: Genel İzlenim

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Gİ
1. Reverberasyon algısı	-	-0,284	0,201	,436*	0,179	0,273	0,106	0,278	0,258	-,411*	-,566**	,593**
2. Netlik algısı			-0,024	-0,035	-0,134	-0,035	-0,145	-0,118	-0,186	-,502*	-0,252	0,023
3. Destek algısı				,577**	0,137	0,327	0,168	,456*	0,319	-0,179	-0,052	0,258
4. Gürlük algısı					0,350	,502*	0,150	,713**	0,223	0,040	-0,243	,512*
5. Rezonans algısı						-0,349	0,009	,448*	,497*	-0,097	-0,199	0,102
6. Doğallık							,418*	,461*	-0,183	-0,076	-0,315	,456*
7. Baslılık								0,163	0,131	-0,030	0,233	0,119
8. Odanın performansa etkisi									0,162	-0,021	-0,189	,532**
9. Gürlük rahatsızlığı										0,029	0,000	0,081
10. Odaklanamama sorunu											,408*	-,422*
11. Dinamik değişimlerde sorun												-0,303

Prova odası değerlendirmesi için yapılan korelasyon analizi sonucu Çizelge 4.3’te verilmiştir. Prova odasında, stüdyo odasından farklı olarak ve yüksek düzeydeki yansımaya bağlı olarak, parametreler arasındaki korelasyon katsayıları yüksek çıkmış, aynı zamanda birbirleri ile ilişkili parametre sayısı artmıştır. Öncelikli olarak standarda göre optimum düzeylerde olan reverberasyon süresi, netlik ile negatif, odaklanma sorunları işe pozitif ilişkili çıkmıştır. Aynı zamanda doğallık ile olan negatif ilişkisi

ortam reverberasyon algısının ideal düzeyden yüksek olduğunu ve hacmin yapay olarak algılandığını göstermiştir. Destek algısı da yüksek yansıma düzeyine bağlı olarak, gürlük ve performans sorunlarıyla pozitif ilişkilidir. Gürlük parametresinin ise en açıklayıcı gösterge olduğu belirlenmiş ve diğer parametrelerle ilişki katsayısının yüksek olduğu görülmüştür. Beklendiği üzere, bu hacimde rezonans algısı gürlük ile pozitif, doğallık ile negatif ilişkilidir. Diğer değişkenlerle en zayıf ilişkili olan bas algısına bakıldığında, rezonanslarla ilişkisinin de zayıf olduğu görülmüştür. Ses yüksekliği rahatsızlığı, dinamik değişimlerde zorluk ya da odaklanma sorunu gibi performans göstergelerine bakıldığında, genel izlenimde etkili oldukları görülmüştür. Sonuç olarak bu hacimde genel izlenimi en çok açıklayan parametreler, reverberasyon algısı, netlik, gürlük, doğallık ve rezonans algısıdır.

Çizelge 4.3 : Prova odasında öznel değerlendirmeler arası Spearman sıra korelasyonu (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$). Gİ: Genel İzlenim

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Gİ
1. Reverberasyon algısı	-	-,573**	0,342	-,586**	-,557**	-,428*	0,231	0,167	0,378	-,531**	0,156	-,641**
2. Netlik algısı			-,0230	-,656**	-,654**	-,727**	-,0184	-,0218	-,575**	-,667**	-,0257	-,638**
3. Destek algısı				-,496*	-,450*	-,0134	0,196	0,242	0,338	-,449*	-,468*	-,0230
4. Gürlük algısı					-,790**	-,631**	0,059	-,663**	-,636**	-,777**	-,621**	-,743**
5. Rezonans algısı						-,684**	0,085	0,353	-,607**	-,772**	-,462*	-,630**
6. Doğallık							-,0269	-,0399	-,661**	-,661**	-,554**	-,668**
7. Baslılık								0,033	0,244	0,311	0,100	-,0041
8. Odanın performansa etkisi									-,417*	0,278	-,476*	-,435*
9. Gürlük rahatsızlığı										-,643**	-,427*	-,411*
10. Odaklanamama sorunu											-,495*	-,731**
11. Dinamik değişimlerde sorun												-,516**

Enstrümanın karakteristik özelliklerinin hacim algısında ne kadar etkili olduğunu irdelemek için Fisher olasılık testi (rxc) (Mehta ve Patel 2010) kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, prova odasında, enstrüman ses gücü düzeyi ile gürlük ($p=0,019$, *two-sided Fisher olasılık testi*), ses yüksekliği rahatsızlığı ($p=0,012$, *two-sided Fisher exact test*) ve netlik ($p=0,003$, *two-sided Fisher exact test*) arasında anlamlı bir etkileşim olduğu görülmektedir. Ses gücü yüksek olan enstrümanlarda ses yüksekliği daha fazla rahatsızlık yaratmış, enstrüman net işitilememiştir. Prova odasında, reverberasyon algısı, ses gücü yüksek olan enstrümanlarda artarken ($p=0,006$, *two-sided Fisher exact test*), stüdyo odasında reverberasyon süresi bütün enstrümanlar tarafından düşük algılandığı için enstrüman gücü farklılığı bir ayrım yaratmamıştır. Stüdyo odasında, hacim ses gücü düşük enstrümanlarda doğal algılanırken, ses gücü yüksek

enstrümanlarda yapay olarak algılanmıştır ($p=0,003$, *two-sided Fisher exact test*). Prova odasında ise hacim her iki ses gücü düzeyinde enstrüman çalan müzisyenler tarafından da yapay olarak algılandığı için enstrüman düzeyi ve doğallık arasında anlamlı bir fark çıkmamıştır ($p=0,15$, *two-sided Fisher exact test*). Prova odasında enstrüman düzeyi ile rezonans algısı arasında güçlü bir etkileşim varken ($p=0,001<$, *two-sided Fisher exact test*), stüdyo odasında rezonans algısının zayıf olması nedeniyle bu hacimde enstrüman düzeyine bağlı bir ayrım çıkmamıştır. Benzer şekilde genel izlenim prova odasında enstrüman ses gücüne bağlı olarak değişirken ($p=0,009$, *two-sided Fisher exact test*), stüdyo odasında genel izlenimde bir ayrım oluşmamıştır.

4.2.2 Nitel analiz sonuçları

Açık uçlu sorularda, odanın nasıl algılandığı ve performansa etkisinin nasıl olduğu sorulmuş, algı ile ilgili önemli bilgiler elde edilmiştir. Bu bölümde, ses kayıt cihazı ile kaydedilen ve açık uçlu sorulardan elde edilen yorumlar manuel olarak kodlanmış, benzer kodlar temalar halinde gruplandırılmıştır (Mariette Bengtsson 2016). Çizelge 4.4'ta stüdyo odasına ait yorumlar, enstrüman bilgisi ve işaretlenen kodlarla birlikte verilmiştir. Çizelge 4.5'te ise bu kodlar gruplanmıştır. Kodların ilgili olduğu grubun belirlenmesinde, Lokki 'nin atıflar ve öznel parametreler ilişkilendirilmesi ile ilgili çalışmalarından yararlanılmıştır (Lokki vd. 2012). Kodlar araştırma sorusuna bağlı olarak iki kategoriye ayrılabilir: Ortam ile ilgili izlenimler ve performansa ilişkin izlenimler.

Stüdyo odasında icra sonrası elde edilen müzisyen yorumları değerlendirildiğinde, enstrüman farkına bağlı olarak izlenimlerin değiştiği, aynı zamanda aynı enstrüman grubunda kişisel tercihlere bağlı olarak farklı yorumların olduğu görülmektedir. Farklı izlenimlere ve değerlendirmelere rağmen yorumların birbiri ve hacim içerisinde oluşan ses alanı ile tutarlı olduğu görülmektedir. Örneğin, Katılımcı 19 (keman) yorumunda kuru ortam ve destek ihtiyacından bahsederken, Katılımcı 12 (piyano) kuru ortam ve geç yansıma ihtiyacından bahsetmektedir. Yorumların ortak yönü olarak yetersiz yansıma düzeyinin olduğu ve buna bağlı performans etkisinden bahsedilebilmektedir. Çizelge 4.6'da prova odasına ait yorumlar, enstrüman bilgisi ve işaretlenen kodlarla birlikte verilmiştir. Çizelge 4.7'de ise bu kodlar gruplanmıştır. Stüdyo odasında rezonansa bağlı akustik kusurlardan bahsedilmezken, prova odasında rezonans algısı nedeniyle oluşan rahatsızlıklar dile getirilmiştir.

Çizelge 4.4 : Stüdyo odasındaki katılımcıların sözel yorumları ve yorumların kodlanması

Katılımcı	Sözel Yorumlar	Enstrüman
K1	Geç yansımalar hızlı pasajlarda zorluyor. Kuru ortam yorucu , yüksek tavan, kuru ortamda hatalar anlaşılıyor. Zamanlamada zorluk yaşadım.	Trompet
K2	Ses çıkarmak için daha fazla enerji harcamak gerekiyor. Tizler kapalı , duvara yaklaştıkça tizler açılıyor . Ses geniş alandan geliyor. Forte’yi yutuyor. Uzak hissiyatı yarattı. Basların yokluğu rahatsız etti. Yansıma ihtiyacı hissettim.	Trombon
K3	Sesler net , fakat orta oktavlarda ses uzamıyor , tizlerde enstrüman var mekan yok. Yankının olmaması iyi.	Fagot
K4	Bas tiz dengesi rahatsız etti baslar birden yok oluyor. Rezonansı eksik , performans açısından iyi değil. Hacim tınlamıyor. Dikkatim çok dağıldı.	Kontrbas
K5	Hacim sesi yükseltmiyor . Oda tepkisi yok, yansımaların yetersizliği destek ihtiyacı hissettirdi. Özellikle arka kısımdan ses gelmedi.	Gitar
K6	Tizler daha iyi, hacim kapalı hissi yarattı.	Kemençe
K7	Renklenme yok. Çalarken baskı altında hissedilmiyor. Geç yansıma ihtiyacı vardı. Enstrüman ile hacim bağlantısı yok. Fazla kuru.	Piyano
K8	Ortamın ses yüksekliği yetersiz, dinamiği ayarlamada zorluk oldu	Piyano
K9	Geri dönüş az. Yansımaların olmaması yapaylık hissi verdi.	Piyano
K10	Geri dönüş olmadığı için yanlış çalma şüphesi yaratıyor. Ses çıplak geldi. Kuru ortam odaklanma sorunu yarattı. Farklı ortam hissiyatı yarattı.	Piyano
K11	Tizler çok açık. Çevreden tepki gelmedi. Enstrümanın netliği rahatsız etti. Odaklanma sorunu yarattı. Yanlış çalma hissi yarattı. Ses çıplak geldi.	Piyano
K12	Sahne performansına göre dinamiği azalttım . Hacim kuru ve tepkisiz. Geç yansıma olmaması rahatsızlık verdi en çok	Piyano
K13	Çıplak. Yorucu	Saksafon
K14	Kuru. Kendi enstrümanımı çok fazla duydum. Hacmi duyamadım. Ayrım vardı.	Saksafon
K15	Kuru. Daha fazla geç yansıma isterdim. Yansımalar fazla yönlüydü.	Klarnet
K16	Kuru ortam rahatsız edici. Karşıdan yansıma alamadım. Artikülasyon yok. Mesafe hissi rahatsız edici. Sesler gömülüyor. Erken yansımalarda dengesizlik vardı. Kuru ortam çalmayı zorlaştırdı. Bas tepkisi yok	Saksafon
K17	Kapalı, dar. Reverberasyon ihtiyacı var. Sadece tek bir yüzeyden yansıma geliyordu.	Klarnet
K18	Kuru olması performansımı etkiledi	Çello
K19	Daha fazla desteğe ihtiyacım vardı. Yetersiz destek nedeniyle ses yüksekliğini ayarlamakta zorlandım. Yansımasız ortama adaptasyonda zorlandım. Kuru ve geç yansıma ihtiyacı vardı.	Keman
K20	Enstrümanın mekanla kaynaşması zayıftı. Kuru hacim.	Flüt
K21	Yanasımlar yetersizdi.	Klarnet
K22	Tizler çiğ duyuldu, çok. Parlak bir hacim değil.	Çello
K23	Destek hissi zayıf	Gitar
K24	Yansıma düzeyi hacim yokmuş gibi hissettirdi.	Korno

Çizelge 4.5 : Kodlanan atıflar ve grup bazında kullanım sıklığı (n%)

Gruplar	Terimler	Terim kullanım sıklığı (n)	(n) %
Reverberasyon	kuru (9) çıplak (3) sesin uzamaması	18	29%
Netlik / Belirginlik	geç yansıma (5) net (2)	2	3%
Destek	destek (3)	3	5%
Mekânsal izlenim	hacim yok (3) hacim tınlamıyor tepki yok (2) hacim kapalı geri dönüş az (2) yetersiz yansıma (2) enstrüman ve hacim ayrı (3)	14	22%
Sarmalanma	yönlü yansıma (3) erken yansımalarda yöne bağlı dengesizlik	4	6%
Ses yüksekliği	hacim sesi yükseltmiyor ses yüksekliği yetersiz forteyi yutuyor sesler gömülüyor	4	6%
Bozukluk (Distortion)	baskı yok yankı yok renklenme yok	3	5%
Yakınlık	geniş alan uzaklık hissiyatı mesafe hissi dar	4	6%
Doğallık	yapay farklı ortam hissi	2	3%
Baslılık	basların yokluğu baslar birden yok olması bas-tiz dengesi rezonans eksik Bas tepkisi yok	5	8%
Parlaklık	tizler çok açık tizler kapalı parlak değil tizler çığ (shimmering)	4	6%
TOPLAM		63	100%

Çizelge 4.6 : Prova odasındaki katılımcıların sözel yorumları ve yorumların kodlanması

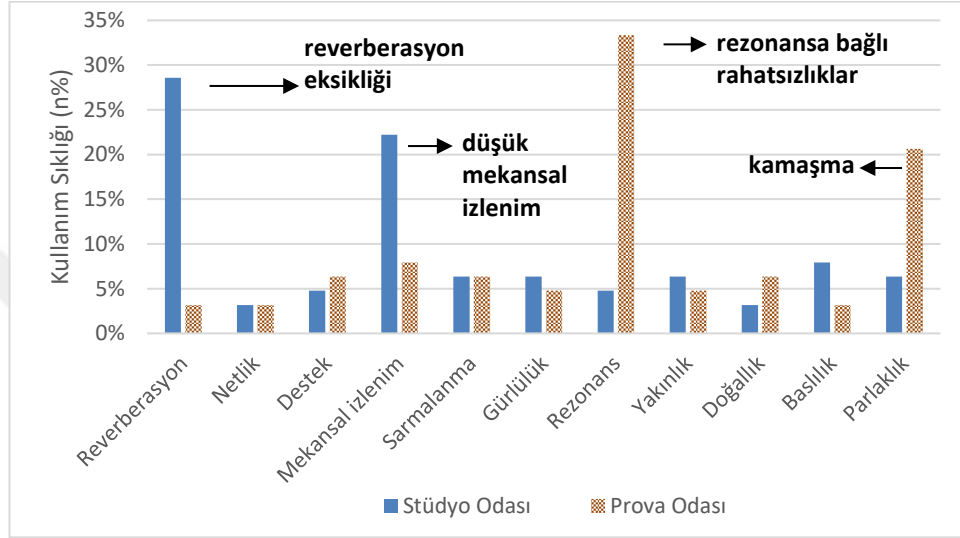
Katılımcı	Sözel Yorumlar	Enstrüman
K1	Baslara indikçe kapalı bir ton geliyor. Enstrüman gereği hacim tiz bir tını var. Kontrollü çaldım, sesler dönüyor. Geç yansımalar rahatsız etti	Trompet
K2	Sol notası odayı titreştiriyor. Güçlü yansımalar olumlu benim için. Trombon sesine yakın bir oda tınısı aldım.	Trombon
K3	Baslar yoğun yuvarlanıyor. Tizler çok keskin. Basın yoğun olması destekledi fakat tizlerin keskin olması rahatsız etti. Genel olarak bas-tiz dengesi rahatsız etti. Seslerin birbirine karışması odaklanma sorunu yaşattı. Pasajları kısa bıraktım. Tınısının parlak olması yapay hissettirdi.	Fagot
K4	Bazı tonlar tınlamıyor. Tizler çok rahatsız etti. Bazı sesler dışarı gidiyor gibi geldi. Enstrümana hâkim olamadım.	Kontrbas
K5	Yansımaların fazla olması daha keyifli. 220 Hz civarı ses dışarıdan geliyormuş gibi. Tempoyu değiştirdim. Yansımalar performansımı destekledi. Keyifliydi.	Gitar
K6	Tizler belirgin, baslar bulanık, yansımalar performansımı olumlu etkiledi.	Kemençe
K7	Çok hızlı pasajlarda zorlanılıyor. Baslar çok fazla, yapaylık hissi verdi.	Piyano
K8	Sol pedalı çok kullandım. Gürleme var. Bas kontrolü zordu. Hacim sarıyor. Tizler parlak. Reverberasyon çamur hissi verdi.	Piyano
K9	98 Hz rezonans var. Performansımı olumsuz etkiledi. Duvarın yakınlığı rahatsızlık verdi, ses yapışıyordu. Enstrüman bu odaya büyük geldi. Pedal kullanırken ne kadar kullanmam gerektiğini kestiremedim.	Piyano
K10	Tizler çok yüksek ve parlak, dinamik farklılıklarda zorlandım. Renklenme var. Güçlü yansımalar rahatsız etti.	Piyano
K11	Renklenme algıladım. Hızlı pasajlarda zorlandım. Güçlü yansımalar odaklanma sorunu yarattı. Özellikle yan duvarın yakınlığı rahatsızlık verdi. KontROLSÜZ reverberasyon vardı.	Piyano
K12	Tonlar bulanıktı. Hızlı pasajlarda özellikle sesler karışıyor.	Piyano
K13	Hacim küçük geldi. Kutu içinde gibi hissediyorum. Rezonanslar rahatsızlık verdi. Ses yüksekliği ve erken yansımalar rahatsız etti.	Saksafon
K14	Hacmin akordu bozukmuş gibi geldi. Tizler fazla parlak	Saksafon
K15	Bazı frekanslar daha kulağa geliyor, geri dönüşlerde düzensizlik var. Performansta odaklanma sorunu yarattı. Staccato bile uzadı.	Klarnet
K16	Dikkat dağıtıcı, uzun adaptasyon süresi var. Performansta dinamik değişkenlik arttı oda tepkisi olduğu için. Netliğin olmaması olumsuz. Sarmalanma olumlu	Saksafon
K17	Forte çalarken zorlandığım için dinamiği düşürdüm. Tizler çok parladı. Tiz karakteri baskın. Renklenme vardı.	Klarnet
K18	Canlı olmasını sevdim	Çello
K19	Homojen bir ses alanı ve sesin her yerden gelmesi güzel. Fakat netlik sorunu vardı	Keman
K20	Destegin fazla olması daha iyi çalmamı sağladı	Flüt
K21	Tizler çok çınladı. Karşı duvardan çok sert yansıma aldım.	Klarnet
K22	Yansıma düzeyi ve performansı desteklemesi iyiydi.	Çello
K23	Belirli tonlar algılanıyor	Gitar
K24	Tizler patladı. Hacim çok yapay geldi.	Korno

Çizelge 4.7 : Kodlanan atıflar ve grup bazında kullanım sıklığı (n%)

Gruplar	Terimler	Terim kullanım sıklığı (n)	(n) %
Reverberasyon	canlı Staccato bile uzadı	2	3%
Netlik / Belirginlik	netlik yok tizler belirgin	2	3%
Destek	destek	4	6%
Uzamsal Algı	güçlü yansıma (olumlu) güçlü yansıma (olumsuz) (2) oda tepkisi var (2)	5	8%
Sarmalanma	sarmalanma sesin her yerden gelmesi homojen ses alanı sert yansıma karşıdan	4	6%
Ses Güçlülüğü	enstrüman odaya büyük hacim küçük geldi ses yüksekliği fazla	3	5%
Rezonansa bağlı bozukluk (Distortion)	kapalı bas tonu basların yuvarlanması (bulanık) seslerin birbirine karışması (bulanık) (2) bazı tonlar tınlamıyor bazı sesler dışarı gidiyor gibi geldi (2) baslar bulanık (bulanık) Çamur reverberasyon (bulanık) rezonans algısı (resonance) (2) renklenme (3) belli bir ton odayı titreştiriyor kutu içinde gibi hissettim (renklenme-box feeling) tonlar bulanık (bulanık) bazı tonlar daha algılanıyor (2) akordu bozuk hacim gürleme vardı (rezonans)	21	33%
Yakınlık	yakınlık rahatsızlık verdi sesin yapışması duvarın yakınlığı rahatsızlık	3	5%
Doğallık	yapay (3) enstrümana yakın bir tını	4	6%
Baslılık	yoğun bas (2) bassiness	2	3%
Parlaklık	keskin tizler (2) Tizlerde rahatsızlık tizler çok parlak (3) tizler patladı parlak tını tiz bir tını (3) tizler baskın tiz bir tını	13	21%
TOPLAM		63	100%

Her iki odaya ait terimlerin kullanım sıklığı sütun grafiği olarak Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekildeki dağılıma bakıldığında enstrüman tipleri farklılaşsa da yorumlar

ses çevresinin etkisine bağlı olarak benzeşmiştir. Stüdyo odasında genel izlenimi en çok etkileyen özelliklerden biri düşük yansıma düzeyinin bir sonucu olarak reverberasyon eksikliği ve uzamsal algı eksikliğidir. Diğer bir yandan prova odasında ise rezonanslara bağlı rahatsızlıklar ve parlama genel izlenimi en çok etkileyen değişkenlerdir. Bu çalışmada alçak frekans ve rezonans etkisine odaklanılsa da sözel yorumlardan anlaşılabacağı üzere yakın yüzeylerden gelen daha yüksek frekanslardaki yansımalar kamaşma yaratmaktadır.



Şekil 4.3 : Kodlanan atıflar ve grup bazında kullanım sıklığı (%)

Aynı zamanda ortamın performansa etkisinin sorulduğu sorulara verilen cevaplar Çizelge 4.8'deki gibidir. Performansa etkisine dair sorulan soruya verilen veriler kodlandığında müzisyenlerin ses çevresinin etkisine bağlı olarak ortama uyum sağladıkları görülmüştür. Bu uyumun bir sonucu olarak tempo, dinamik aralıklarda değişiklik oluşmuştur. Aynı zamanda ortamın etkisiyle performans sırasında odaklanma sorunu, yanlış çalma şüphesi yorgunluk gibi rahatsızlıklar oluşmuştur.

Çizelge 4.8 : Katılımcıların hacmin performans etkisine ilişkin yorumları

Stüdyo Odası	Prova Odası
Zamanlamada zorluk çektim	Kontrollü çalma
Hızlı pasajlarda zorluk çektim	Pasajları kısa bıraktım
Daha fazla enerji harcamam gerekti	Tempoyu değiştirdim
Dikkat dağılıyor	Sol pedalı çok kullandım (2)
Yanlış çalma şüphesi doğdu	Dinamik değişkenlik arttı
Odaklanma sorunu yaşadım	Uzun adaptasyon
Çalarken baskı olmamasını sevdim	Dinamiği azaltma
Ses yüksekliğini ayarlamakta zorlandım	
Bir etkisi olmadı	

4.3 Nesnel Akustik Parametreler ve Öznel Değerlendirme İlişkisi

Hacim akustiği ölçüm sonuçlarından elde edilen verilerin anket sonucu nicel ve nitel analiz yöntemleri ile elde edilen verilerin ilişkisi aşağıdaki gibidir.

- Reverberasyon algısı: Ortalama olarak 0,4 s olan T_{30} değerleri stüdyo odasında her iki enstrüman grubu için ISO 23591:2021’önerilen T_{30} değer aralıkları ölçütlerden düşük çıkmıştır. Öznel izlenimlere bakıldığında ise stüdyo odasında reverberasyon süresi enstrüman ses düzeyinden bağımsız olarak düşük bulunmuş, performansa bağlı rahatsızlık gözlenmiştir. Nitel verilere de bakıldığında düşük reverberasyona bağlı yorumların yoğunlukta olduğu görülmektedir. Diğer bir yandan prova odasında 0,65 s olan T_{30} değerlerinin istenen ölçütleri yüksek sesli enstrümanlar için sağladığı, alçak sesli enstrüman grubu için ise ölçütlere yakın çıktığı görülmüştür. Öznel izlenimlere bakıldığında ise reverberasyon süresi, netlik ile negatif, odaklanma sorunları işe pozitif ilişkili çıkmıştır. Aynı zamanda doğallık ile olan negatif ilişkisi ortam reverberasyon algısının ideal düzeyden yüksek olduğunu ve hacmin yapay olarak algılandığını göstermiştir.
- Netlik: Literatür çalışmalarına göre 8-10 dB aralığınının prova odalarında ideal kabul edildiği görülmektedir (Cabrera 2007). Buna göre netlik indeksi (C_{80}) prova odasında netliğin 500- 1000 Hz aralığı dışında ideal koşulları sağladığı, diğer bir yandan, stüdyo odasında ortalama 10-14 dB olan C_{80} indeksinin ideal düzeyin çok üzerinde olduğu görülmektedir. Öznel izlenimlere bakıldığında stüdyo odasında netliğin ideal durumun üzerinde olması nedeniyle odaklanma sorunu yaratarak performansı olumsuz etkilediği görülmüştür. Prova odasında ise netliğin genel izlenimle negatif ilişkisi netliğin yetersiz olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte C_{20} ve C_{80} değerleri karşılaştırıldığında ilk yansımalarla geç yansımaların oldukça farklı olduğu görülmektedir. İki hacimde ölçülen C_{20} değerlerin ortalamasına bakıldığında farkın fark eşiğinin (3 dB) altında olduğu görülmektedir. İki hacim arasındaki farkın C_{50} ve C_{80} ’de arttığı görülmektedir. Dolayısıyla öznel verilerin C_{50} ve C_{80} parametreleri ile daha tutarlı olduğu görülmektedir.
- Rezonans Algısı: Q-faktör değerinin ortalama olarak stüdyo odasında Q30 değerinin altında olduğu görülürken, prova odasında bu değer Q30 ile Q100

arası değiştiği görülmektedir. Her iki odada da değerlerin Q16 olan rezonans algı eşiğinin üzerinde olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Stüdyo odasında alçak frekanslarda modal düşme sürelerinin eşik değerinin altında olduğu, daha üst frekanslarda ise eşik değerine yakın olduğu görülmektedir. Bununla birlikte prova odasında ise bu değerlerin frekanstan bağımsız olarak eşik eğrisinin çok üzerinde olduğu görülmektedir. Nicel analizlerle karşılaştırıldığında stüdyo odasında rezonans algısının genel izlenimle bir ilişkisi yokken prova odasında görülen yüksek değerlere paralel olarak rezonans algısının genel izlenimle negatif ilişkili olduğu görülmektedir. Nitel verilerde ise rezonansla ilişkili kusurlularının tekrar frekansının yüksek olduğu görülmektedir.

- Ses Yüksekliği: Stüdyo odasında hesaplanan ses yüksekliği düzeyi 13 dB'dir ve icra edilen keman, akustik gitar, kontrbas,  ello, flüt ve klarnet gibi düşük ses gücüne sahip enstrümanların yeterli ses basınç düzeyini sağlayamadığı görülmektedir. Diğer bir yandan, prova odasında grafiğe göre hesaplanan G düzeyi 22 dB'dir. Ses gücü düzeyi düşük enstrümanlar için yeterli ses seviyesi sağlansa da piyano, trombon, trompet, İngiliz kornosu gibi ses gücü yüksek enstrümanlarda ses seviyesi ideal düzeyin çok üzerindedir. Öznel değerlendirmelerle karşılaştırıldığında stüdyo odasında prova odasında korelasyon analizine göre gürlük ile genel izlenim arasında negatif ilişki müzisyenler tarafından algılanan g rl ğ n rahatsızlık yarattığı görülmektedir. Bununla birlikte Fisher olasılık testi ise bu rahatsızlığın özellikle yüksek ses gücü düzeyine sahip enstrümanlar için daha fazla olduğunu göstermektedir.

4.4 Tartışma ve Sonuçlar

Prova odaları, müzik çalışma odaları, kayıt alanları gibi küçük müzik hacimlerinde, alçak frekanslardaki zaman tepkisi ve spektral içeriği, özellikle rezonansların etkisiyle değişebilmektedir. Bu değişimle beraber enstrümanın karakteristik özelliklerine göre de müzisyenlerin hacim algısı ve performansı değişmektedir. Alçak frekanslardaki ses olaylarının müzisyen algısındaki etkisinin öznel olarak değerlendirilmesi amaçlı 24 müzisyenin farklı enstrümanlarla katıldıkları icraya dayalı bir anket çalışması yapılmıştır. Yüz yüze yapılan anket çalışmasının sonuçlar nicel ve nitel veri analiz yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Bununla birlikte hacimlerin nesnel olarak

değerlendirilebilmesi için ölçüm ve benzetim yöntemi kullanılmış, veriler nesnel değerlendirme parametreleri ile değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

Çalışma kapsamında rezonansların etkin olduğu nesnel olarak bilinen prova odası ve rezonansların minimize edildiği stüdyo odası ele alınmıştır. Böylelikle her iki odada elde edilen verilerin karşılaştırılması ile rezonansların müzisyen izlenimindeki etkisi ve parametreler arası ilişkiyi nasıl değiştirdiği araştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, standartta belirtildiği gibi genel izlenimlerde en etkin ve en açıklayıcı parametreler reverberasyon ve gürlüktür. Aynı zamanda ölçüm verileri ile anket yorumları her iki hacim için karşılaştırıldığında sonuçların örtüştüğü görülmektedir. Korelasyon analizindeki ilişki düzeylerine bakıldığında ise parametreler arası kuvvetli ilişki çalışmada tercih edilen parametrelerin uygunluğunu doğrulamıştır.

Anket sonuçları ve ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, geniş bant yutucu sistemlerin etkisiyle ISO 23591:2021 de belirtilen akustik kalite kriterlerine göre istenilen düzeyin altında kalan T_{30} değerine bağlı olarak müzisyen tatmini sağlanamamıştır. Diğer bir yandan $\pm 10\%$ tolerans ile standartta önerilen limit değerler içerisinde kalan prova odasında ise rezonansların etkisiyle reverberasyon süresi ses gücü düzeyi yüksek enstrüman çalan müzisyenler tarafından normalden daha yüksek algılanmıştır. Benzer şekilde rezonans etkisi netlik algısını büyük ölçüde etkilemiş, ses gücü düzeyine bağlı olarak algıyı farklılaştırmıştır. Netlik indeksinde düşme süresinin erken kısmı algıyı daha çok etkilediği için (Kaplanis vd. 2014) C_{20} değerlerinin C_{50} 'ye göre yorumlarla daha çok ilişkili olduğu görülmüştür. Stüdyo odasında ise düşük yansıma düzeyi ve düşük gürlük destek algısının azalmasına neden olmuştur. Diğer bir yandan rezonans algısının destek ile pozitif ilişkisi Halmrast'ın çalışmasında (Halmrast 2000) tartışıldığı gibi rezonansların olumlu bir etkisi olarak görülebilmektedir. İki hacimdeki parametreler arası ilişkiye bakıldığında benzer ilişki katsayıları görülmekle beraber, rezonansların etkin olmasıyla beraber netlik ve rezonans ilişkisinin genel izlenimde etkin olduğu ve önem kazandığı saptanmıştır. Benzer şekilde Wankling'in küçük odalarda yaptığı çalışmalarda genel izlenimi açıklayıcı ana başlıklardan biri "rezonans ve artikülasyon" dur (Wankling vd. 2010).

Algılanan ses alanı akustik bozulmalar tarafından önemli ölçüde etkilenmektedir (Kaplanis vd. 2019). Çalışmanın bulguları da benzer şekilde gösteriyor ki, küçük müzik odalarındaki müzisyenlerin izlenimleri üzerindeki reverberasyon etkisi, düşük frekanslardaki spektral modifikasyonlarla farklılaşmıştır. Spektral içeriğin ve rezonans

etkisinin değerlendirilmesi için ölçüm sonuçları üzerinden elde edilen Q-faktör ve modal düşme süresi parametreleri kullanılmış ve eşik değerleri ile karşılaştırılmıştır. Stüdyo odasında elde edilen modal düşme süresi değerlerine bakıldığında değerlerin eşik eğrisini düşük bir oranla geçtiği görülmüştür ve anket verilerinin Fisher olasılık testi sonuçları, bu hacimde enstrümandan bağımsız olarak rezonans algılanmadığını göstermiştir. Dolayısıyla, reproduksiyon alanları için önerilen bu parametre ve eşik değerinin prova odaları için de kullanılabileceği fakat toleransın icra eylemi için daha yüksek olabileceği öngörülmüştür. Spektral içeriğin farklılaşması ile öznel algının değişmesine bir başka örnek de rezonansların bas içeriğine olan etkisidir. Fakat dinleme testi ile yapılan çalışmalarda rezonansların bas algısını yeterince açıklayamadığı görülmüştür (Kaplanis vd. 2019). Benzer şekilde, bu çalışmada da rezonans algısı ile bas algısı arasında kuvvetli bir ilişki olmadığı ve bas algısının genel izlenimdeki etkisinin düşük olduğu görülmüştür.

Çoğunlukla reproduksiyon alanlarının ses alanı değerlendirilmesinde kullanılan doğallık terimi (Kaplanis vd. 2019), aynı zamanda sahne koşullarında performansın değerlendirilmesine ilişkin tını değişiminin tanımlanmasında kullanılmıştır (Dammerud 2009). Aynı zamanda başka bir çalışmada da müzik uyarımı ile tını ilişkisinin tanımlanmasında kullanılmıştır (Kato vd. 2010). Korelasyon analizi sonuçları, yetersiz ya da fazla olan yansıma düzeyinin, reverberasyonun, güçlülüğün ya da rezonans etkisinin müzisyenin doğallık izlenimini etkilediğini göstermiştir. Bu aynı zamanda tının hacmin sadece tonal karakteri ile ilişkili olmadığını aynı zamanda gürlük ile ilişkili de açıklanabileceğini göstermiştir (Fabiani ve Friberg 2011).

Nicel ve nitel analizler sonucu elde edilen veriler ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Stüdyo odasında düşük EDT süresine bağlı olarak mekânsal izlenimin azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda T₃₀, ISO 23591:2021'de istenen değerlerin çok altındadır ve düşük reverberasyona bağlı olarak genel izlenim olumsuz etkilenmiştir. Aynı zamanda destek hissi azalmış ve performansta odaklanama sorunu yaratmıştır. Diğer bir yandan T₃₀ değerleri göre optimum aralıklarda olan prova odasında reverberasyon süresi yüksek algılanmıştır. Bununla birlikte standart ile tutarlı olarak yüksek ses gücü düzeyine sahip enstrümanlarda rahatsızlık daha fazla çıkmıştır. Dolayısıyla nesnel olarak Güçlülüğün (G) reverberasyona göre anket sonuçları ve standartla daha fazla örtüştüğü görülmektedir.

Enstrüman özelliklerinin ses alanına etkisinin istatistiki olarak değerlendirilebilmesi için enstrümanların karakteristik özelliklerine göre sınıflandırılması gereklidir (Osman 2005). Standartla birlikte enstrümanlar ses gücü üretimine göre sınıflandırılabilir: alçak, yüksek ve güçlendirilmiş. Bu sınıflandırmaya göre, rezonans algısının yüksek ölçüde enstrüman ses gücü düzeyine bağlı olduğu görülmüştür. Bu çalışmada aynı zamanda enstrüman karakteri olarak frekans içeriği de araştırılmış, fakat ton ayırımının (pitch discrimination) hangi değişkenler üzerinden yapılabileceğinin tam olarak belirlenememesi ve buna ilişkin bir kaynak bulunamaması nedeniyle bir sonuca varılamamıştır.

Küçük odaların değerlendirmesi ve iyi bir akustik kalitenin sağlanabilmesi için reverberasyon süresi önemli olsa da yeterli değildir. Sonuçlar, küçük odaların değerlendirilmesinde reverberasyonun kolayca algılanabilen ve açıklanabilen bir ifade olmasına rağmen, genel izlenimde düşük frekanslarda meydana gelen rezonans etkisinin reverberasyon algısını etkilediği belirlenmiştir ve müzisyenlerin genel tercihini belirleyen ana faktörlerden biri olduğunu göstermiştir. Çalışma kapsamına dahil olan iki hacimde de genel izlenim değerlendirmesi orta seviyede çıkmıştır. Bunun nedeni rezonansların çözümü için kullanılan geniş bant yutucular nedeniyle hacimdeki erken yararlı yansımaların azaltılmış olması ve buna bağlı reverberasyon, destek ve uzamsal algının düşmüş olmasıdır. Genel izlenime olan olumsuz etkisinin yanı sıra, çalma eylemi sırasında çalma eylemini etkileyen odaklanma gibi zorluklar yaratmıştır. Diğer bir yandan prova odasında ise güçlü ve kontrolsüz yansımaların yanı sıra rezonansların etkisi ile hacimde algılanan netlik azalmış ve buna bağlı icrada zorluklar oluşmuştur.

5. DALGA BAZLI SONLU ELEMENLAR SİMÜLASYON YÖNTEMİ KULLANILARAK KÜÇÜK HACİMLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TASARIMINA YÖNELİK YAKLAŞIM ÖNERİSİ

Bu bölümde COMSOL benzetim programı kullanılarak, enstrümana ilişkin kaynak özellikleri ve ortamın yüzey özelliklerinin değişimi parametrik bir şekilde analiz edilmiş, belirlenen ölçütler üzerinden ses alanının idealize edilmesine yönelik tasarım yaklaşımı geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda tasarım yaklaşımı için hedeflenen ses alanı dağınıklık kurgusu test edilmiş, varyasyonların ses alanına etkisi üzerinden etkin tasarım yaklaşımı belirlenmiş ve kullanılacak parametrelere ilişkin değerlendirmelerde bulunulmuştur. Küçük hacimlerde ses alanının hesaplanması, nesnel parametrelerin tahmini için kullanılan dalga akustiği yöntemi ve diğer yöntemlerden farkı literatür çalışmaları bölümünde detaylı bir şekilde sunulmuştur. Küçük hacimlerin etkin akustik tasarımına ilişkin geliştirilen yaklaşımın amaçları ve benzetim çalışmasının diğer çalışmalar ile ilişkisi aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçlarının karşılaştırılması ile yöntemin kesinliğine dair bilgilerin elde edilmesi ve yönteminin uygulanabilirliğine ilişkin avantajların ve dezavantajların sunulması
- Anket çalışması sonuçlarından elde edilen verilerin oda modları ile ilişkisinin açıklanmasında odaların modal analizlerinin yapılması
- Parametrik analiz çalışması ile oluşturulan varyasyonlar üzerinden küçük hacimlerde kaynak ve yüzey koşulları özelliklerine bağlı olarak tasarım değişkenlerinin ses alanına etkisinin irdelenmesi
- Hacim akustiği tasarımında, modal analizlere göre sorunlu frekansların belirlenmesi
- Tasarımda rezonansların algılanabilirliğinin akustik ölçüt olarak kullanılması ve odanın spektral içeriğinin tasarım aşamasında değerlendirilmesi

5.1 Metodoloji ve Kapsam

5.1.1 Analizlerde kullanılan nesnel değerlendirme parametreleri ve ölçütler

Çalışmada, dalga bazlı benzetim yöntemi kullanılarak hacim tasarımının değerlendirilmesine yönelik bir yaklaşım önerisi geliştirilmiştir. Yaklaşımına ait akış şeması Şekil 5.1’de verilmiştir. Yaklaşımında kullanılan parametreler ve ilişkili analiz yöntemi aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- TS EN ISO 3382-1:2010’de tanımlanan odanın sinyal tepkisine bağlı EDT, T_{30} , T_{60} akustik parametreleri
- Azalım parametrelerin alıcı noktaları arasındaki standart sapma değerleri ile ses alanı dağınıklığının analizi
- Frekans tepkisindeki düzlük ve değerlerin hacim bazında uzamsal dağılımı ile dağılımın analizi
- Rezonansların algılanabilirliğine ilişkin frekans tepkesinden elde edilen kalite faktörü (Q-faktör) ve modal düşme süresi parametreleri
- Yansımaların algılanabilirliğine ilişkin renklenme kontrolü

Prova odalarının tasarımına ilişkin yeni yayınlanan standart ISO 23591:2021 (International Standard Organization 2021:23591) ile hacim fonksiyonuna ve enstrüman ses gücüne göre hacimde elde edilmesi gereken reverberasyon süresi ve tolerans limitleri 1/1 oktav bantta verilmiştir. Aynı zamanda ilgili standartta küçük hacimlerde rezonansların en aza indirgenmesi için hacim boyut ve oranları ile ilgili optimum değer aralıkları verilmiştir. Bu aralıklarda tasarlanan hacimlerde modların ayrışmadan ya da çakışmadan düzgün aralıkta dağılımı sağlanabilmekte ve böylelikle mod algılanabilirliği azalabilmektedir. Dolayısıyla küçük hacimlerin tasarımının ilk aşamasında uygun boyut ve oranların belirlenmesi yer almaktadır. Modal analizler vasıtasıyla oda karakterinin belirlenmesi sorunlu frekansların ortaya konması açısından önemlidir. Geometrinin yeterince iyi olması için optimum mod aralıklarının ve frekans tepkisindeki minimum sapmanın sağlanması gerekmektedir. Düzgün dörtgensel geometrilerde, oranların uygulanması ve kontrolü kolaylıkla sağlansa da düzensiz geometrilerde oranın sağlanması ve kontrolü nispeten daha zordur ve ancak benzetim yöntemi ile yapılan modal analiz ile istenen verilere ulaşılabilmektedir.

Dalga bazlı FEM yöntemi ile benzetim ortamında zaman tanım alanında analiz (TDFEM) ile elde edilen sinyal tepkisi çeşitli araçlar ile enerji-zaman eğrisine çevrilebilmekte ve böylelikle EDT, T₃₀, T₆₀, gibi azalım zamanı parametreleri elde edilebilmektedir. Sesin azalım süresine bağlı bu parametrelerin optimum aralıklar içerisinde olması, daha önceki bölümlerde tartışıldığı üzere yeterli akustik kaliteyi sağlamayabilmektedir. Bu nedenle Q-faktör, modal düşme süresi gibi frekans tepkisinin değerlendirildiği indirekt azalıma bağlı analizler ile rezonansların kontrolü sağlanarak, buna yönelik sistem tasarımı yaklaşımda önerilmiştir.

Rezonansların eliminasyonu ses alanında dağınıklığı ve homojen ses dağılımını beraberinde getirmektedir. Bu nedenle rezonansların algılanabilirliğinin ve döngüsel yansımaların mod enerjisinin azaltılması amacıyla ses yutucuların kullanılması gerekmektedir. Fakat ses yutucu sistemlerin özellikle geniş bantta uygulanması durumunda yetersiz ses yüksekliği, düşük uzamsal izlenim, tını değişimi gibi çeşitli akustik kusurlar oluşabilmektedir.

Ses alanı dağınıklığının değerlendirilebilmesi için çeşitli istatistiksel yöntemler uygulanabilmektedir. Bu yöntemler literatür çalışmaları kısmında detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bu yaklaşımda, erken düşme süresi (EDT), reverberasyon (T₃₀, T₆₀) gibi parametrelerdeki standart sapmaya ek olarak frekans tepkisindeki varyasyonun ve alıcı noktalar arasındaki varyasyonun analizi, ses alanındaki dağınıklığın bir kontrolü olarak önerilmiştir. Ses alanının dağınıklığının hesaplanması ve değerlendirilmesine yönelik pek çok çalışma genel olarak odanın sinyal tepkisinin zaman karakterine yönelik değerlendirmelerdir. Yaklaşımda kullanılan yöntemde ise odanın frekans tepkisi ve spektral içeriği, istatistiksel olarak frekans tepkisi ve uzamsal dağılımının değerlendirildiği MSV (Mean Spatial Variance) ve VSA (Variance of Spatial Mean) ölçütleri (Wolti ve Devantier 2006) ile ele alınmıştır. Ölçütlerin açılımı aşağıdaki gibidir.

$$MSV = Ort(var_s(R(s,f))), dB \quad (5.1)$$

$$VSA = Var(ort_s(R(s,f))), dB \quad (5.2)$$

$$R = L_{p,ref} - L_{p,s} \quad (5.3)$$

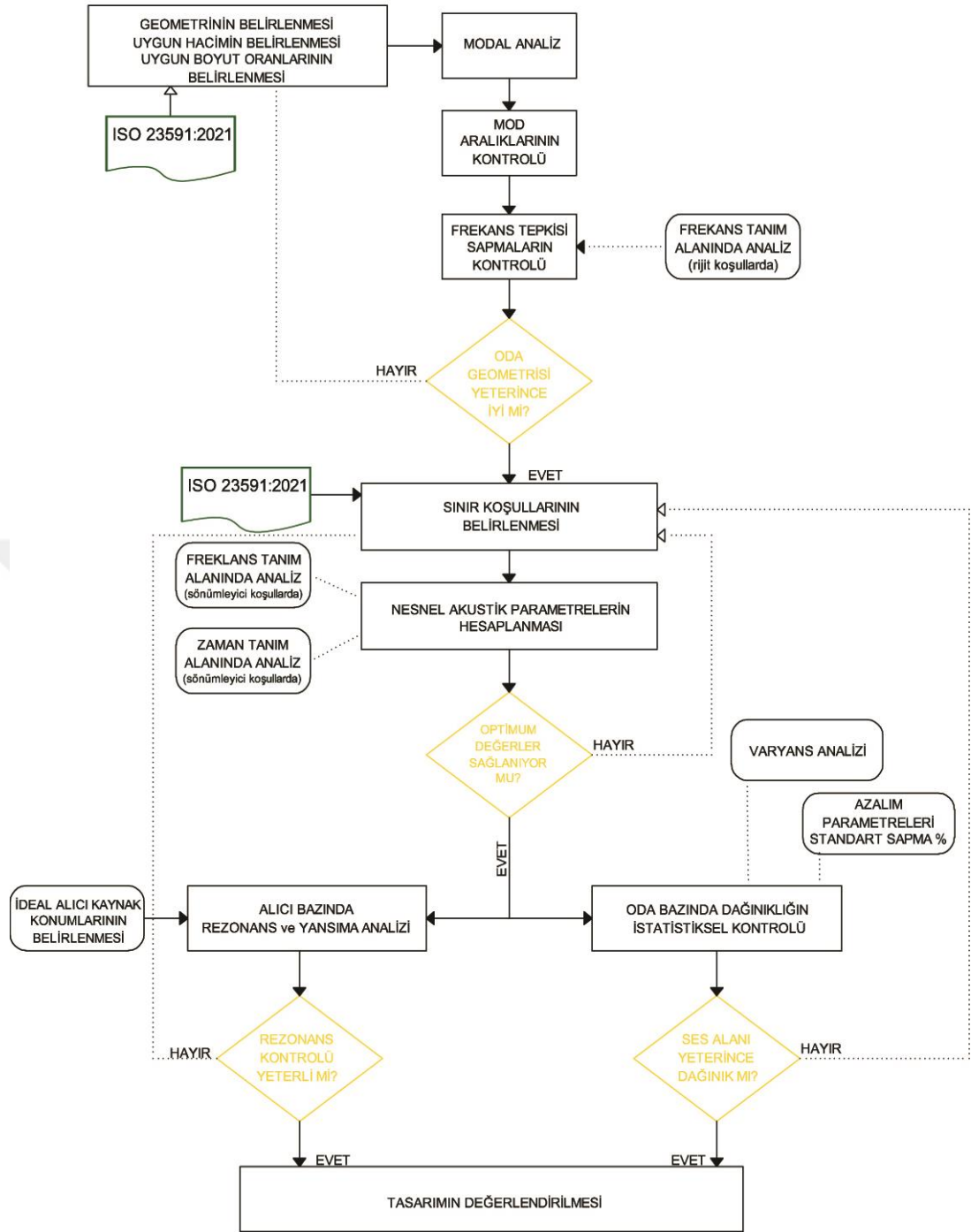
$L_{p,s}$: s alıcı noktasındaki ses basınç düzeyi (dB)

$L_{p,ref}$: En iyi uyum eğrisi değeri (best fit line)

R (residual): En küçük kareler yönteminden (least square method) elde edilen en iyi uyum eğrisi (best fit line) sapma miktarı

Ölçütlerin hesaplanması ile frekans bazında ve alıcı konumu bazında sapmalar elde edilmektedir. Buna göre sapmanın fazla olması dağınıklık azalımı ile ilişkilendirilmektedir.

Tasarım yaklaşımı akış şemasına bakıldığında ISO 23591:2021'de (International Standard Organization 2021) belirtilen boyut oranlarına göre hacmin boyutlandırılması önceliklidir. Sonrasında modal analiz ile modların Bonello kriterlerine (Bonello 1981) uygun olarak çakışmadan ve her bir oktav bantta bir öncekinden daha fazla olacak şekilde yerleşmesi beklenir. Herhangi bir çakışma, toplanma olması durumunda boyut oranları yeniden değerlendirilmelidir. Modal analiz ile beraber rijit sınır koşullarında yapılan frekans tepkisi analizi (frekans tanım alanında analiz, FDFEM) ile odanın alıcı noktalarındaki spektral içeriği, kaynak noktası konumuna bağlı olarak değişen ses basınç düzeyi dağılımı ve oda karakteri elde edilmektedir. Bu spektral içerik alıcı noktalarında farklılaşsa (azalıp, artabilir) da mod deseni olarak bezerdir ve odanın mod karakterini ortaya koymaktadır. Böylelikle en çok hangi frekanslarda sorun olduğu, hangi yüzeyler arası mod yoğunluğunun arttığı gibi bilgiler elde edilmektedir. Aynı zamanda modal dağılım ile oda frekans tepkisi örtüştürülerek zirve ve çökmelerin bağlı olduğu durumlar tespit edilebilir. Hacim ve boyut oranlarının belirlenmesi ile beraber yüzey tasarımı aşamasında reverberasyon süresine uygun olarak yutucu, yansıtıcı ya da saçıcı yüzey kararları alınır. Bu aşamada sadece yerleşime ve yutucu sistemin yüzey alanına (Sabine, m²) karar verilerek sınır koşulları belirlenmektedir. Sınır koşullarının belirlenmesi aşamasında yüzey özelliklerinin akustik karakteri tanımlanarak frekans tanım alanında analiz ve zaman tanım alanında analiz yapılır. Elde edilen veriler standartta belirtilen optimum T₃₀ değerler ile karşılaştırılır. Bu çalışmada T₃₀ parametresine ek olarak rezonansların ve ses alanının dağınıklığının değerlendirilmesi önerilmiştir. Böylelikle tasarım ve değerlendirme yaklaşımında sadece zaman tepkisi değil, spektral içerik bilgisi ve rezonans algısı da dahil edilmiştir. Elde edilen değerlerin istatistiksel kontrolü ile hacim bazında tüm alıcı noktaları dahil edilerek bir değerlendirme yapılırken, alıcı bazında kontrol ile ses alanında farklılaşan tepkilerin yansıma algısının zaman ilişkisi ve modların algı ile ilişkisi tespit edilir.



Şekil 5.1 : Küçük hacimlerin değerlendirilmesi ve tasarımına yönelik önerilen modelin akış şeması

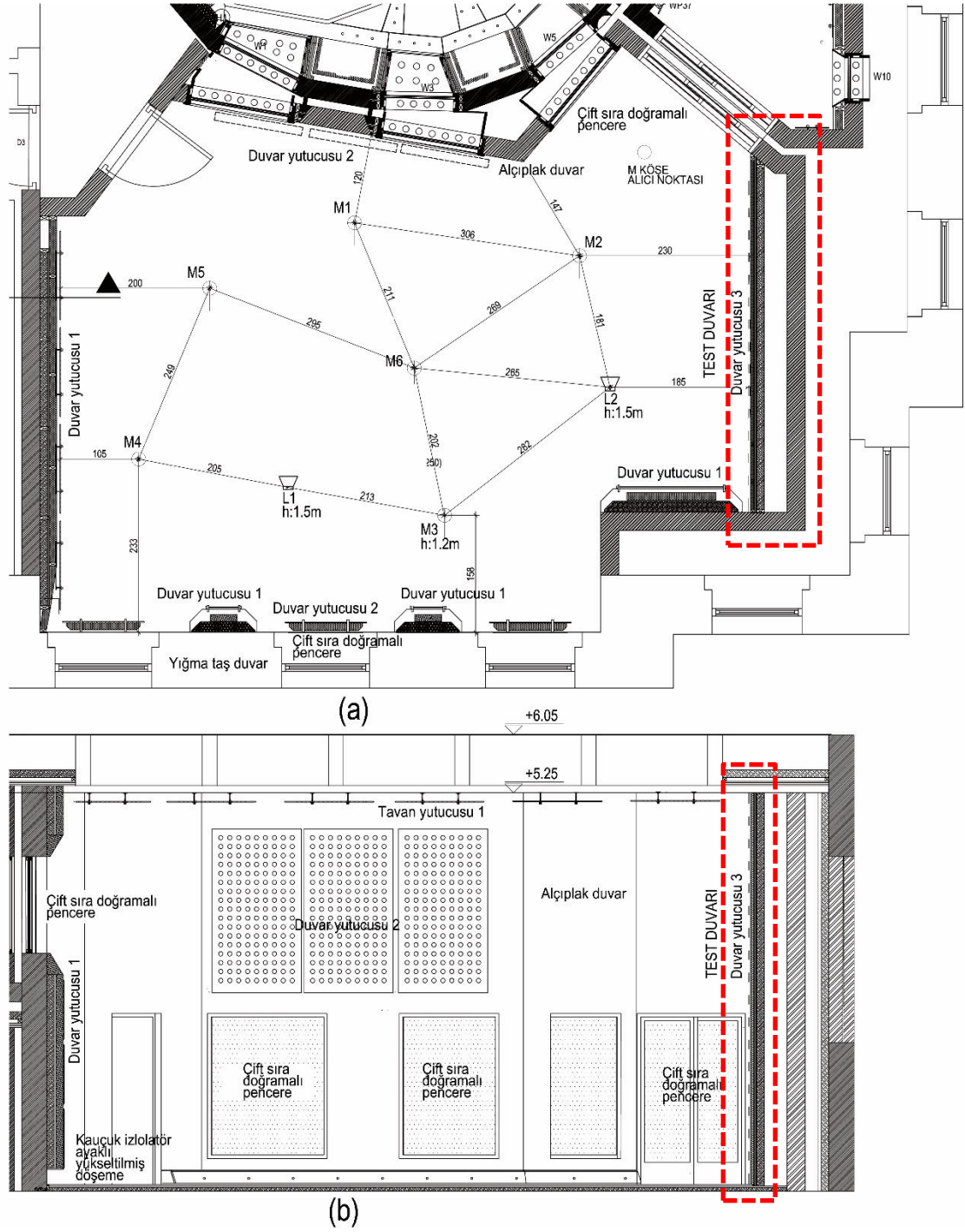
5.1.2 Kapsam

Çalışma kapsamında, anket ve ölçüm çalışmaları İTÜ Maçka Yerleşkesi Yabancı Diller Yüksek Okulu'nda yer alan Dr. Erol Üçer Müzik İleri Araştırmalar Merkezi'nde (MIAM) prova odası ve kayıt stüdyosunun canlı odası kullanılarak yürütülmüştür. İki odanın alçak frekans ses alanı modal analizler ile irdelenerek anket çalışmasından elde

edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Sonrasında kayıt stüdyosunun kayıt alanı referans hacim kabul edilerek enstrüman kabuk ilişkisini irdelemek üzere yapılan parametrik analiz çalışmasında kaynak ve yüzey özelliklerinin farklılaştığı sanal varyasyonlar oluşturulmuştur. Tasarım ortamındaki hacim ve boyut esnekliğinin yanı sıra düzensiz geometriye sahip olması ve kayıt amacına yönelik kontrollü bir ses alanına sahip olması nedeniyle yaklaşımın uygulanması aşamasında stüdyo odası seçilmiştir.

Şekil 5.2’de stüdyo odasına ait plan ve kesit çalışması bulunmaktadır. Yığma bir yapıda Myer alan stüdyo, ses yalıtımı amaçlı kısmen kutu içinde kutu prensibine uygun olarak tasarlanmıştır. Alanı 57 m², hacmi 296 m³’tür. Yapısal olarak plan ve kesit düzleminde kısmen dış kabuktan ayrılan iç kabuk, mod ve eko yollarının kırılması amacıyla düzensiz bir plan şemasına sahiptir. Kayıt odasına komşu olarak 1 kontrol odası, 1 hol (sound lock) ve izole kayıtlar için 2 kabin (iso-booth) bulunmaktadır. Kayıt alanı, kontrol odası ve kabinler arasında görsel iletişim için çift sıra doğramalı pencere sistemleri kullanılmıştır. Reverberasyon ve rezonans kontrolü yatay düzlemde farklı katmanlaşma detayına sahip yutucu sistemler ile sağlanmıştır. Ahşap zemin kaplaması kauçuk izolatör ayaklar ile betonarme döşemeden ayrılmıştır. Tavanda bulunan yutucu sistemler duvarda kullanılan yutucu sistemlere benzer katmanlaşmada tasarlanmış, kaset kirişli betonarme döşeme sistemine asılarak boşluklu bir şekilde uygulanmıştır. Üst döşeme sisteminde kaset kiriş boşlukları kapatılmamıştır. Yalıtım açısından yanal iletim yolu oluşturmakla beraber, üst kısımda çatı boşluğunun tampon bölge oluşturması ve hacim akustiği açısından avantaj sağlaması nedeniyle bu tercihin yapılmış olduğu bilinmekte ve analizler kısmında detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Yutucu sistemlerin detayları sınır koşullarının tanımlandığı bölümde detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Cephede de üst döşemeye benzer şekilde iç kabuk uygulanmamış benzer şekilde yanal iletim yolu oluştuğu bilinmektedir. Odan boyutlarını küçültmemek, yığma sistemin kütlesinin yüksek olması ve bu sayede yalıtımının iyi olması nedeniyle bu tercihin yapıldığı düşünülmektedir.

Parametrik analiz çalışmasında mevcut odanın ses alanı referans olarak kabul edilmiş, farklı yüzey formuna sahip sanal varyasyonları yaratılmıştır. Yüzey ölçeğinde oluşturulan varyasyonlar içilen seçilen duvar Şekil 5.2’de ‘Test duvarı’ olarak tanımlanmıştır. Mevcut durumda tamamı yutucu olan bu duvarın plan düzleminde karşı duvar ile paralel olduğu görülmektedir. Olası mod kusurları nedeniyle bu duvar elemanı üzerinden analizler yürütülmüştür.



Şekil 5.2 : Stüdyo odasının a) plan ve b) kesiti

Anket ve ölçüm çalışmalarının yürütüldüğü diğer oda ise prova amaçlı kullanılan bir çalışma odasıdır. Alanı 29 m^2 , hacmi 103 m^3 'tür. Plan şeması ölçüm ile ilgili bölümde sunulmuştur. Bu odanın müzik amaçlı tasarlanmadığı, bu nedenle akustik düzenlemeye sahip olmadığı, bununla birlikte prova ve çalışma amaçlı kullanıldığı bilinmektedir. Plan şemasına bakıldığında kareye benzer bir geometriye sahiptir. Komşu odalardan tek gövdeli alçıplak duvar sistemi ile ayrılmaktadır. Zeminde vinil

kaplı yükseltilmiş döşeme, tavanda ise arkası boşluklu olarak uygulanmış taş yünü plakalar bulunmaktadır. Döşeme sistemi ise diğer odayla benzer şekilde kaset kirişli betonarme döşemedir. Modal analizlerde rijit kabuk göz önünde bulundurulduğundan, tavan düzlemi benzetim ortamında geometrik olarak kaset boşluklarıyla modellenmiştir.

5.1.3 Parametrik analiz çalışması

Bir parametre, sistemi veya çalışma koşullarını tanımlayan bir kümeden birini oluşturan sayısal veya ölçülebilir bir faktör olarak tanımlanır. Parametreler, bir sistemi tanımlamak veya bir sistemin performansını, durumunu veya koşulunu değerlendirmek için yararlı veya kritik olan bir sistemin öğeleridir. Parametrik analiz, farklı geometrik veya fiziksel parametrelerin veya her ikisinin sorunun çözümü üzerindeki etkisinin incelenmesidir. Bu çalışmada, enstrüman karakteristiğinin belirgin özellikleri olan ses gücü ve yayım karakteri, kabuk özelliği olarak ise yüzey form ve empedans değişkenleri matematiksel olarak tanımlanmış, kontrollü bir şekilde oluşturulan varyasyonlar ile ses alanı üzerindeki etkileri belirlenen ölçütler üzerinden değerlendirilmiştir. Analiz çalışmasında karşılaştırılan ortamların özellikleri ve tanımlanan değişkenler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çalışma 1’de mevcut oda geometrisinin oda boyut oranları ve hacmi sabit tutularak düzgün, dörtgensel geometriye sahip bir varyasyonu oluşturulmuştur. Hacim geometrisinin ses alanına etkisi modal analizler vasıtası ile irdelenmiştir. Modal analizler ile beraber ses basınç dağılımı irdelenerek oda geometrisinin hangi frekans aralıklarında etkili olduğu ortaya konmuştur.

Çalışma 2, alıcı kaynak konumunun karın ya da düğüm noktasında bulunmasına bağlı olarak değişen oda tepkisinin analizi üzerinedir. Küçük hacimlerde dağınıklığın düşük olması nedeniyle konuma bağlı oda tepkisi oldukça değişkendir. Kaynak noktaları sabit tutularak, karın ve düğüm oluşan frekans tepkisi sapmaları, modlar nedeniyle oluşan ses basıncı dağılımı ile ilişkilendirilerek analiz edilmiştir.

Çalışma 3, kaynağın yayım karakterinin ses alanına etkisinin irdelenmesi amacıyla yapılmıştır. Monopol ve dipol yayım olmak üzere iki tip kaynak kullanılmıştır. Monopol kaynak her yöne eşit yayım yapan küresel bir kaynaktır. Dipol ise iki monopol kaynağın ters fazla çalışması ile oluşan kaynak tipidir. Kaynak yayımının rezonanslarla ilişkisi ve odanın frekans cevabına etkisi analiz edilmiştir.

Çalışma 4, kaynak ses gücü değişiminin ses alanına etkisinin irdelenmesi amacıyla yapılmıştır. ISO 23591:2021’de prova odalarının tasarımına ilişkin belirtilen ölçütler enstrüman ses gücü ile ilişkilidir. Standartta orkestra enstrümanları alçak ve yüksek olmak üzere iki düzeyde kategorize edilmiştir. Buna bağlı olarak ses gücü düzeyi 0.05 Vat (P rms referans ses gücü, Vat) ve 0.5 Vat olarak monopol yayıma sahip iki farklı ses gücü tanımlanmış, frekans tepkisi analiz edilerek değerlendirilmiştir.

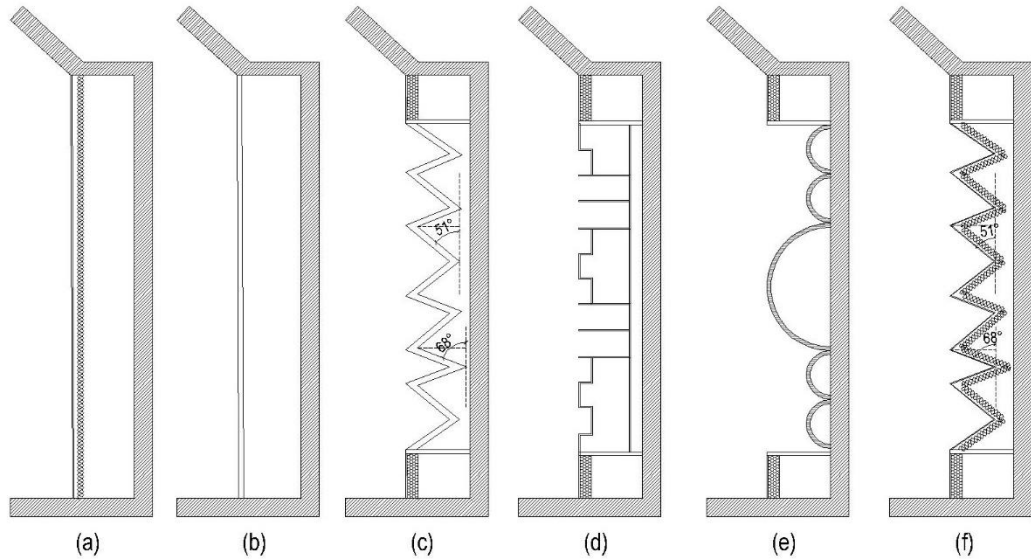
Çalışma 5’te, mevcut durumda oda sönümlenmesini sağlayan akustik düzenlemenin oluşturduğu ses alanı ile sönümlenmenin olmadığı bir ses alanı ile karşılaştırılmış, uygulanan sistemlerin frekans tepkisi üzerindeki etkisinin uzamsal dağılımı olan MSV ve VSA ölçütleri ile irdelenmiştir. Bununla birlikte alıcı bazlı analizleri ise rezonans algı ile ilişkilendirilerek değerlendirilmiştir. Ses alanının zamana bağlı değişimi, uzamsal ses basıncı dağılımı açısından irdelenmiş, odanın sinyal tepkisinden elde edilen nesnel akustik parametreler, ISO 23591:2021’de verilen ölçütler ile karşılaştırılmıştır.

Çalışma 6’da form ve yüzey yansıtıcılığı değişen 5 farklı yüzey tipi ile oluşturulan sanal varyasyonlar mevcut durumdaki yutucu yüzey ile karşılaştırılmıştır. Önerilen varyasyonlarda farklı form ve empedans değerleri kabul edilmiştir. Mevcut durumda hacimde test duvarı olarak kabul edilen yüzeyde yutucu yüzey kullanılmıştır. Dolayısıyla ilk varyasyon yutucu yüzeydir. Diğer saçıcı tiplerinin oluşturulduğu varyasyonlarda ise yüzey tasarımı ses sönümü olmayacak şekilde ayarlanmış, sadece form değiştirilmiştir. Araştırılan formlar kama tip, QRD ve yarı silindiriktir. Son olarak dar bant yutucu sistem ile kama formu birleştirilerek hibrit yüzey oluşturulmuştur. Varyasyonlarda oluşan ses alanları zamana bağlı değişim açısından irdelenmiş, elde edilen değerler ISO 23591:2021’de belirtilen ölçütlerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Sonrasında mod kontrolü ile ilişkili olarak nesnel akustik parametrelerinin uzamsal sapma, frekans tepkisindeki varyans ve frekans tepkisinin alıcı bazında uzamsal varyans değerlendirilmesi ile karşılaştırılan yüzey tiplerinin ses alanı dağınıklığı üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Aynı zamanda yaklaşımda hacim analizlerinin uzamsal olarak ve alıcı bazında yapılması önerilmiştir. Bu nedenle seçilen bir alıcı noktasında (M6) yüzey form ve yansıtıcılığının rezonans algısı ile ilişkisi Q-faktör ve modal düşme süresi irdelenmiş, çeşitli saçıcı sistemlerin rezonans kontrolü açısından avantajları ve dezavantajları sunulmuştur.

Çizelge 5.1 : Yüzey ve kaynak özelliklerine bağlı parametrik analiz çalışması ve COMSOL benzetiminde tanımlanan değişkenler

Analiz Edilen İlişki	Çalışma	Oda Geometrisi		Yüzey Faktörü		Kaynak-Alıcı Faktörü		
		Plan şeması		Yutucu Yutuculuğu		Kaynak Yayımı	Kaynak Gücü	Alıcı Konumu
		Düzensiz/düzgün		(ab: 0.5 / 0)		Düz (yutucu-yansıtıcı) / kama / QRD / yarı silindirik / hibrit	Monopol/dipol	Düşük 0,05 Vat / Yüksek 0,5 Vat
Geometrinin ses alanına etkisi	1	a	Düzensiz geometri			-	-	-
		b	Dörtgensel geometri	(ab: 0) rijit koşullar				
Kaynak ve alıcı konumunun ses alanına etkisi	2	a	Düzensiz geometri	(ab: 0.5) (mevcut durum)		Düz	Monopol	0,05 Vat
		b						M6 (düğüm)
Kaynak yayımının ses alanına etkisi	3	a	Düzensiz geometri	(ab: 0.5) (mevcut durum)		Düz	Monopol	0,05 Vat
		b					Dipol	L 1
Ses gücü düzeyinin ses alanına etkisi	4	a	Düzensiz geometri	(ab: 0.5) (mevcut durum)		Düz	Monopol	0,05 Vat
		b						0,5 Vat
Ses yutucu sistemlerin ses alanına etkisi (katkısı)	5	a	Düzensiz geometri	(ab: 0.5) (mevcut durum)		Düz	Monopol	0,05 Vat
		b		Sönüm yok				L 1
Yüzey formunun ve empedansının ses alanına etkisi	6	a	Düzensiz geometri	(ab: 0.5) (mevcut durum)		Düz	Monopol	0,05 Vat
		b		(ab: 0)		Düz		L 1
		c		(ab: 0)		Kama		Uzamsal ortalama, M6
		d		(ab: 0)		QRD (Schroeder tip saçıcı)		
		e		(ab: 0)		Yarı silindirik		
		f		(ab: dar bant yutucu)		Hibrit (kama + yutucu)		

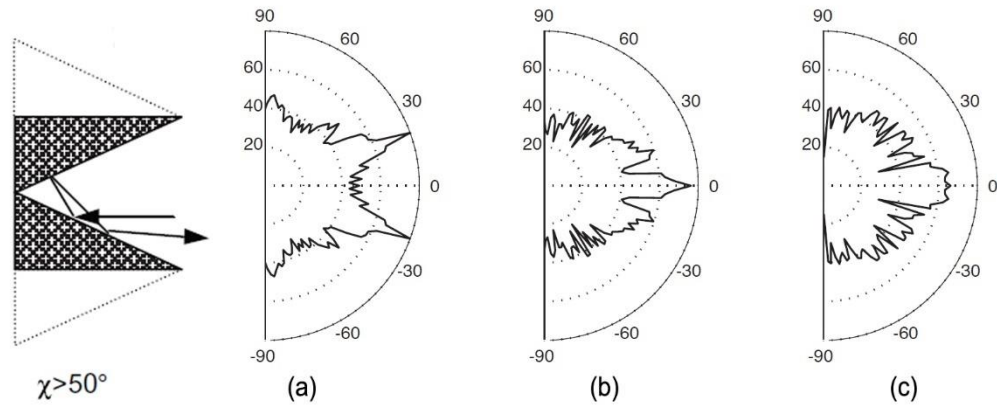
Çalışmanın odak noktasının alçak frekanslar olması nedeniyle saçıcı sistemlerin maksimum derinlikleri (h) 60 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Saıcı sistemlerde yansıma lobları periyodik dizilime bağlı olarak oluşmaktadır. Periyodik olmaması durumunda yansımalar, benzer yönde ve düzeyde oluşur ve belirli frekans bandında odaklanır. Dolayısıyla optimum bir saçıcı tasarımı için periyodik dizilim önemlidir ve aynı zamanda yakın alanda saçıcılık sağlanır. Periyodik dizilimin bir dezavantajı olarak renklenme oluşabilmektedir. Bu durumda belirli bir modülasyon ile lobların azalması ve buna bağlı renklemenin azalması sağlanabilmektedir. Aynı zamanda iki ya da daha fazla farklı yüksekliklerde tasarlanan sistemlerde, daha yüksek frekanslarda oluşan aynasal yansımalar azaltılarak, etkin olduğu frekans bandı genişler ve daha etkin bir yansıma sağlanır (Cox ve D’Antonio 2004). Çalışmada kullanılan saçıcı sistemler; kama, QRD (Schroeder tip saçıcı), yarı silindir, hibrit (kama+dar bant yutucu)’tir. Boyutları (maksimum h:60 cm ve minimum h:30 cm) etkin frekans aralıkları benzer olacak şekilde belirlenmiştir. Ayrıca rezonansa bağlı olarak köşe ve kenarlarda oluşan basınç sapmalarına karşın 60 cm çerçeve şeklinde yutucu sistem uygulanmıştır. Karşılaştırmalarda kullanılan yüzey varyasyonlarının kısmi planları Şekil 5.4’te verilmiştir.



Şekil 5.4 : a) Yutucu sistem (mevcut durum) b) yansıtıcı sistem c) kama d) QRD e) yarı silindir f) hibrit (kama+panel tip yutucu)

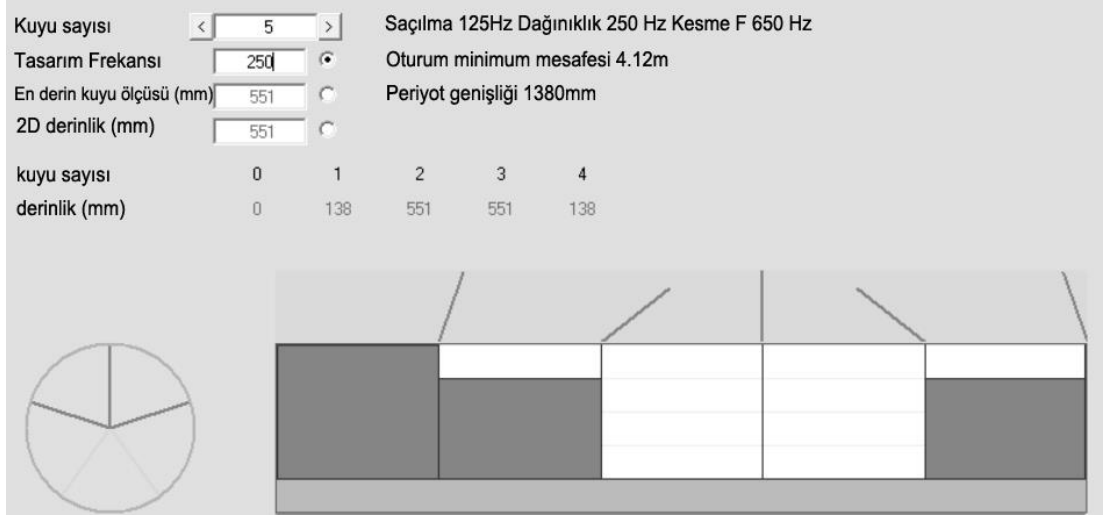
Şekil 5.4-a’da mevcut durumda yutucu olarak tasarlanmış referans yüzey tipi bulunmaktadır. Plan şemasında ‘test duvarı’ ve ‘Duvar yutucusu 3’ olarak tanımlanmış olan yüzeyin katmanlaşma detayı Şekil 5.11’de, kompleks empdans (Z_{re}, Z_{im}), ses

yansıtma katsayısı, ses yutma katsayısı değerleri ise Çizelge 5.3'te verilmiştir. Şekil 5.4-b'de yansıtıcı tip duvar varyasyonu yer almaktadır. Tamamı yansıtıcı olarak modellenmiş duvar yüzeyinin yansıtma katsayısı benzetim ortamında 1 olarak alınmıştır. Şekil 5.4-c'de üçgenlerden oluşan kama tip saçıcı yüzey tipi verilmiştir. Boyut ve saçıcılık performansı ilişkisine bakıldığında üçgen tip geometrik saçıcı sistemlerin etkinliği $n\lambda/4$ 'te maksimum, $n\lambda/8$ 'de minimumdur ve $n\lambda/2$ 'de frekans cevabında vadi yapmaktadır (Cox ve D'Antonio 2004). Buna göre 60 cm derinlik ile boyutlandırılan kama tip saçının etkin frekans aralığı yaklaşık olarak 150-700 Hz arasındır. Bu tip geometrik sistemlerin saçıcı özellikleri kenar açlarına ve buna bağlı derinliğine göre değişmektedir. Şekil 5.5'te kenar açıları 50° , 80° ve 85° olmak üzere 3 farklı üçgen tip saçıcının yansıma yönelimi verilmiştir. Buna göre açı arttıkça, özellikle 80° ve 85° örneklerinde ses ışınlarının büyük bir kısmının geldiği yöne doğru daha dağınık bir şekilde geri yansıdığı görülmektedir. Kenar açısının artması saçıcı adedinin azalmasına neden olduğundan kenar açısı $57^\circ - 60^\circ$ arası değişen üçgenlerden oluşan, modülasyonu sözde rastgele sayı dizisine (1, -1, 1, 1, -1, -1, -1) uygun bir saçıcı sistemi modellenmiştir.



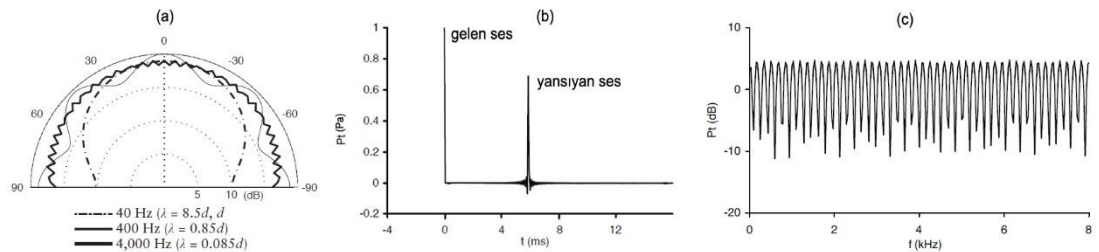
Şekil 5.5 : Kenar açılarına bağlı olarak iki üçgenin merkezinden oluşan saçılma düzeyi a) 50° b) 80° c) 85° (Cox ve D'Antonio 2004)

Şekil 5.4-d'de QRD ya da Schroeder tip hacimsel saçıcı sistemin tasarımı verilmiştir. Hesap aracı (Collison 2010) kullanılarak tasarlanan sistemin saçıcılık ve dağınıklık sağladığı frekansların ve minimum uzaklık mesafesi Şekil 5.6'da verilmiştir. Buna göre seçilen boyutlarda saçıcı sistemin saçılma frekansı 125 Hz, dağıtma frekansı 250 Hz ve f_{kesme} 'si 650 Hz'dir. Alçak frekanslarda etkin olması nedeniyle derin kuyulu olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Buna bağlı olarak dağınık alanın minimum mesafesi 4 m'dir.



Şekil 5.6 : QRD sistemin tasarım frekansına ve kuyu sayısına (n=5) göre boyutlarının hesaplanması (Collison 2010)

Şekil 5.4-e’de farklı boyutlarda yarı silindir yüzeye sahip saçıcı sistemi tasarımı verilmiştir. Yarı silindirik form saçıcılık açısından çok ideal gözükse de beraberinde bazı akustik kusurlara neden olmaktadır. Şekil 5.7’de yarı silindirik formun yöne bağlı yansıyan ses basınç düzeyi verilmiştir. Basınç dağılımına bakıldığında her yöne eşit yayım yaptığı görülmektedir. Fakat yansıyan enerji uzamsal dağılıtı nedeniyle azalsa da zaman çizgisine bakıldığında oluşturulduğu aynasal yansıma ile düz yüzeye benzer bir etki yapmaktadır. Bu yansıma tipinin bir sonucu olarak faz çakışmasına bağlı düzenli vadiler ile taraklama etkisi yaratmaktadır. Derinlik ve etkin frekans ilişkisine bakıldığında ampirik hesaplara göre maksimum saçıcılığın yaklaşık $\lambda/10$ olması durumunda elde edildiği görülmektedir. Buna göre etkin frekans aralığının diğer saçıcı tipleriyle örtüşmesini sağlamak amacıyla orta kısımda derinliği 60 cm olan bir saçıcı kullanılmış, diğer kısımlarda ise derinlik 30 cm’e düşülmüştür (Cox ve D’Antonio 2004).



Şekil 5.7 : Yarı silindirik (1m genişlik) saçıcı tipine ait a) saçılan ses basınç düzeyi b) zaman tepkisi c) frekans tepkisi (Cox ve D’Antonio 2004)

Şekil 5.4-e’de hibrit tipi (kama+dar bant yutucu) saçıcı sistem verilmiştir. Kama formunda membran tip yutucu prensibine uygun olarak tasarlanmıştır. Buna göre sadece 63 Hz’de yutuculuk, diğer frekanslarda ise yansıtıcılık sağlamaktadır. Sınır koşullarının tanımlandığı bölümde yutuculuk, yansıtıcılık katsayısı ve kompleks empedans verileri sunulmuştur (Şekil 5.12).

5.2 Benzetim Ortamının Tanımlanması ve Hesap Yöntemleri

Çalışmada öncelikli olarak prova odası, stüdyo odası ve varyasyonları Sketch-Up programında modellenmiş, sonrasında CAD- Import modülü ile benzetim ortamına aktarılmıştır (COMSOL Multiphysics 2018). İç aktarma sırasında yüzeylerde oluşan ek çizgiler yok edilerek model sadeleştirilmiştir. Tanım alanı kabulleri Çizelge 5.2’deki gibidir.

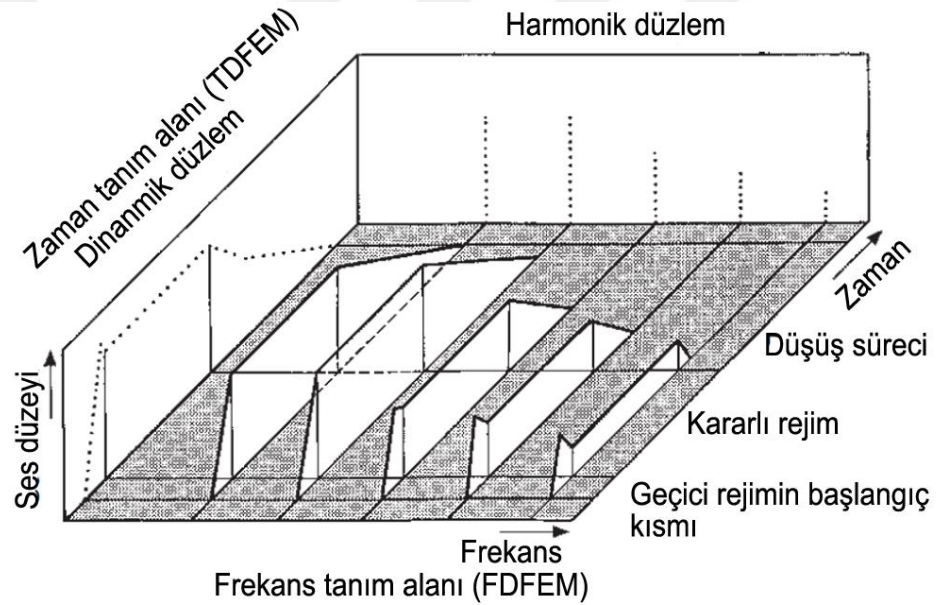
Çizelge 5.2 : Benzetimde kabul edilen parametreler ve değerleri

Adı (Name)	İfade (Expression)	Değer (Value)	Açıklama (Description)
rho0	1.2 [kg/m ³]	1.2 kg/m ³	Havanın yoğunluğu (air density)
c_air	343.8 [m/s]	343.8 m/s	Sesin hızı (speed of sound)
f0	125 [Hz]	125 Hz	Kaynak frekansı bant genişliği (source frequency bandwidth)
f_max	350 [Hz]	350 Hz	Maksimum analiz frekansı (maximum frequency to resolve)
t0	1/f0	0.008 s	Kaynak vurumu yarı genişliği (source pulse half width)
N	5	5	Dalga boyu başına eleman sayısı (elements per wavelength)
h_max	c_air/f_max/N	0.19646 m	Tipik eleman boyutu (typical element size)

Şekil 5.8’de zaman tanım alanında analiz ve frekans tanım alanında analizin farkı verilmektedir. Odanın geçici rejimi temelde 3 kısma ayrılır.

1. Başlangıç kısmı, sesin ya da tonun tam dinlenme kısmından son haline geleceği duruma kadar geçen zaman dilimidir.
2. Kararlı rejim, tonun pratikte değişmediği zaman dilimidir.
3. Düşme süreci sesin kapatılmasından sonra tam sessizlik anına kadar geçen zaman dilimidir.

Zaman tanım alanında analiz, matematiksel fonksiyonların ve fiziksel sinyallerin zamana göre analizidir. Zaman alanında, sinyal veya fonksiyonun değeri, sürekli zaman durumunda tüm gerçekte sayılar için veya belirli zaman aralıklarında her bir zaman dilimi için hesaplanır. Zaman tanım alanı grafiği, bir sinyalin zamanla nasıl değiştiğini gösterirken, frekans tanım alanı grafiği, bir zaman aralığı boyunca verilen her bir frekans bandında sinyalin ne kadarının bulunduğunu gösterir. Sesin hacim içerisinde geçici rejim, kararlı rejim ve düşüş süreci aşamalarındaki ses düzeyi ya da genlik değişimi olan dinamik değişimi analiz edilir. Frekans tanım alanı, zamandan ziyade matematiksel fonksiyonların veya sinyallerin frekansa göre analizini ifade eder. Frekans tanım alanında yapılan analiz sonucunda her bir banttaki enerji düzeyini gösteren harmonik içerik elde edilir.



Şekil 5.8 : Frekans tanım alanı ve zaman tanım alanı şematik gösterimi (Meyer 2009)

Bu çalışmada dalga bazlı sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak 3 tip analiz çalışması yürütülmüştür.

1. Özfrekans analizi (Eigenfrequency analysis): Özfrekans analizi, oluşan rezonansların belirlenmesinde ve basınç dağılımının görüntülenmesinde kullanılmaktadır. Bu analiz tipinde dalga denklemi kaynak terimleri olmadan çözülür.

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) + \frac{\lambda^2 p}{\rho_0 c^2} = 0 \quad (5.4)$$

p : basınç

ρ_0 : havanın yoğunluğu (kg/m³)

c : sesin hızı (m/s)

λ : dalga boyu (m)

Denklemden özdeğer olarak belirtilen λ ile özfrekans f ve açısal frekans ω ile ilişkisi $\lambda = i2\pi f = i\omega$ şeklindedir.

2. Frekans tanım alanında analiz (Frequency domain analysis, FDFEM): Frekans tanım alanında analizde ise harmonik bir yük kullanarak belirli bir frekans aralığında parametrik bir tarama ile frekans yanıtı hesaplanır. Bu analizde homojen olmayan Helmholtz bağıntısı kullanılır. Her iki dipol kaynak q (N/m³) ve monopol kaynak Q (1/s²) formülde opsiyonel olarak kullanılır.

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - q) - \frac{\omega^2 p}{\rho_0 c_s^2} \right) = Q \quad (5.5)$$

p : basınç

ρ_0 : havanın yoğunluğu (kg/m³)

c_s : sesin hızı (m/s)

ω : açısal frekans (rad/s) ve $\lambda = i2\pi f = i\omega$

$\rho_0 c_s^2$: yığın modülü (bulk modulus) β (N/m²)

3. Zaman tanım alanında analiz (Time domain analysis, TDFEM): Zamana bağlı analizlerin yapıldığı zaman tanım alanında analiz ise aşağıdaki denklem ile tanımlanmaktadır.

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p_t}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p_t - q) \right) = Q \quad (5.6)$$

p_t : total akustik basıncı

ρ : havanın yoğunluğu (kg/m³)

c : sesin hızı (m/s)

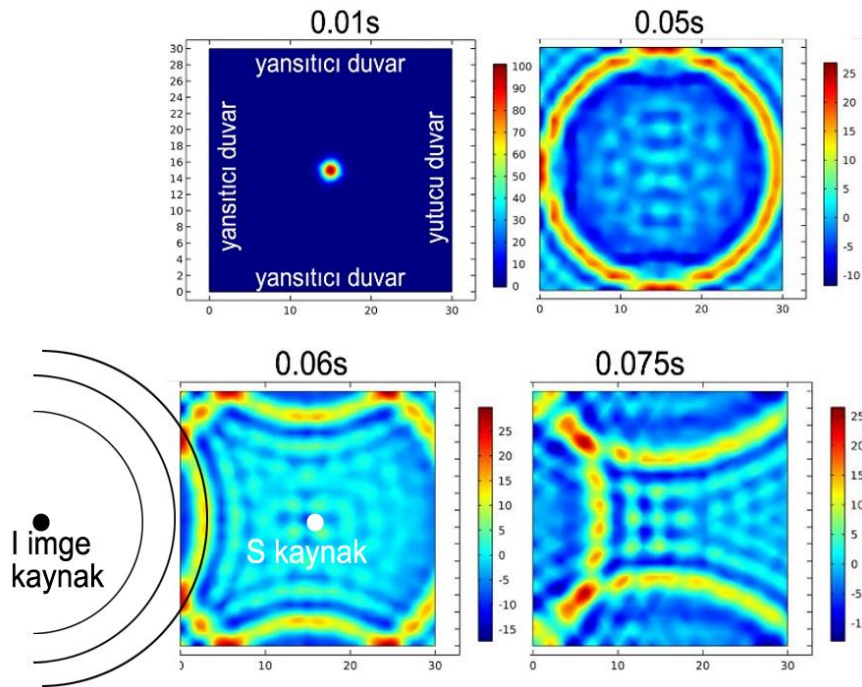
Bu formülde, q terimi dipol kaynağı, Q terimi ise monopol kaynağı ifade etmektedir.

Yazılımın önemli özelliklerinden olan poroz yutucular ya da gelişmiş empedans sınır özelliklerinin sönümlenme koşulları, frekans tanım alanında analiz arayüzünde (Frequency domain physics interface) tanımlanmıştır. Dolayısıyla zaman tanım alanında analizin FFT dönüşümü yerine frekans tanım alanında analiz yazılım

tarafından önerilmektedir. Aynı zamanda monopol ve dipol gibi kaynak yayım özellikleri sadece frekans tanım alanında tanımlıdır. Dolayısıyla frekans tepkisi analizleri, frekans tanım alanında yapılan hesaplamaların sonucu olarak sunulmuştur.

5.2.1 Sınır koşullarının tanımlanması

Dalga teorisine göre yüzeydeki ses sönümlenmesi ve yansıması, kütle, yay ve direnç bilgisi içeren bir mekanik sistem olarak tanımlanmalıdır (Sakamoto vd. 2008; Sakuma ve Sakamoto 2014). Teoride, yüzey empedansı da ses yutum katsayısı gibi frekansın bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Rijit bir duvarın ses yansıtma katsayısı $R=1$ iken empedans değeri $Z=\infty$ 'dur. Diğer bir yandan, tamamen yutucu bir sistemde yüzey empedansı ile ortam empedansının (hava) birbirine eşit olduğu varsayılır ($Z=\rho c$) ve empedans yok olur (Kuttruff 2009). Şekil 5.9'da geçici zaman analizinde kullanılan Gauss sinyalinin farklı empedans değerleri ile oluşturduğu ses basınç değişimi plan düzleminde iki boyutlu olarak verilmiştir. Sesin zamana bağlı ilerleyişinin ses alanında oluşturduğu basınç değişimi ve ses dalgasının yüzeye etkileşiminde yüzey özelliğine bağlı değişen yüzey tepkisi verilmiştir. Ses, yansıtıcı ya da rijit bir yüzeye çarptığında imge kaynak oluşturarak aynasal yansıma yaparken, ortam (hava) ile aynı empedansa sahip bir yüzey ile karşılaşması durumunda direnç oluşmaz ve yansıma gerçekleşmez.

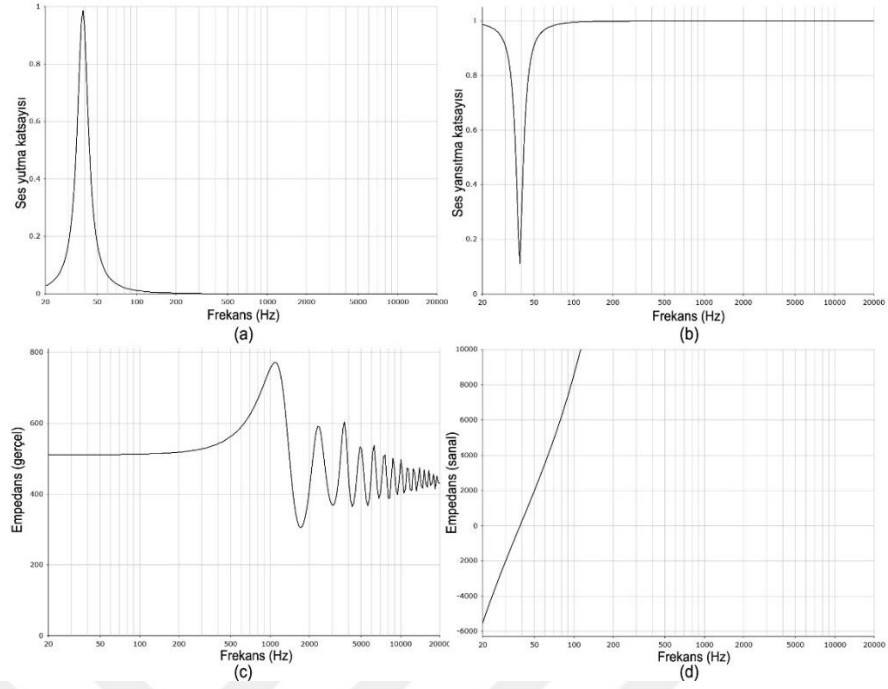


Şekil 5.9 : Düzgün bir dörtgende merkeze yerleştirilen Gauss sinyalinin ses ortamında oluşturduğu dar zaman aralıklarında ses basıncı değişimi

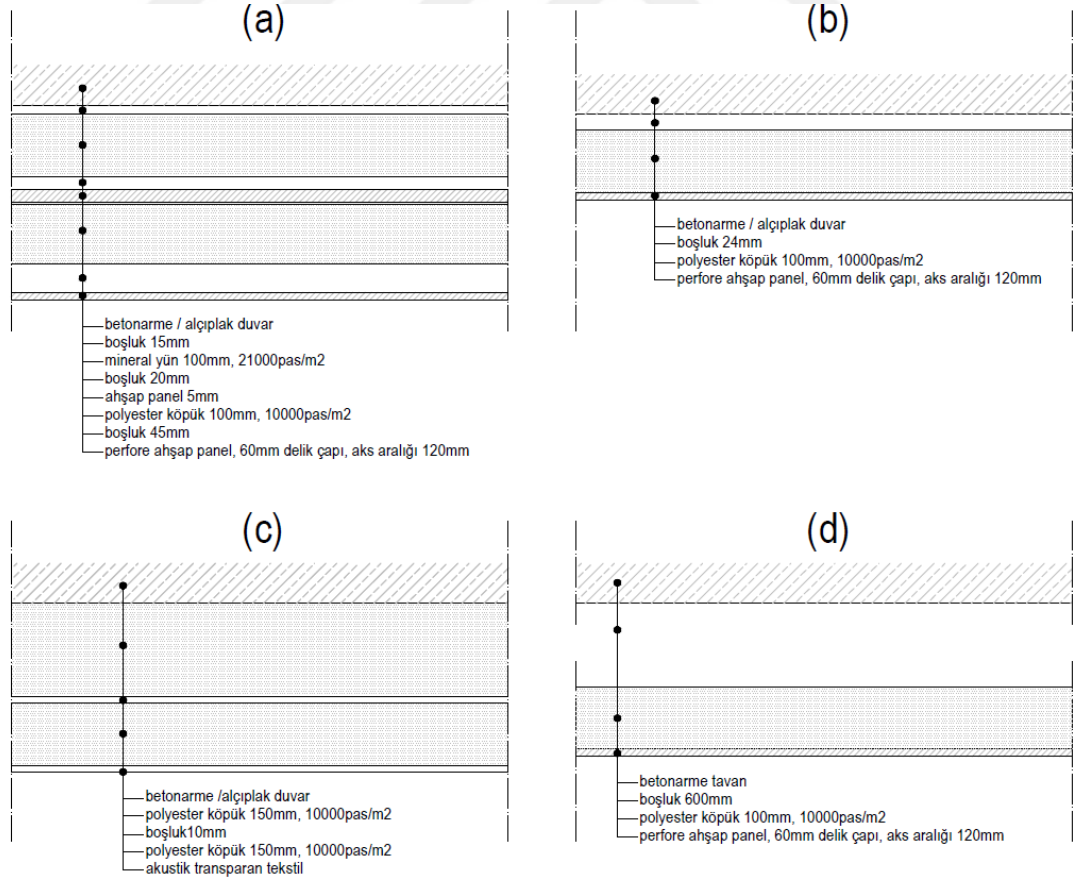
Benzetim çalışmalarında oluşturulan modelin kesinliğindeki en önemli etkenlerden biri yüzey formunun ve empedansının doğru bir şekilde tanımlanmasıdır. Yapı elemanlarının ya da akustik düzenlemelerin empedans bilgisi, ses yutum katsayısı kadar ulaşılabilir değildir, fakat teorik modellerin hesaplama aracına dönüştürüldüğü açık kaynaklar mevcuttur.

Bu çalışmada katmanların tanımlanarak ses yansıtma katsayısının, ses yutma katsayısının, kompleks empedans verilerinin elde edildiği Acousticmodelling hesap aracından yararlanılmıştır (Acousticmodelling 2011). Hesaplama aracında çok katmanlı ses yutucu sistemlerinin ses yutum katsayısı ve faz bilgisi ile yüzey empedans değerleri elde edilebilmektedir. Çok katmanlı sistemlerin teorik hesabında, gözenekli kısım için Allard ve Champoux modeli (Allard ve Champoux 1992), Helmholtz kısmı için Ingard modeli kullanılmıştır (Ingard 1953).

Hesap modelinde bazı noktalar sonuçların kesinliğinde dezavantaj oluşturabilmektedir. Hesaplama aracı, düzlemsel dalganın sonsuz boyutta bir yüzeye geldiğini varsaymaktadır, dolayısıyla eğik açılı dalgayı hesaplayamamaktadır. Bu çalışmada sınır koşulları, yerel reaksiyon (locally reacting) varsayımına ile yüzey empedansı olarak tanımlanmıştır (Acousticmodelling 2011). Stüdyo odasında tavan ve duvarda kullanılan akustik düzenleme sistemlerin kompleks empedans verileri (sanal ve gerçel), ses yutma katsayısı ve ses yansıtma katsayısı Çizelge 5.3'teki gibidir. Akustik düzenlemede kullanılan duvar yutucuları ve tavan yutucusu katmanlaşması Şekil 5.11'de, hacim içerisinde yerleşimi Şekil 5.2'de verildiği gibidir. Aynı zamanda zeminde bulunan yükseltilmiş döşeme üzeri parke sisteminin hava boşluğuna bağlı olarak alçak frekanslarda etkin bir yutucu olduğu görülmüştür. Zemin kaplama sisteminin ses yutma katsayısı, ses yansıtma katsayısı ve kompleks empedans verileri Şekil 5.10'daki gibidir. 4 mm mdf (7 kg/m^2) üzeri 12 mm parke (9 kg/m^2) olan kaplamanın toplam yüzey birim ağırlığı 16 kg/m^2 'dir. Yükseltilmiş döşemenin altında 80 mm hava boşluğu ve 50 mm kalınlığında 16000 Pa.s/m^2 akış direncine sahip taş yünü kullanılmıştır. Panel tip sönümleme prensibi ile rezonatör görevi gören yükseltilmiş döşeme sisteminin panel ağırlığının yüksek olması nedeniyle sistem 50 Hz altında bir sönümleme sağlamaktadır. Özellikle 20 Hz civarı etkin olan rezonansların yarattığı yüksek basıncın kontrolünde önemli bir sönümleme görevi görmektedir.



Şekil 5.10 : Parke kaplamalı yükseltilmiş döşeme sistemin a) ses yutma katsayısı b) ses yansıtma katsayısı c) kompleks empedans gerçel kısmı d) kompleks empedans sanal kısmı



Şekil 5.11 : Kullanılan yutucu sistemlerin katman detayları a) duvar yutucusu 1 b) duvar yutucusu 2 c) duvar yutucusu 3 d) tavan yutucusu

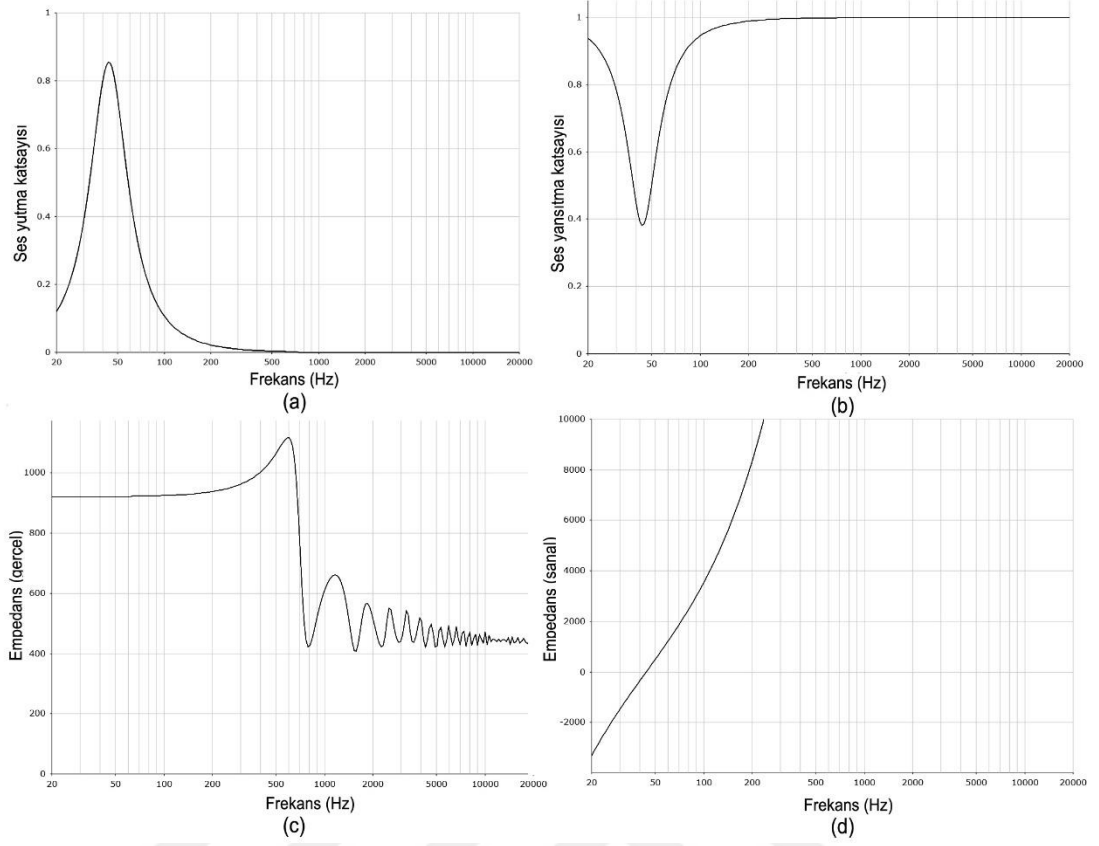
Çizelge 5.3 : Stüdyo odasında kullanılan ses yutucu sistemlerin 1/1 oktav bantta empedans ve ses yutma katsayısı bilgisi

Akustik düzenleme	Yüzey koşulları değişkenleri	Frekans (Hz)		
		63	125	250
Duvar yutucusu 1	α^{**}	0,45	0,67	0,8
	R*	0,75	0,58	0,45
	Zre*	1068	1027	938
	Zim*	-1327	-679	-284
Duvar yutucusu 2	α	0,2	0,51	0,8
	R	0,9	0,7	0,4
	Zre	744	744	746
	Zim	-2183	-1030	-369
Duvar yutucusu 3	α	0,55	0,69	0,8
	R	0,66	0,55	0,46
	Zre	1189	878	706
	Zim	-1079	-666	-480
Tavan yutucusu	α	0,64	0,67	0,8
	R	0,6	0,57	0,49
	Zre	1441	1428	820
	Zim	-524	-385	-530

* α : ses yutma katsayısı, R: ses yansıtma katsayısı, Zre: Yüzey empedansı gerçel kısmı, Zim: Yüzey empedansı sanal kısmı

** $\alpha = 1 - |R|^2$

Yüzey form ve empedansının ses alnına ve rezonans kontrolüne etkisinin irdelenmesi amacıyla farklı empedans ve formda yüzey tiplerine sahip varyasyonlar oluşturulmuştur. Düz yansıtıcı, kama, QRD, yarı silindir gibi farklı formlarda oluşturulan saçıcı sistemlerin sönümlenme etkisi göz ardı edilerek yüzey empedansı $Z = \infty$ olacak şekilde programda modellenmiştir. Karşılaştırılan yüzeylerden bir diğeri olan hibrit sistemde ise yüzey formu kama şeklinde geometrik olarak modellenmiş, yutuculuk değeri dar bantta (63 Hz ve altı) etkin panel tip rezonatör olacak şekilde ayarlanmıştır. Hibrit sistemin katmanlaşmasında hava boşluğu 40 cm olarak kabul edilmiş, boşlukta 24000 Pa.s/m² akış direncine sahip taş yünü kullanılmıştır. Tasarlanan sistemde 4 mm kalınlığında mdf panelin yüzey birim ağırlığı 7 kg/m²'dir. Buna göre hesap aracından elde edilen ses yutma katsayısı, ses yansıtma katsayısı, kompleks empedans verileri Şekil 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.12 : Hibrit yüzey sisteminin a) ses yutma katsayısı b) ses yansıtma katsayısı c) kompleks empedans gerçel kısmı d) kompleks empedans sanal kısmı

Hesap aracından elde edilen veriler benzetim programına interpolasyon olarak yüklenmiş, aşağıdaki bağıntı ile yüzeyler seçilerek empedans ataması yapılmıştır.

$$Z_n = Z_{re}(freq[1/Hz]) + i * Z_{im}(freq[1/Hz]) \quad (5.7)$$

Z_n : Spesifik yüzey empedansı

Z_{re} : Empedansın gerçel kısmı

Z_i : Empedansın sanal kısmı

i : imajiner sayı, $\sqrt{-1}$

5.2.2 Kaynak ögesinin tanımlanması

Sinyal tepkisi hesabında küresel ve her yöne eşit dalga yayımı yapan bir kaynak gereksinimi vardır. Geniş içeriğe sahip frekansların etkileşimi sonucu birbirini üzerine yapılanması nedeniyle oluşan problemler, kaynağın sınırlı ve dar bant frekansa sahip olmasını gerektirmektedir (Papadakis 2017). Bu nedenle sinyal tepkisi hesabında

Gauss sinyali kullanılmıştır. Sinyale ait frekans ve zaman içeriği Şekil 5.5'teki gibidir. TD-FEM analizlerinde kaynak aşağıdaki bağıntıya uygun olarak tanımlanmaktadır (COMSOL Multiphysics 2018). Her bir frekans bandı analizi için f_0 değiştirilerek yinelenmiştir.

$$Q = -A2\pi^2 f_0^2 (t-t_p) e^{-\pi^2 f_0^2 (t-t_p)^2} \quad (5.8)$$

$$t_p - \frac{1}{f_0} < t < t_p + \frac{1}{f_0} \quad (5.9)$$

Q: Gauss sinyali basınç genliği

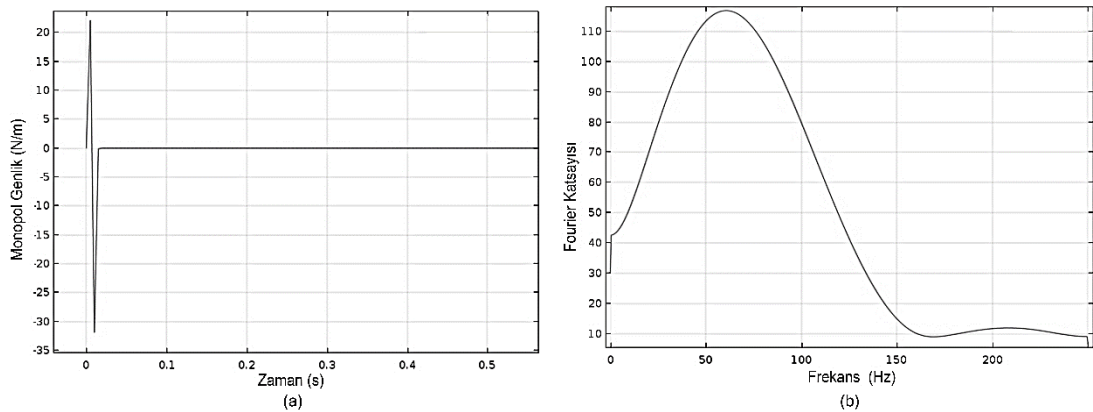
f_0 : sinyal frekansı (Hz)

t_p : sinyal tepe zamanı (s)

A= genlik (Pa)

T: toplam sinyal uzunluğu (s)

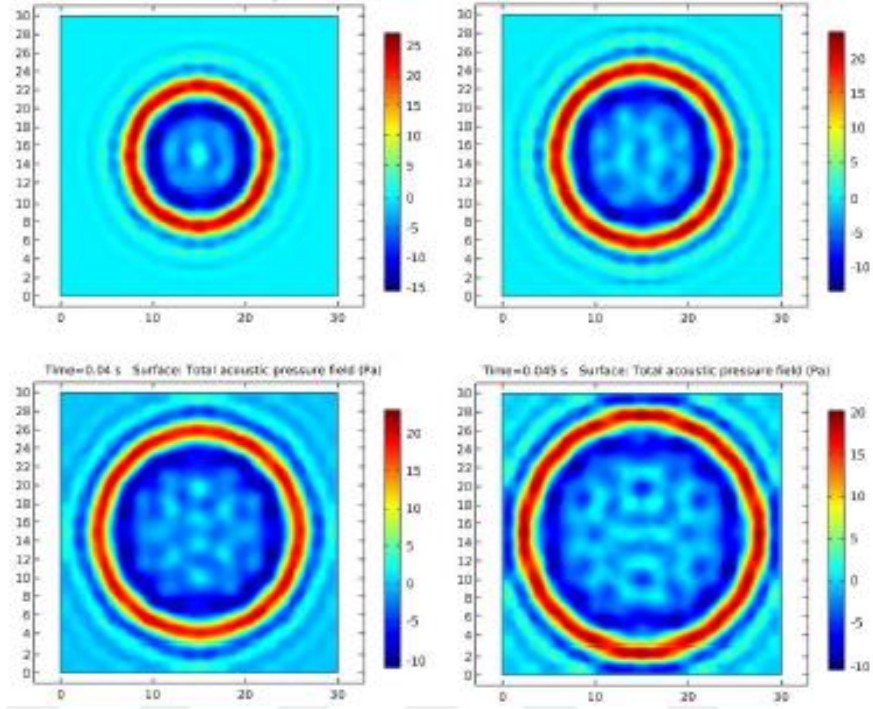
Şekil 5.13'te çalışmada kullanılan Gauss sinyalinin zaman bilgisi ve frekans içeriği verilmiştir. Buna göre sinyal tahriki 0.05 s sonra tepe noktasına 20 N/m'ye ulaşıyor. Frekans içeriğine bakıldığında ise 63 Hz bandında ayarlanmış olduğu görülmektedir. Diğer bant analizlerinde ise tepe frekansı (f_0) 125 Hz ve 250 Hz olacak şekilde kaynak bilgileri değiştirilerek hesaplamalar tekrarlanmıştır.



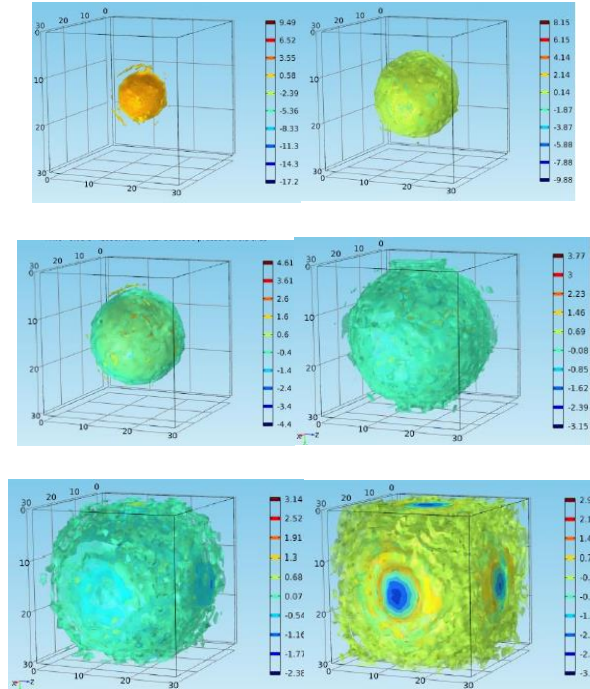
Şekil 5.13 : TD-FEM analizinde kullanılan modüle edilmiş Gaussian sinyalinin a) dalga formu b) frekans spektrumu

TD-FEM'de zaman aralıkları 0.001 s olarak ayarlanmış monopollu yayım yapan kaynağın hacim içerisinde ilerleyişinin ses alanında yarattı basınç (Pa) değişimi 2 boyutlu gösterimi Şekil 5.14 'teki gibidir. Aynı zamanda sinyalin 3 boyutlu gösterimleri eş yüzey ile hacim içerisindeki yayımı ve ses basıncı (Pa) değişimi Şekil

5.15'teki gibidir. Dalga hareketi küreseldir. Her iki gösterimde de görüldüğü üzere tahrik kaynaktan uzaklaştıkça mesafe artışına bağlı olarak akustik basıncın genliği azalmaktadır. Yüzey ile etkileşimi sınır koşullarının anlatıldığı bölümde gösterilmiştir.



Şekil 5.14 : Gauss sinyalinin zamana bağlı ilerleyişi ve ses basıncı değişimi (Pa) plan düzleminde iki boyutlu gösterimi (Papadakis 2017)



Şekil 5.15 : Gauss sinyalinin zamana bağlı ilerleyişi ve eş yüzey ile ses basıncı değişiminin üç boyutlu gösterimi (Papadakis 2017)

5.2.3 Ayırıklaştırma

Sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı benzetim çalışmasında, analiz edilen odanın matematiksel olarak modellenmesiyle tanım alanı oluşturulur. Ayırıklaştırma, matematiksel olarak hesap yapılabilmesi için tanım alanının kafes denilen sonlu elemanlara bölünmesidir. Hacim içerisindeki herhangi bir nokta, bu elemanlardan birinin içinde bulunmaktadır. Üçgensel, dörtgensel ya da çok kenarlı olabilecek bu elemanların birbirleriyle eklenilebilir olması gerekmektedir. Zaman analizinde, belirlenen zaman aralıkları bu elemanların boyutu ile ilişkilidir ve zamana bağlı analizlerdeki zaman aralıklarını ifade eden ayırıklaşma, modelin çözünürlüğünü ifade etmektedir. Sonlu elemanlar analizinde sayısal bir hata oluşmaması için eleman boyutunun uygun bir boyutta olması gerekmektedir. Eleman boyutunun ya da kafes boyutunun azalması daha fazla hesap yapılması nedeniyle kesinliği artırsa da sonuçların daha fazla iyileşmediği bir noktada hesap yükü yaratmaktadır. Optimum kafes boyutunun maksimum frekans ya da minimum dalga boyu ile ilişkisinin araştırıldığı çalışmalarda $\lambda/d \geq 4.8$ değeri tavsiye edilmektedir (Okuzono vd. 2010). Aynı zamanda optimum eleman boyutunun belirlenmesinde analiz edilen en yüksek frekans (f_{maks}) ve zaman aralıkları (Δt) arasında bir ilişki vardır. Bu ilişki Courant–Friedrichs–Lewy koşuluna göre belirlenir. CFL koşuluna göre zaman basamağı yeterince küçük tutulmalıdır, böylelikle ayırıklaşan uzay boyutunda bilgi aktarımı için yeterli zaman olabilmektedir. Buna göre kafes/eleman boyutu (h) ve zaman aralığı (Δt) aşağıdaki bağıntı ile belirlenir. Courant sayısı (CFL) maksimum 1 alınabilmektedir, fakat kesinliğin artırılması için 0,2 değeri alınması önerilmektedir. Buna paralel olarak artan eleman sayısı ile hesaplama yükü de artmaktadır.

$$CFL = \frac{c \cdot \Delta t}{h} \leq C_{maks} \quad (5.10)$$

c : sesin hızı (m/s)

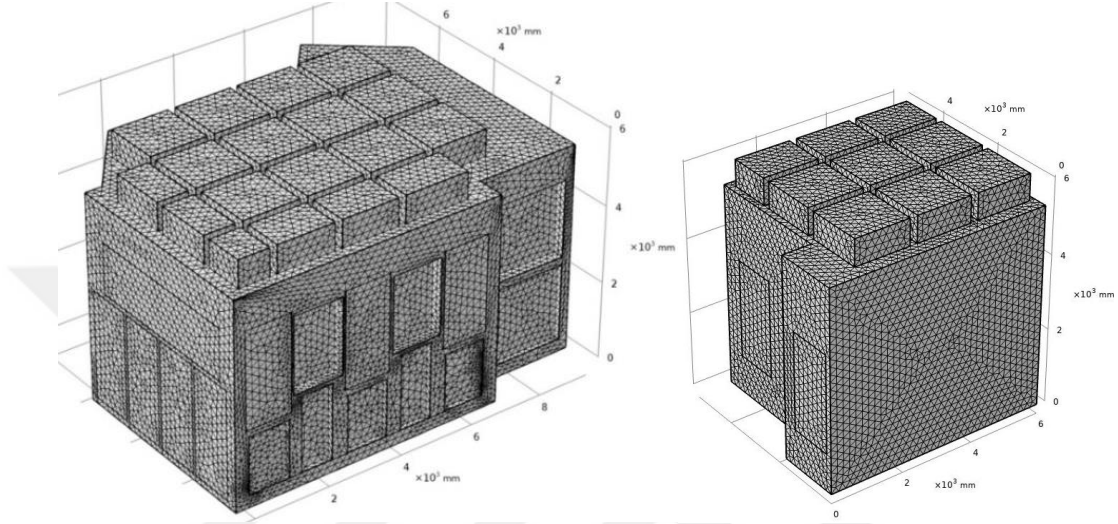
C_{maks} = Courant sayısı (1 olarak alınmıştır)

Δt = zaman aralıkları (s)

h = maksimum eleman boyutu (m)

C sayısının 1 olarak kabul edildiği modelde maksimum frekansa göre ($f_{maks} = 355$ Hz) oluşan maksimum eleman boyutu 210 mm, minimum 9 mm'dir. Zaman analizinde kullanılan zaman aralıkları ise 0.001 s kabul edilmiştir. Şekil 5.16'da yapılan kabullere göre elde edilen kafes boyutuna göre stüdyo odasına ait ve prova odasına ait

kafeslenmiş matematik modelleri bulunmaktadır. Buna göre stüdyo odasına ait bütün kafes 708567 tanım alanı elemanından, 26881 sınır elemanından, 3497 kenar elemanından oluşmaktadır ve çözülen serbestlik derecesi sayısı 972524'tür. Prova odasına ait bütün kafes 357563 tanım alanı elemanından, 14066 sınır elemanından, 1256 kenar elemanından oluşmaktadır ve çözülen serbestlik derecesi sayısı 490519'dur.



Şekil 5.16 : Benzetim çalışmasında kullanılan sayısal model a) stüdyo odası b) prova odası

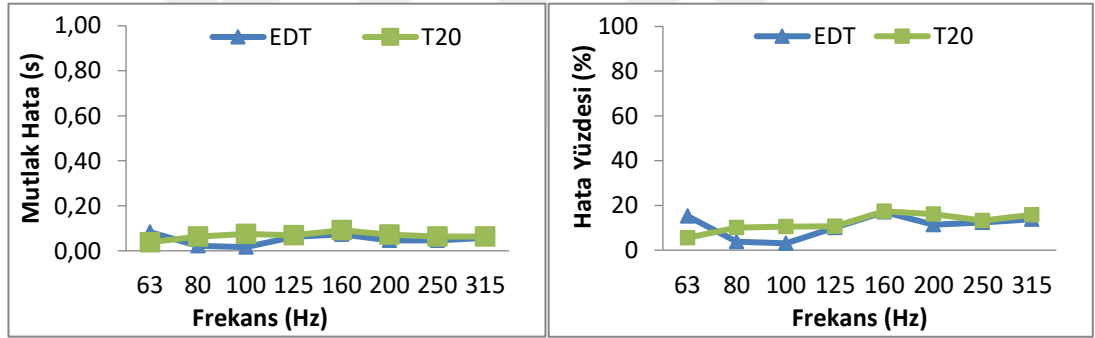
5.3 Benzetim ve Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Ölçüm çalışmasından elde edilen veriler aynı zamanda modelin kalibrasyonunda ve kesinliğinin artırılmasında kullanılmıştır. Dalga bazlı model ile ölçüm sonuçları EDT ve T_{20} parametreleri ile 1/3 oktav bantta karşılaştırılmıştır (Çizelge 5.4). Bununla birlikte karşılaştırma sonucundan elde edilen hata analizi mutlak değerleri (s) ve yüzdeleri (%) 1/3 oktav bantta verilmiştir (Şekil 5.17). Karşılaştırmaya göre hacimde EDT parametresindeki hata oranı frekans arttıkça azalmaktadır. Maksimum sapma değeri 0.1 s'den düşük ve yüzdesel olarak maksimum %17'dir. Hata oranının değerlendirilmesinde JND değerleri kullanılabilmektedir. Fakat tolerans değerleri ilgili TS EN ISO 3382-1:2010'da belirtilen değerler yüksek frekanslarda, büyük hacimler (300 m³) için verilmiştir ve JND (EDT) %5 olarak belirtilmiştir (TS EN ISO 3382 2010). Alçak frekanslarda eşik değerin arttığı bilinmekle beraber alçak frekanslarda JND değerinin araştırıldığı güncel çalışmalarda toleransın alçak frekanslarda %26'ya çıktığı belirtilmiştir (Dorrego ve Vigeant 2020). Buna göre benzetim ve ölçüm arasındaki farkın psikoakustik olarak göz ardı edilebilir olduğu

görülmüştür. Özellikle 160 Hz bandında çıkan bu farkın empedans değerlerinden kaynaklanabileceği öngörülmektedir.

Çizelge 5.4 : Ölçüm ve FEM sonuçlarının karşılaştırılmasında EDT ve T₂₀ parametrelerine ait mutlak hata ve hata yüzdesi değerleri

Parametreler		1/3 Oktav Bant (Hz)							
		63	80	100	125	160	200	250	315
EDT (s)	Ölçüm	0,55	0,57	0,54	0,61	0,43	0,40	0,37	0,42
	Benzetim	0,63	0,54	0,52	0,55	0,50	0,45	0,42	0,48
	Mutlak hata (s)	0,08	0,02	0,02	0,06	0,07	0,05	0,05	0,06
	Hata yüzdesi (%)	15,17	3,80	3,05	10,13	17,06	11,39	12,30	13,74
T ₂₀ (s)	Ölçüm	0,69	0,63	0,70	0,65	0,53	0,45	0,49	0,41
	Benzetim	0,73	0,57	0,63	0,58	0,62	0,52	0,55	0,47
	Mutlak hata (s)	0,04	0,06	0,07	0,07	0,09	0,07	0,06	0,06
	Hata yüzdesi (%)	5,50	10,09	10,51	10,67	17,40	16,07	13,17	15,76



Şekil 5.17 : Ölçüm ve FEM sonuçlarının karşılaştırılmasında EDT ve T₂₀ parametrelerine ait mutlak hata ve hata yüzdesi değerleri

5.4 Anket ve Ölçüm Çalışmalarında Kullanılan Hacimlerin Modal Analizi

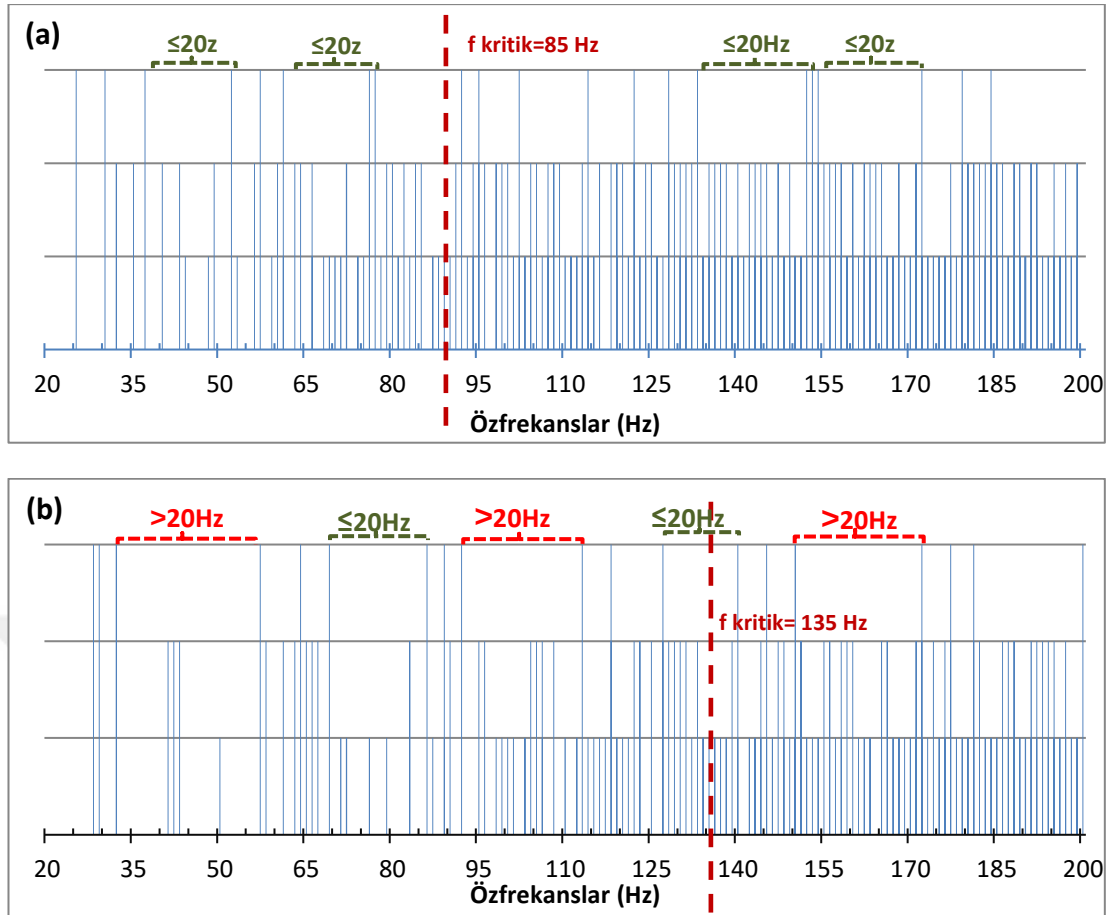
Küçük hacimlerde oluşan rezonansların ve modların müzisyen izlenimindeki etkisini irdelemek amaçlı yapılmış olan anket çalışmasında, test edilen odalardaki ses alanı oluşumunun modlarla ilişkisini irdelemek üzere benzetim yöntemi kullanılmıştır. Bu bölümde iki odanın alçak frekanslardaki ses alanı özelliklerinin karşılaştırılması amaçlı modal analizleri yapılmıştır. Elde edilen değerler optimum değer aralıkları ile karşılaştırılarak odaların hacim ve boyut oranları gibi geometrik özellikleri mod dağılımı açısından değerlendirilmiştir. Aynı zamanda odalarda rijit sınır koşullarında elde edilen frekans tepkisi (odanın mod karakteri) ile modal dağılım karşılaştırılmış, mod dağılımının etkisi irdelenmiştir.

5.4.1 Hacimlerin Schroeder frekansı (f_{kritik})

İlk olarak odaların, alçak frekanslarda modal alan ile dağınık alan arasındaki kestirimi belirleyen Schroeder frekansı hesaplanmıştır. Stüdyo odasında hacmin daha büyük olması ve reverberasyon süresinin düşük olması sebebiyle hesaplanan f_{kritik} 85 Hz'dir. Diğer bir yandan daha küçük bir hacme sahip olan ve reverberasyon süresi daha yüksek olan prova odasında ise f_{kritik} 158 Hz'dir. Schroeder teorisine göre hacmin azalması ve reverberasyon süresinin yükselmesi ile modal alan ile dağınık alan geçişi daha üst oktavlara kayarak, rezonansların daha işitilebilir aralıklarda oluşmasına neden olmaktadır.

5.4.2 Modal yoğunluk ve mod aralıkları

Modal analizde odada uygulanan yutucu duvar panelleri, giydirme sistemler, sarkıt paneller gibi akustik düzenlemeler göz ardı edilerek, odanın rijit kabuğu ya da gövde elemanı tek yüzey halinde modellenir. Modal analiz ya da özfrekans analizi bağıntısında (5.4) belirtildiği gibi kaynak terimler yoktur ve odanın boyutlarına ve geometrisine göre sistemin doğal frekansları hesaplanır. Şekil 5.18'de her iki hacme ait özfrekans analizinden elde edilen frekansa bağlı mod yoğunluğu bilgisi verilmektedir. Y ekseninde modların enerji düzeyine göre ayrımı, X ekseninde ise frekans bilgisi verilmektedir. Y ekseninde en yüksek enerji düzeyi ile eksenel modlar, orta düzeyde teğet modlar ve en düşük düzeyde eğik modlar gösterilmiştir. Eksenel modlara bakıldığında stüdyo odasında eksenel modlar arası mesafenin Gilford kriterine göre 20 Hz'yi geçmediği görülmüştür (Gilford 1979). Stüdyo odasında üst frekanslarda çakışma olduğu gözlemlense de bu bantlarda her bir frekansta minimum 3 mod yerleşmiş olması ve buna bağlı mod yoğunluğunun artmış olması sebebiyle, çakışmalar göz ardı edilmiştir. Prova odasında ise belirli eksenel modlar arası mesafenin 20 Hz'yi geçtiği görülmektedir. Çizelge 5.5'te iki odada 1/3 oktav bantta oluşan mod sayısı verilmiştir. Stüdyo odasında Bonello kriterine (Bonello 1981) uygun olarak mod sayısı her bir oktav bantta bir öncekinden daha fazladır. Fakat prova odasında 50 Hz oktav bandında bir önceki banttan daha az olduğu görülmektedir. Mod sayısının az olması düşük enerji ile ilişkilidir. Gilford kriterine göre mod mesafeleri modal yoğunluğun azalmasına bağlı olarak artmaktadır ve ayrılaşan modlar işitsel olarak belirginleşmektedir. Dolayısıyla prova odasında daha düşük bir modal yoğunluk olduğu görülmektedir.



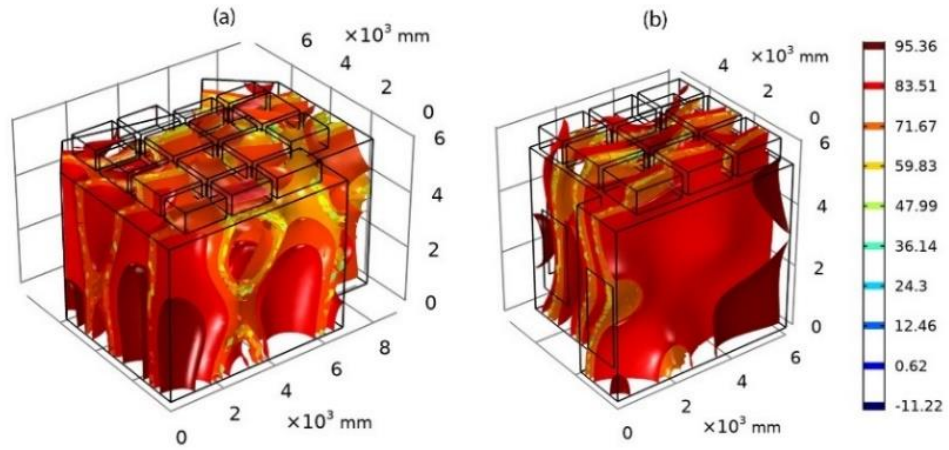
Şekil 5.18 : Hacimlerin mod dağılım analizi a) Stüdyo odası b) Prova odası

Çizelge 5.5 : Stüdyo odası ve prova odasında 1/3 oktav bantta mod dağılımı

Merkez frekans (Hz)		20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
1/3 Oktav bantta mod sayısı	Stüdyo Odası	1	1	2	5	5	13	21	33	69	127
	Prova Odası	0	0	3	3	1	9	10	17	40	68

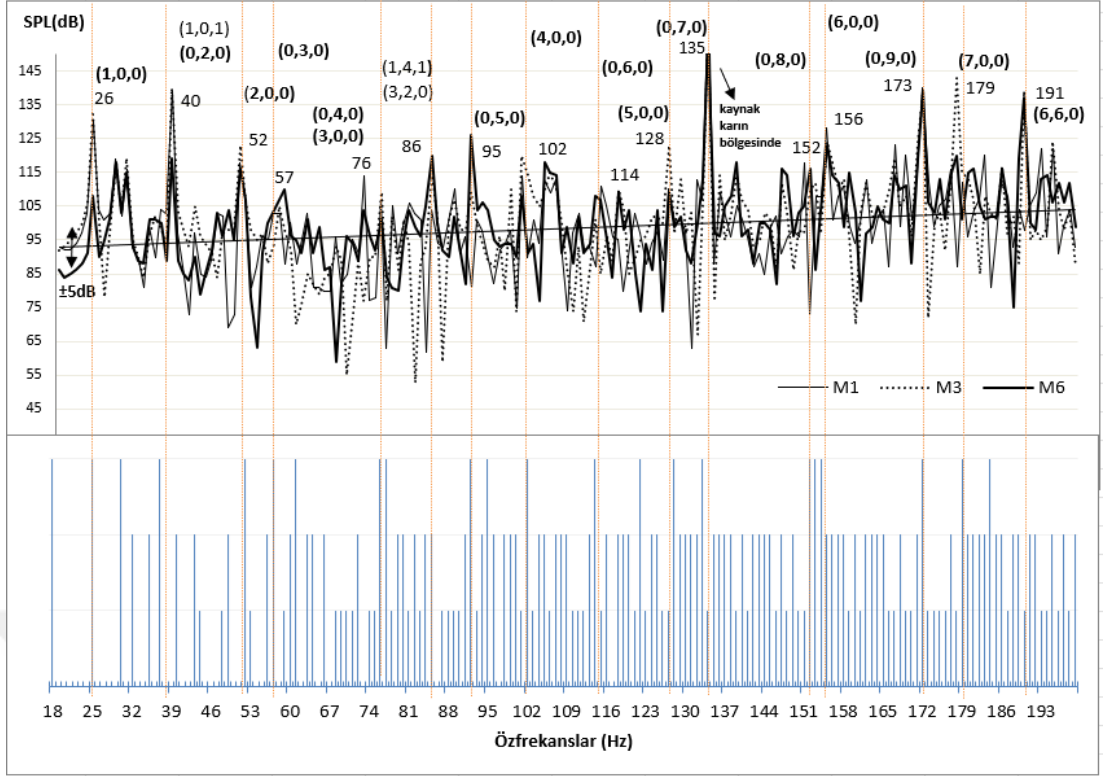
5.4.3 Hacimlerin frekans tepkisi ve mod yoğunluğu ilişkisi

Mod frekansları ve oluşan modlardaki ses basıncı dağılımı hacim ve oda geometrisine bağlı olarak değişmektedir. Şekil 5.19’da modal analiz ile elde edilen mod frekansının 98 Hz’de basınç dağılımının eş yüzey gösterimi verilmiştir. Hacimler aynı mod frekansında karşılaştırıldığında prova odasında enerjisi en yüksek mod tipi olan eksenel modun (0,2,0) olduğu görülmektedir. Stüdyo odasında ise hacmin daha büyük olması nedeniyle, oluşan mod yollarının plan geometriindeki düzensizliklerle kırıldığı görülmektedir. Fakat düzensiz geometri ve nispeten daha büyük bir hacme sahip olmasına rağmen, odanın köşe ve kenar noktalarında (karın bölgelerinde) yüksek basıncın olduğu görülmektedir.



Şekil 5.19 : 98 Hz’de her bir hacimdeki ses basınç düzeyi dağılımı (SPL, dB) a) Stüdyo odası b) Prova odası

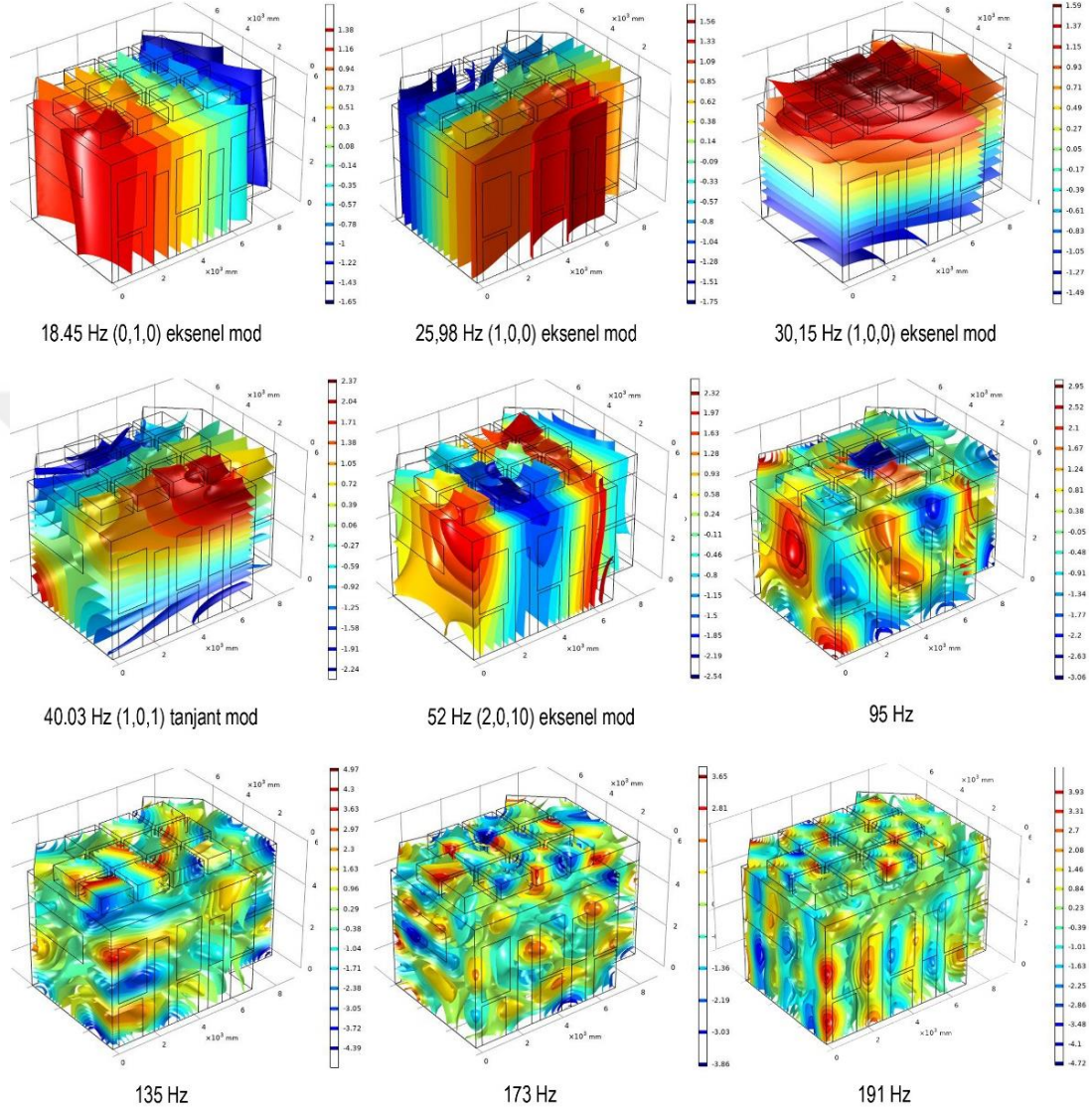
Şekil 5.20’de stüdyo odasında kaynak L1 konumundayken M1, M3 ve M6 alıcı noktaları olmak üzere 3 noktada oda sönümlenmesinin göz ardı edildiği rijit koşulları için frekans tepkisi alınmıştır. Rijit koşullarda hesaplanmasının nedeni tepe yapan frekansların belirlenerek odanın boyut ve geometrisi ile belirlenen modal karakterinin ortaya konmasıdır. Düzensiz bir plan şemasına sahip odaların modal karakterinin belirlenmesi düzgün bir geometriye göre daha zordur. Mod yollarının kırılması nedeniyle tepe yapan modların belirginliği azalmaktadır. Oda modal karakteri incelendiğinde, özellikle en yüksek enerji düzeyine sahip ilk eksenel modların (1,0,0-0,1,0 - 0,0,1) katlarına karşılık gelen frekanslarda belirgin bir şekilde 3 alıcı noktasında da tepe olduğu görülmektedir. Eksenel modların olduğu doğrultulara bakıldığında, birbirine paralel olan uzun kenar doğrultusunda konumlanan duvarlar arasında oluşan eksenel mod (0,1,0) ve katlarında frekans tepkisindeki tepelerin daha yüksek olduğu görülmektedir. Diğer kısa yönde ise açılı ve kırık duvar tasarımı nedeniyle mod yolları süresizleşmiş, frekans tepkisindeki tepe etkisi zayıflamıştır. Eksenel modların etkisiyle frekans cevabındaki tepe oluşumuna ek olarak L1 kaynağının karın bölgesinde konumlanması nedeniyle mod tahriki bütün alıcı noktalarında artmış ve 135 Hz’de en yüksek tepe değeri oluşmuştur (Şekil 5.22). Modların etkisiyle enerjinin bu modal frekanslarda yoğunlaşması nedeniyle, diğer frekanslarda enerjinin azaldığı ve bu nedenle modal frekansı takip eden bantlarda vadilerin olduğu gözlenmektedir. Aynı zamanda paralel yüzeyler arası oluşan ilk sıra mod frekansı (18 Hz- 0,1,0) ve katlarında oluşan enerji artışına ve diğer frekanslardaki enerji azalmasına bağlı olarak, sönümlenmenin olmaması durumunda, bu tonların daha fazla işitilmesi nedeniyle 18 Hz ve katlarında renklenme oluşacaktır.



Şekil 5.20 : Stüdyo odasında rijit sınır koşulu ile kaynak L1 konumundayken M1, M3 ve M6 alıcı konumlarında elde edilen frekans tepkisinin mod dağılımı ile karşılaştırması

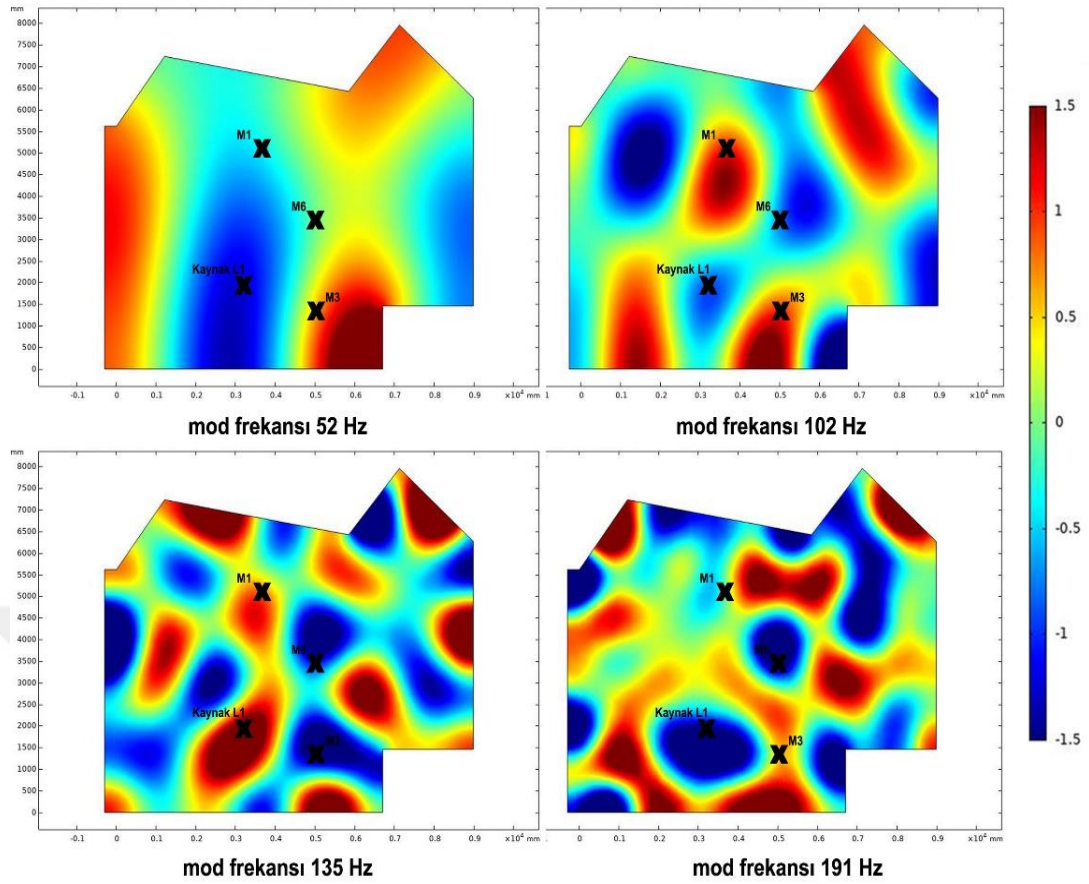
Şekil 5.21’de tepe değerlerinin en yüksek olduğu belirli mod frekanslarına ait hacim içerisindeki ses basıncı dağılımı verilmiştir. En uzun kenar doğrultusunda oluşan ilk sıra modu (0,1,0) 18 Hz’de oluşmuştur. Karşı duvarın paralel olması nedeniyle de sonraki sıra modlarda enerji taşımaya devam etmiş, yine frekans tepkisinde bütün alıcı noktalarında tepe oluşturmuştur. 26 Hz’de (1,0,0) kısa kenar doğrultusunda basınç dağılımına bakıldığında plan düzleminde kontrol odası duvarının dışa doğru kırıklı olması ve dış cephe tarafındaki iç kabuğun içeri doğru girinti yapmış olması ile bu yöndeki mod yollarının enerji taşınımı zayıflamıştır. Şekil 5.21’de belirtilen 18 Hz, 26 Hz, 30 Hz, 40 Hz, 52 Hz gibi çok alçak frekanslarda dalga boyu oda boyutlarına göre yüksek olduğu için dalganın kırılması ancak oda geometrisi ile sağlanabilmektedir. 18 Hz, 26 Hz ve 30 Hz’de sırasıyla (0,1,0), (1,0,0) ve (0,0,1) eksenel modlar oluşmaktadır. Sonrasında teğet, ikinci sıra eksenel modlar (2,0,0) ve eğik modlar oluşmaktadır. Düşeyde oluşan modların, tavanda bulunan kaset kirişli döşemeden kaynaklı oluşan form nedeniyle zayıf olduğu ve frekans tepkisindeki etkisinin daha az olduğu görülmektedir. 95 Hz ve daha üst frekanslarda ise dalga boyunun azalmasına bağlı olarak dalga kırılmasının arttığı ve odadaki ses basıncı dağılımı arasındaki

farklılıkların azaldığı görülmektedir. Fakat oda yüzeylerine ve köşe noktalarına bakıldığında yine yüksek basınç noktalarının oluştuğu ve düzenli aralıklarla kendini tekrar ettiği görülmektedir.



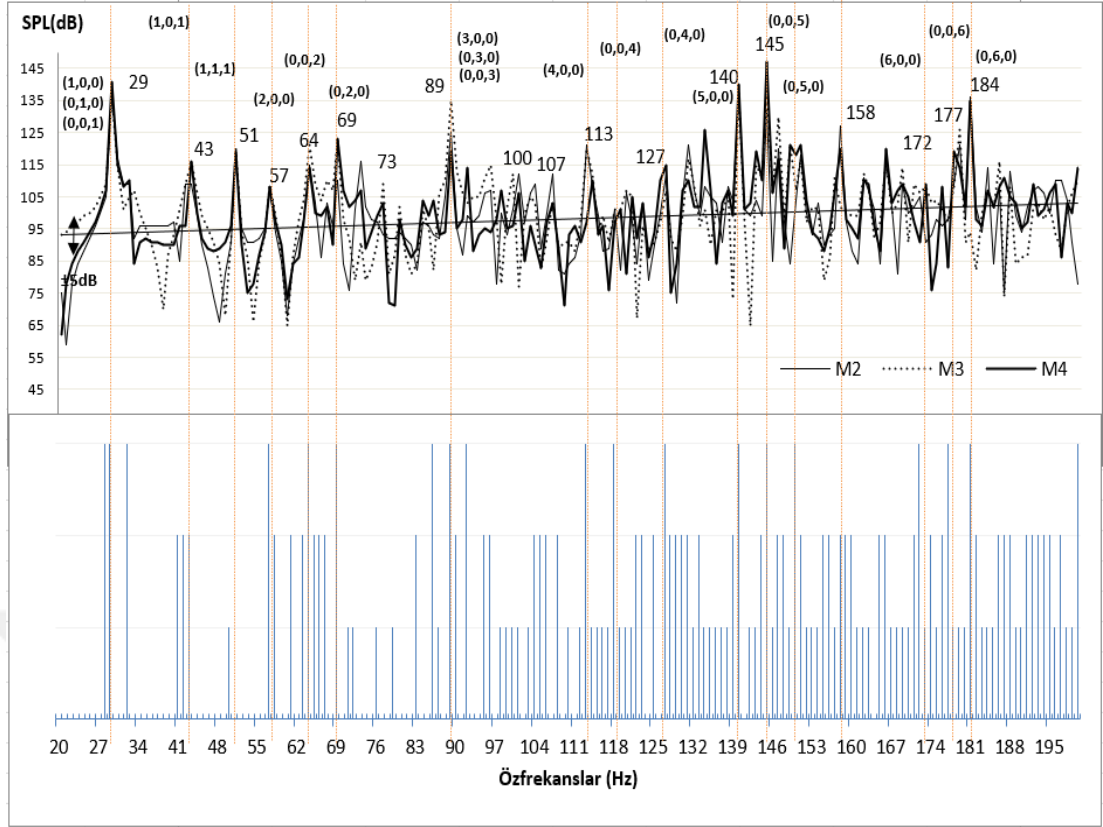
Şekil 5.21 : Stüdyo odası mod analizi sonucu elde edilen ses basıncı (Pa) dağılımı eş yüzey gösterimi

Şekil 5.22’de L1 kaynak konumundayken FDFEM analizinden elde edilen tepe değeri yüksek olan modal frekanslara ait ses basınç dağılımı verilmiştir. Eksenel modların etkisiyle frekans cevabındaki tepe oluşumuna ek olarak L1 kaynağının karın bölgesinde konumlanması nedeniyle mod tahriki bütün alıcı noktalarında artmış ve 135 Hz’de en yüksek tepe değeri oluşmuştur. Benzer şekilde diğer 52 Hz, 102 Hz ve 191 Hz’de kaynak konumunun yüksek basınç noktasında olduğu görülmektedir. Alıcı konumunun karın noktasına mesafesine göre ses basıncı düzeyi artıp azalmaktadır.



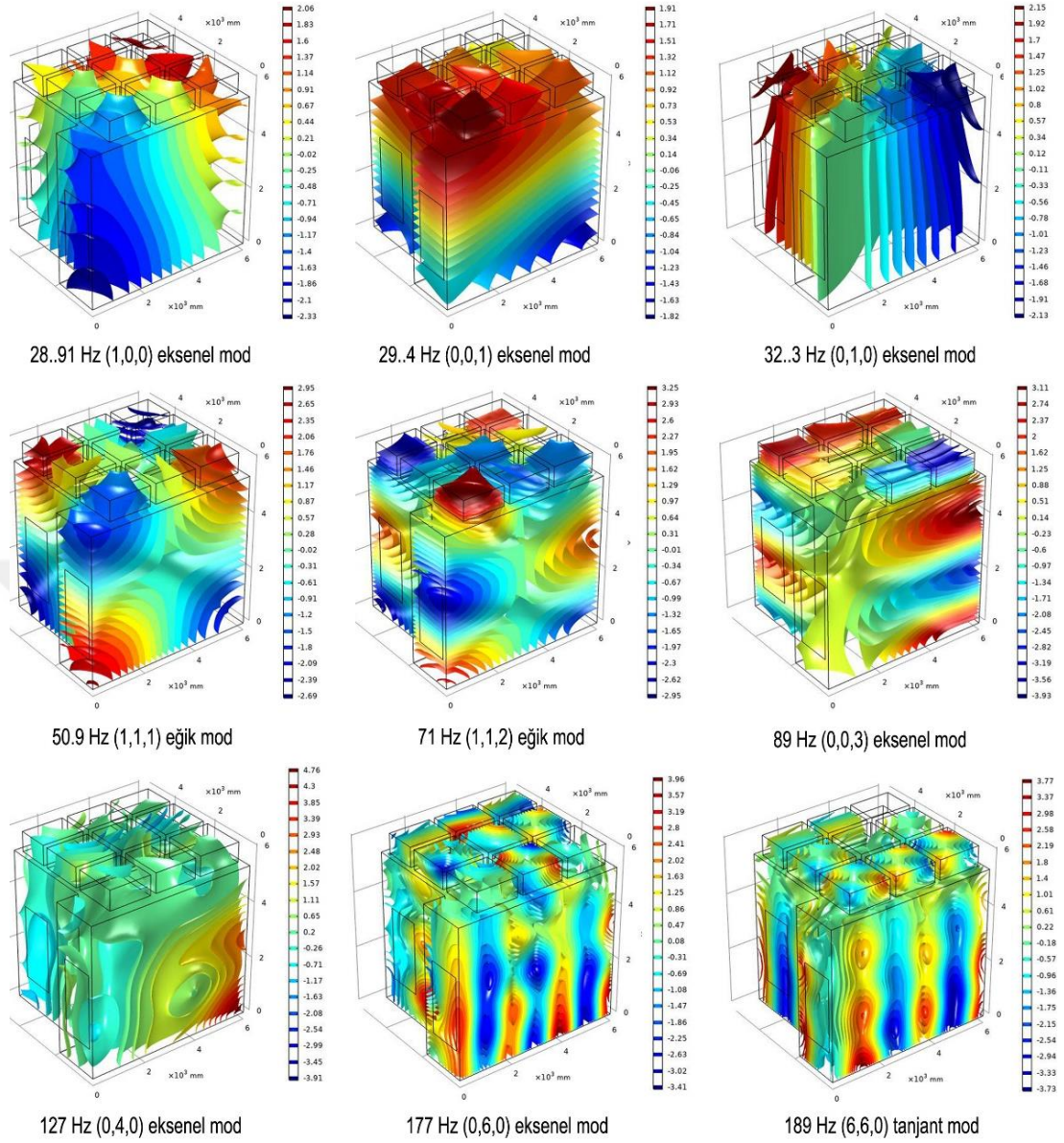
Şekil 5.22 : L1 kaynak konumunda iken 52 Hz, 102 Hz, 135 Hz ve 191 Hz de ses basıncı (Pa) dağılımı ve alıcı noktalarının konumu

Şekil 5.23'te prova odasında kaynak L1 konumundayken M2, M3 ve M4 alıcı noktaları olmak üzere 3 noktada oda sönümlenmesinin göz ardı edildiği rijit koşullarda frekans tepkisi alınmış ve mod dağılımı ile karşılaştırılmıştır. Eksenel modların olduğu modal frekanslarda tepe oluşumu gözlenmektedir. Tepe oluşumu enerjinin bu modal bantlarda toplanması nedeniyle oluşmaktadır. Bu neden her bir tepe oluşumu sonrasında frekans tepkisinde çökme görülmektedir. Stüdyo odasının frekans tepkisi ile karşılaştırıldığında, tepe oluşumunun daha belirgin olduğu ve 3 alıcı noktasında da yüksek düzeyde olduğu görülmektedir. Odanı kübik boyutlarda olması sebebiyle ilk sıra modları yaklaşık 30 Hz bandında çakışmış, ikinci sıra modlar 60 Hz bandında sıralanmış, 90 Hz civarında üçüncü sıra modlar çakışmış, dördüncü sıra modlar 120 Hz civarında yaklaşmış ve beşinci sıra modlar 150 Hz civarında sıralanmıştır. Dolayısıyla 30 Hz ve katlarında ya da harmoniklerinde ses enerjisinin toplandığı, diğer bantlarda düzensiz dağılım nedeniyle azalarak vadi yaptığı görülmektedir. Bu nedenle oda sönümlenmesinin olmaması durumunda bu bantlardaki sesler daha çok işitileceği için renklenme oluşacaktır.



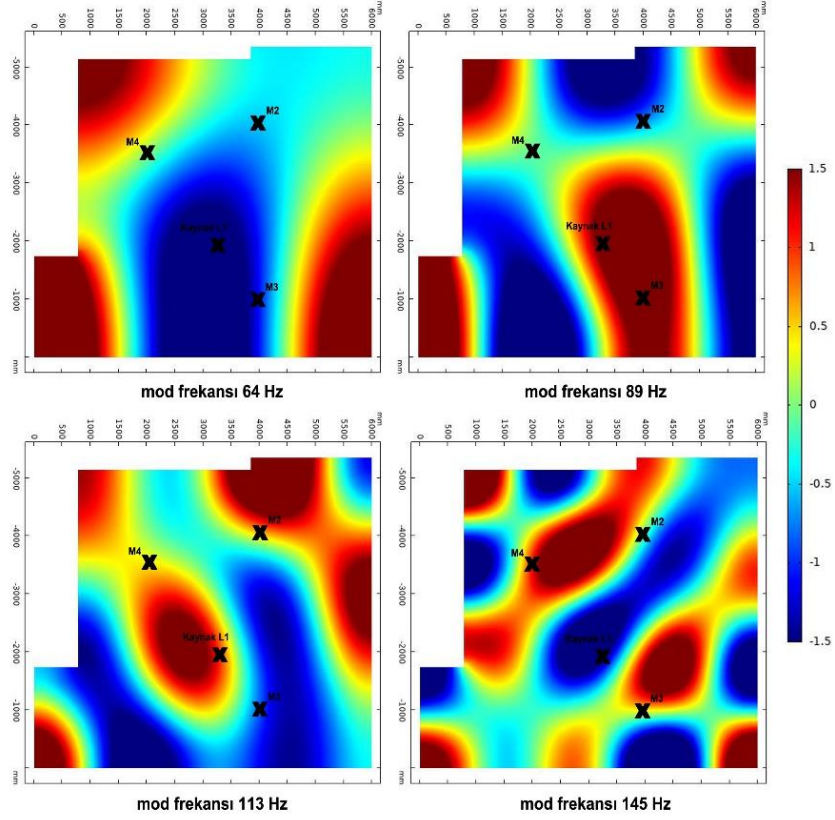
Şekil 5.23 : Prova odasında rijit sınır koşulu ile kaynak L1 konumundayken M2, M3 ve M4 alıcı konumlarında elde edilen frekans tepkisinin mod dağılımı ile karşılaştırması

Şekil 5.24'te tepe değerlerinin en yüksek olduğu belirli mod frekanslarına ait hacim içerisindeki ses basıncı dağılımı iso eğriler ile verilmiştir. Kırmızı ile belirtilen bölgeler yüksek basınç noktası, mavi ile belirtilen bölgeler ise alçak basınç noktalarıdır. Diğer renkler ise bu uç değerler arasında değişmektedir. Oda geometrisine, boyut oranına ve hacme bağlı olarak 30 Hz civarı ilk sıra eksenel modlar oluşmaktadır. İlk mod frekansı en uzun boyut ile ilişkilidir. Eksenel mod oluşumu ya da ilk sıra modların oluşumu odanın küçülmesine bağlı olarak daha yüksek frekanslarda oluşarak işitme aralığına doğru kaymaktadır. Oda geometrisinin düzgün olması nedeniyle dalga boyu küçülse de alçak ve yüksek basınç bölgelerinin düzenli bir şekilde tekrar ettiği görülmektedir. Özellikle köşe ve kenarlarda enerjinin toplandığı alanlar belirlemektedir. 50 Hz de kaset formu dalga kırılmasında etkin değilken 70 Hz de kaset formunun da dalga kırılmasında etkili olduğu görülmektedir. Oda boyut oranları 1:1:1 olması nedeniyle eksenel modlar çakışmaktadır, fakat plan düzleminde cephe kısmında yer alan çıkma nedeniyle eksenel modların yerleşiminde kaymalar olmuş, mod yollarının kırılması sağlanmıştır.



Şekil 5.24 : Prova odası modal analiz sonucu elde edilen ses basıncı (Pa) dağılımının eş yüzey gösterimi

Şekil 5.25'te prova odasında kaynak L1 konumundayken FDFEM analizinden elde edilen h: 120 cm'de yerleştirilen iki boyutlu ızgara sistemde, tepe değeri yüksek olan modal frekanslara ait ses basınç dağılımı verilmiştir. Eksenel modların etkisiyle frekans cevabındaki tepe oluşumuna ek olarak L1 kaynağının karın bölgesinde konumlanması nedeniyle mod tahriki bütün alıcı noktalarında artmış ve 145 Hz'de en yüksek tepe değeri oluşmuştur. Dolayısıyla kaynak noktasının mod dağılımına bağlı olarak uygun yer seçiminin alıcı noktasının konum seçiminden daha önemli olduğu görülmektedir.

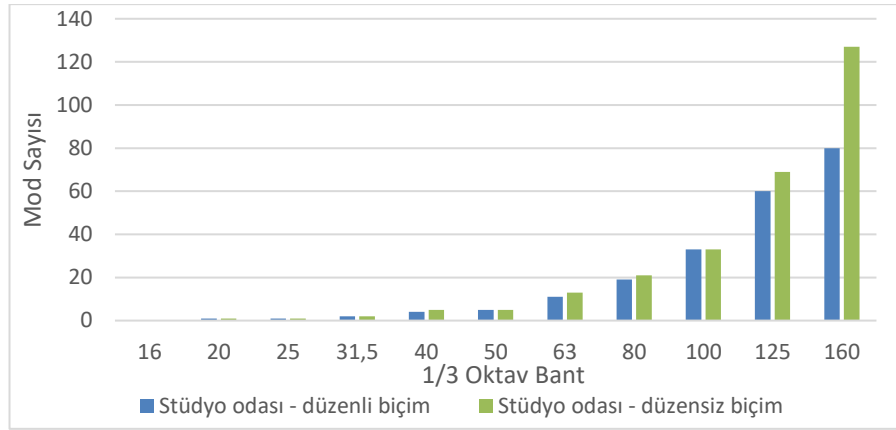


Şekil 5.25 : L1 kaynak konumunda iken 64 Hz, 102 Hz, 135 Hz ve 191 Hz de ses basıncı (Pa) dağılımı ve alıcı noktalarının konumu

5.5 Parametrik Analiz Çalışması ve Sonuçları

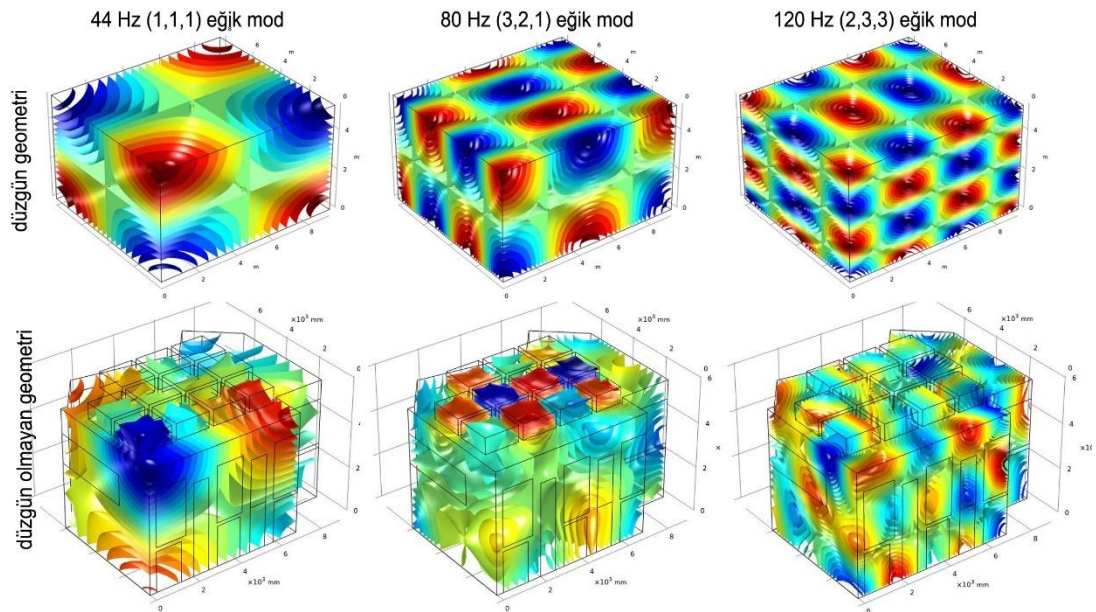
5.5.1 Çalışma 1: Geometrinin ses alanına etkisi

Stüdyo odasının kullanım amacının kayıt stüdyosu olması nedeniyle geometrisi düzensiz bir biçimde tasarlanmıştır. Odanın düzgün geometriye sahip varyasyonu, duvarlar paralel olacak şekilde, dörtgensel plan şemasında, oda boyut ve oranları aynı kalacak şekilde modellenmiştir (x:6.7m, y:9m, h:5.6m). Mevcut durumdaki geometri ve düzgün geometriye sahip varyasyonu karşılaştırılarak düzensizliklerin mod dağılımındaki, mod yoğunluğundaki ve hacim içerisindeki basınç dağılımındaki etkisi irdelenmiştir. Şekil 5.26’da düzgün ve düzensiz geometriye sahip odaların 1/3 oktav bantta mod sayısı verilmiştir. Buna göre 100 Hz’ye kadar oluşan mod sayısının ve mod yoğunluğunun değişmediği görülmektedir. Fakat düzensizliklerin boyutuna bağlı olarak oluşan kırılmalar nedeniyle yeni modların oluşması üst oktav bantlardaki yoğunluk ve mod sayısı artmıştır. Bu nedenle modların frekans bandında yayılmasıyla çakışma oranı da azalmakta ve frekans tepkisinde oluşturduğu tepe değerleri azalmaktadır.



Şekil 5.26 : Stüdyo odası düzenli biçim ve düzensiz biçim plan şemalarına göre 1/3 oktav bantta mod sayısı dağılımı

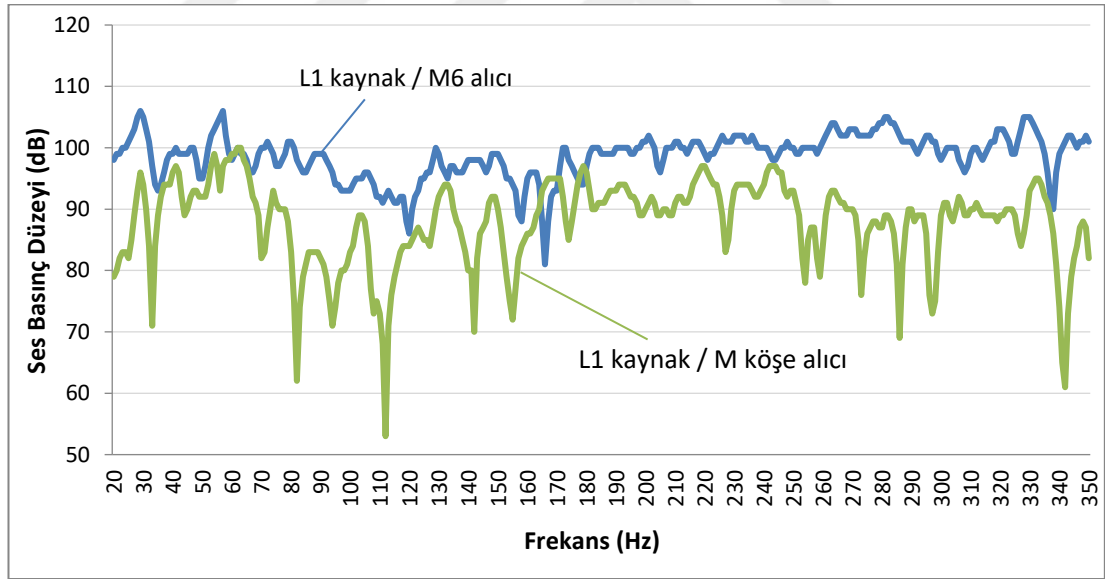
Şekil 5.27’de düzenli biçime sahip oda ile düzensiz biçime sahip iki odanın 44 Hz, 80 Hz ve 120 Hz’de mod analizinden elde edilen ses basıncı dağılımı karşılaştırması verilmiştir. İki hacimde elde edilen mod frekanslarının basınç dağılımına bakıldığında boyut oranlarının odanın geometrisinden bağımsız olarak mod karakterinde belirleyici olduğu görülmektedir. Örneğin 44 Hz’de her iki hacimde de köşelerde yüksek basıncın olduğu görülmektedir. Ayrıca bu frekansta dalga boyu tavanındaki kaset formundan çok daha büyük olduğu için tavan düz bir yüzey gibi davranmıştır. 80 Hz’de ise kaset formu etkin olmaya başlamıştır. Dolayısıyla geometrinin etkisiyle plan şemasında oluşturulan duvar düzensizlikleri etkisiyle ilk sıra aksenal modlarda değil fakat üst sıra aksenal modların ya da teğet modların (63 Hz’den itibaren) belirginliği azalmaktadır.



Şekil 5.27 : Düzenli ve düzensiz olmayan geometrilerin aynı frekanslarda ses basıncı (Pa) dağılımı eş yüzey gösterimi

5.5.2 Çalışma 2: Kaynak ve alıcı konumunun ses alanına etkisi

Ses alanında, rezonanslara bağlı oluşan karın ve düğüm bölgeleri ve kaynak konumunun bu bölgelerde bulunması mod tahrikini ve alıcı noktasındaki ses basınç düzeyini değiştirmektedir. Aynı zamanda yakın yüzeylerden gelen güçlü yansımalar ile ses basınç düzeyindeki farklılıklar ve sapmalar artmaktadır. Kaynak ya da alıcı noktasının karın bölgesinde olması basınç farklılıklarını artırmakta, düğüm bölgesinde olması ise azaltmaktadır. Simetrik, merkez ya da köşe bölgeler karın bölgesidir. Oda sönümlenmesi dahilinde (mevcut durumda) FDFEM analizinde kaynak L1 konumundayken karın ve düğüm noktasına yerleştirilen iki alıcının frekans tepkisi karşılaştırılmıştır. Köşe alıcısının kaynağa mesafesinin daha fazla olması nedeniyle ortalama ses basınç düzeyi daha düşük çıkmıştır. Bununla birlikte konumu düğüm bölgesine yakın olan M6 alıcı noktasında diğer köşe alıcısına göre ses basınç düzeyi sapmalarının daha az olduğu görülmektedir. İdeal durumda sapmaların $\pm 4-5$ dB aralığında değişmesi beklenmektedir (EBU Tech 3286 2000). Fakat konum etkisiyle değer aralığının çok üzerinde bir sapma olduğu görülmektedir.

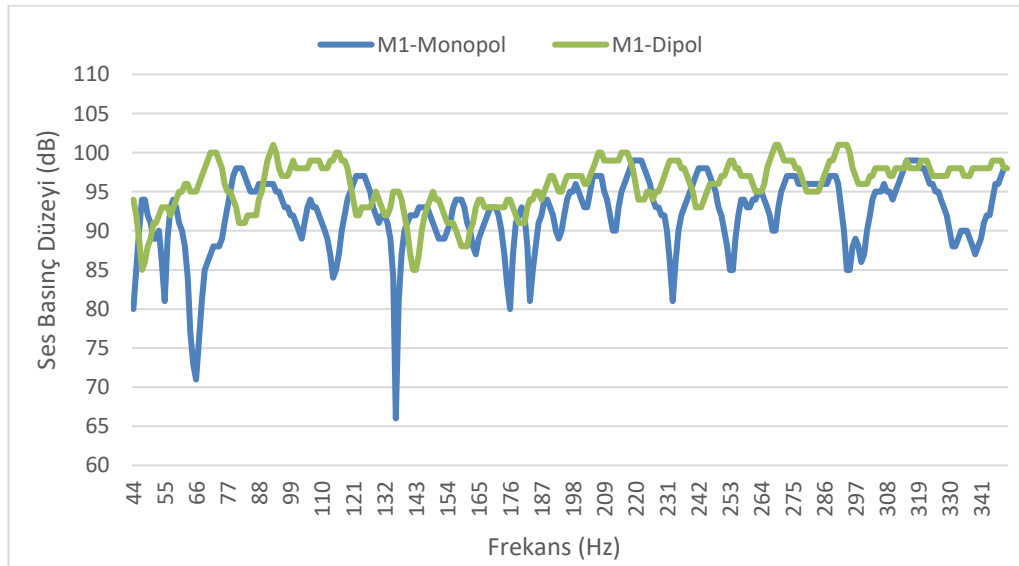


Şekil 5.28 : Kaynak noktası L1 konumunda iken alıcı noktaları M6 ve M köşe 'ye ait frekans tepkisi karşılaştırması

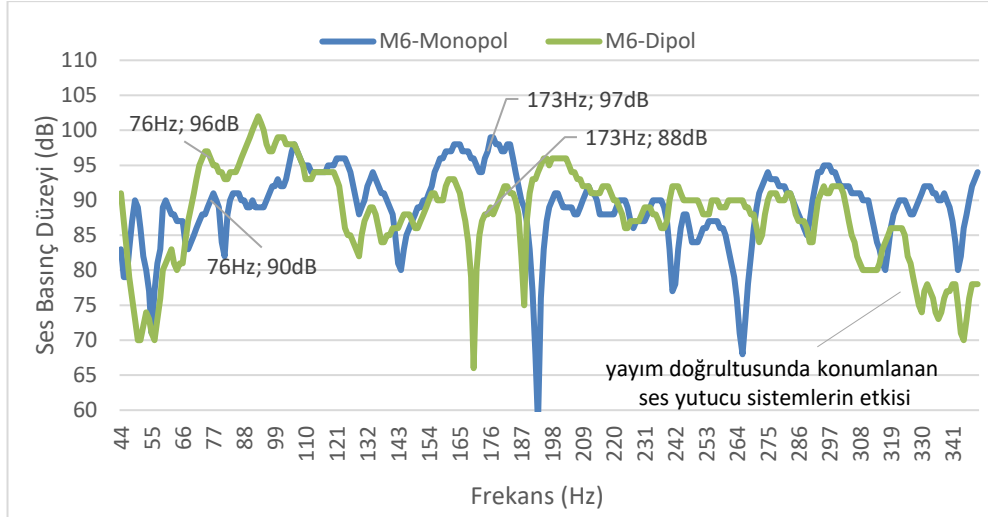
5.5.3 Çalışma 3: Yayın karakterinin ses alanına etkisi

Farklı yayım karakterinin ses alanına etkisinin irdelenmesi için aynı kaynak konumunda (L1) monopol ve dipol yayım yapan iki kaynağın oluşturduğu ses alanları alıcı bazında frekans tepkisi ve plan düzleminde ses basıncı dağılımına bakılarak karşılaştırılmıştır. Şekil 5.29'da ve Şekil 5.30'da aynı kaynak noktası (L1) ve farklı

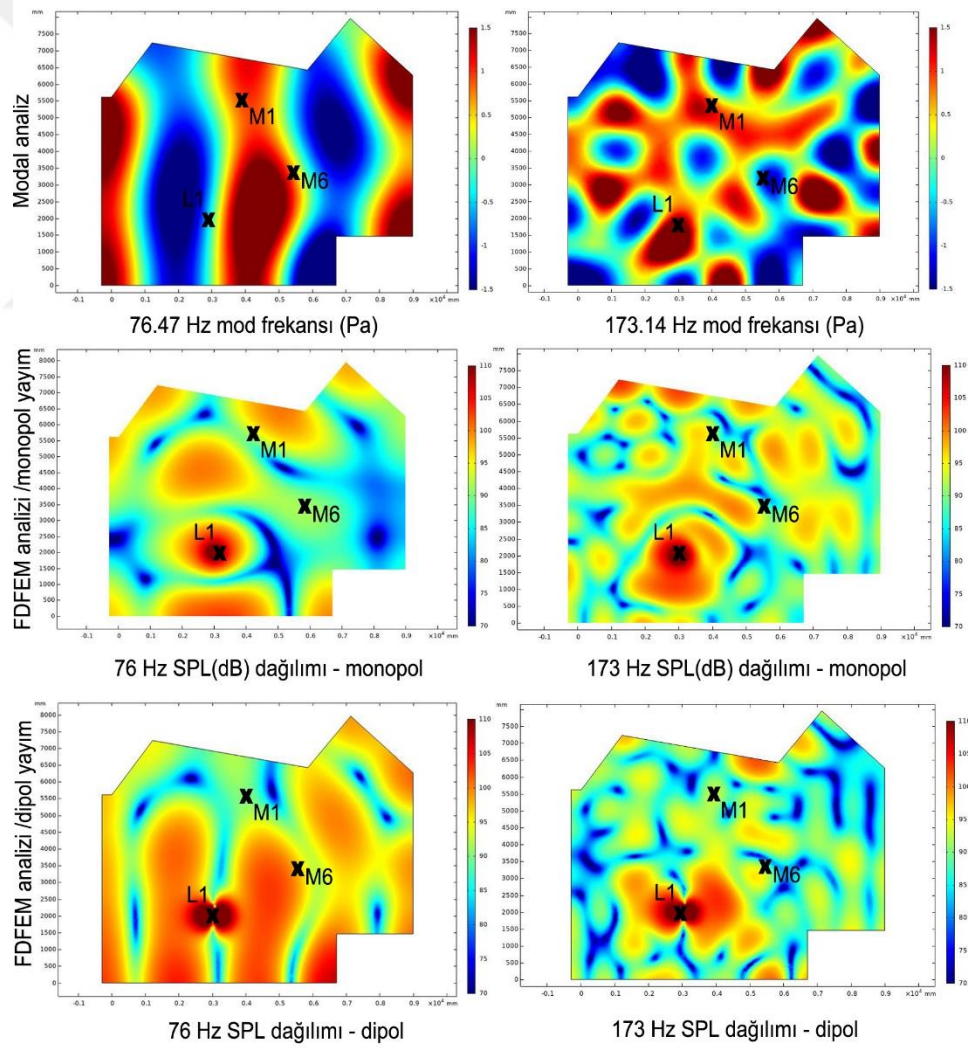
kaynak yayımı özelliğinin (monopol ve dipol) için M1 ve M6 noktalarında frekans tepkisi karşılaştırılmaları verilmiştir. Yayım özelliğinin her iki alıcı konumunda farklı etkisi olduğu görülmektedir. Şekil 5.31’de ise frekans tepkisinde tepe oluşan iki frekans 76 Hz ve 176 Hz’de plan düzleminde ses basıncı dağılımı verilmiştir. Şekilde ilk sırada mod analizi sonucu elde edilen basınç dağılımı, ikinci sırada monopol kaynak yayımında FDFEM analizi sonucu ses basıncı dağılımı, üçüncü sırada ise dipol kaynak yayımı sonucu elde edilen ses basıncı dağılımı verilmiştir. Buna göre yayım doğrultusunun modal etkisine bağlı olarak frekans tepkisini değiştirdiği görülmektedir. Kaynak yayım doğrultusunda daha fazla mod tahriki olduğu için bu doğrultuda bulunan alıcı noktalarında frekans tepkisindeki sapmalar daha fazla olmuştur. Diğer bir yandan kaynak yayım doğrultusunda bulunmayan alıcı noktasında ise mod tahriki daha az olduğu için frekans tepkisindeki sapmalar daha azdır. Bununla birlikte oda boyut ve oranlarına bağlı oluşan mod etkisinin bir sonucu olarak tepe ve vadilerin olduğu frekanslar kaynak yayım özelliğinden bağımsız olarak her iki frekans tepkisinde benzerlik göstermektedir. Oda geometrisinin de yönelimle bir ilişkisi olarak kaynak yayım doğrultusunda yüzeyler arası paralellik var ise bu yönde daha çok mod tahriki olduğundan yine yayım doğrultusunda frekans tepkisinde daha fazla sapma oluşmaktadır. Bununla birlikte kaynak yöneliminde plan düzlemindeki düzensiz geometri oluşan mod gücünü azalttığından yönelim doğrultusunda sapmalar, kırılmalara ve azalan mod enerjisine bağlı olarak azalmaktadır.



Şekil 5.29 : L1 kaynak konumu için monopol ve dipol kaynak tipine göre M1 alıcı noktasında frekans tepkisi karşılaştırması



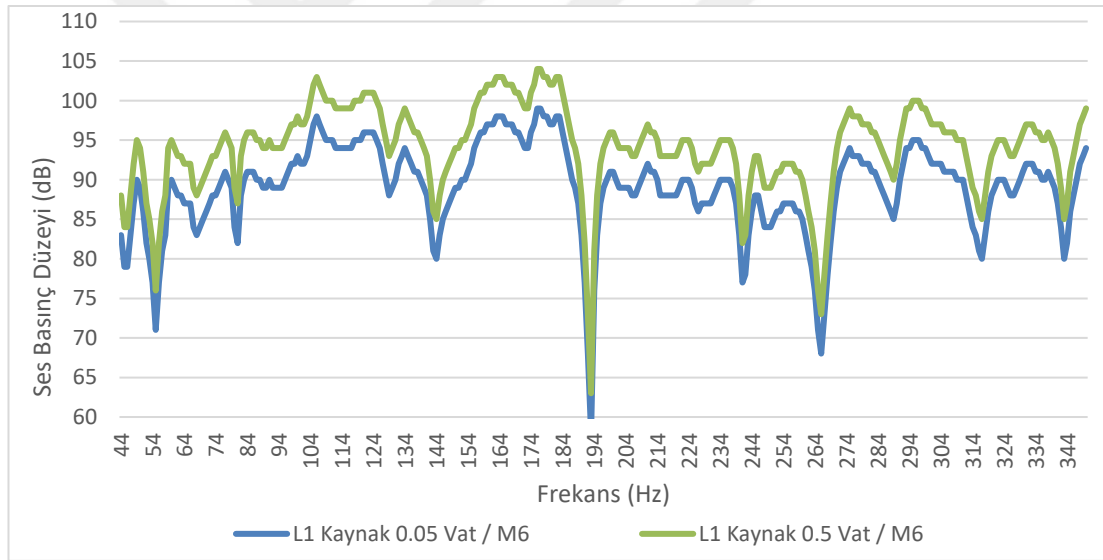
Şekil 5.30 : L1 kaynak konumu için monopol ve dipol kaynak tipine göre M6 alıcı noktasında frekans tepkisi karşılaştırması



Şekil 5.31 : 76 Hz ve 173 Hz’de oluşan mod frekanslarında basınç dağılımı (Pa) ve yayım özelliğine bağlı değişen SPL (dB) dağılımı

5.5.4 Çalışma 4: Kaynak ses gücünün ses alanına etkisi

Rezonansların algılanabilirliği, modal bant genişliği ile ters orantılı, mod frekansındaki tepenin keskinliği ile doğru orantılıdır. Keskinlik ise oda sönümlenmesine bağlıdır. Şekil 5.32’de L1 kaynak konumundayken ses gücü alçak (0.05 Vat) ve yüksek (0.5 Vat) olması durumunda M6 alıcı noktasında oluşan frekans tepkileri karşılaştırılmıştır. Kaynak gücü artırıldığında frekans tepkisindeki örüntü değişmeden ses basınç düzeyi bütün frekanslarda 5 dB artmıştır. Rezonansların keskinliği oda sönümlenmesi ile ilişkili olduğu için ses gücü artışında genlik artmış ve buna bağlı olarak frekans bazında ses basınç düzeyi artmıştır. Fakat eş gürlük düzeyi eğrisi göz önünde bulundurulduğunda alçak frekanslarda 5 dB ses basıncı düzeyi artışı 1000 Hz’de 10 dB ses basıncı düzeyi artışına tekabül etmektedir. Dolayısıyla bu da alçak frekanslardaki sesin daha fazla algılanmasına neden olacaktır. Bununla birlikte rezonansların algılanabilirliğine bir etkisi yoktur.

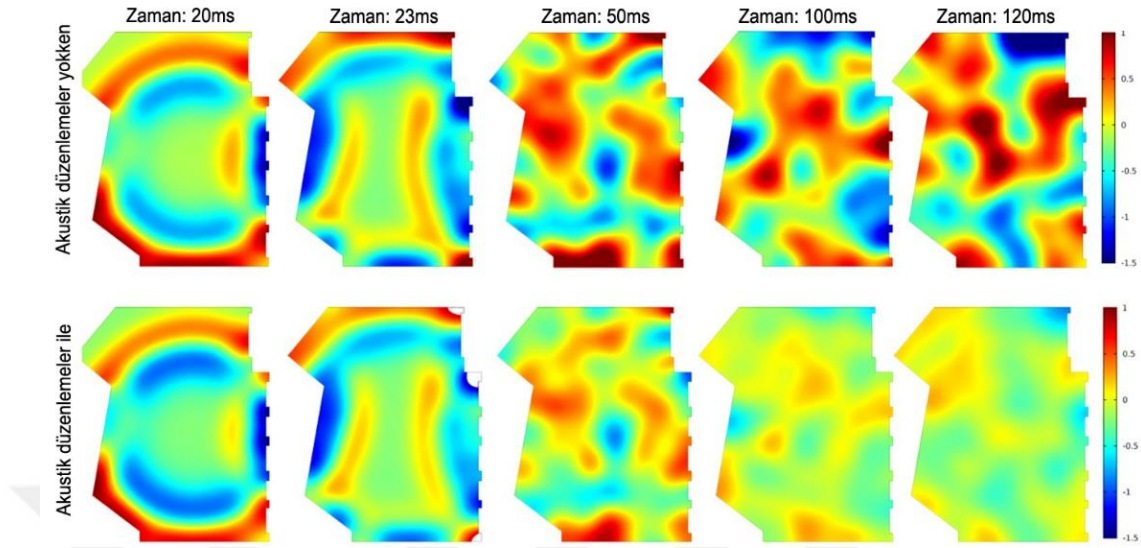


Şekil 5.32 : L1 kaynak konumunda ve M6 alıcı noktasında ses gücüne bağlı değişen frekans tepkisi

5.5.5 Çalışma 5: Oda sönümlenmesinin ses alanına etkisi

Oda sönümlenmesinin etkisinin irdelenmesi için duvarlarda ve tavanda kullanılan akustik düzenleme sistemleri çıkartılarak mevcut durumun bir varyasyonu oluşturulmuştur. Şekil 5.33’te TDFEM analizinde kaynak L1 konumundayken, plan düzleminde oda içerisindeki ses basıncı (Pa) dağılımı akustik düzenlemelerin olduğu mevcut durum ve olmadığı durum için verilmiştir. Buna göre, ses basıncının uzamsal dağılımının ve örüntüsünün değişmediği görülmektedir. Fakat yüzeyde bulunan

yutucu sistemlerin etkisiyle ses enerjisi azalmış, ses alanı daha homojen ve dağınık bir duruma gelmiştir.



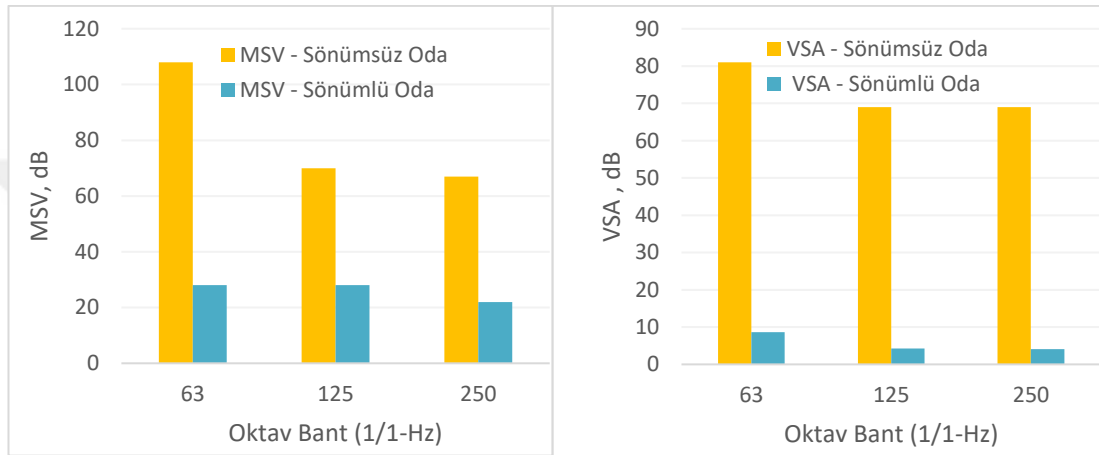
Şekil 5.33 : 125 Hz’de L1 kaynak konumunda zamana bağlı ses basıncı (Pa) değişimi (Izgara sistem yüksekliği 1.2 m alınmıştır)

TDFEM analizi sonucunda elde edilen ani uyarı yanıtı enerji-zaman eğrisine çevrilmiş, azalım hızına göre nesnel akustik parametreleri elde edilmiştir. Sönümlenmiş durum ve sönümlenmemiş duruma ait EDT, T_{20} ve T_{60} değerleri 63 Hz, 125 Hz ve 250 Hz olmak üzere alçak frekans 1/1 oktav bantta verilmiştir (Çizelge 5.6). Odanın değerlendirmesi ve aynı zamanda farklılaşan fiziksel ortamın değerlendirilmesi için düşme süresi parametreleri ve standart sapma değerlerine bakılmıştır. En çok azalımın erken düşme süresinde olduğu görülmektedir. Aynı zamanda 6 alıcı noktasının standart sapma değeri oda sönümlenmesi ile 0,8 s – 0,9 s aralığındayken 0,1 altına indiği görülmektedir. Dolayısı ile sönümlenme ile oda içerisindeki ses alanı dağınıklığının arttığı görülmektedir.

Çizelge 5.6 : Sönümlü oda ve sönümsüz odanın nesnel parametreler ile karşılaştırılması

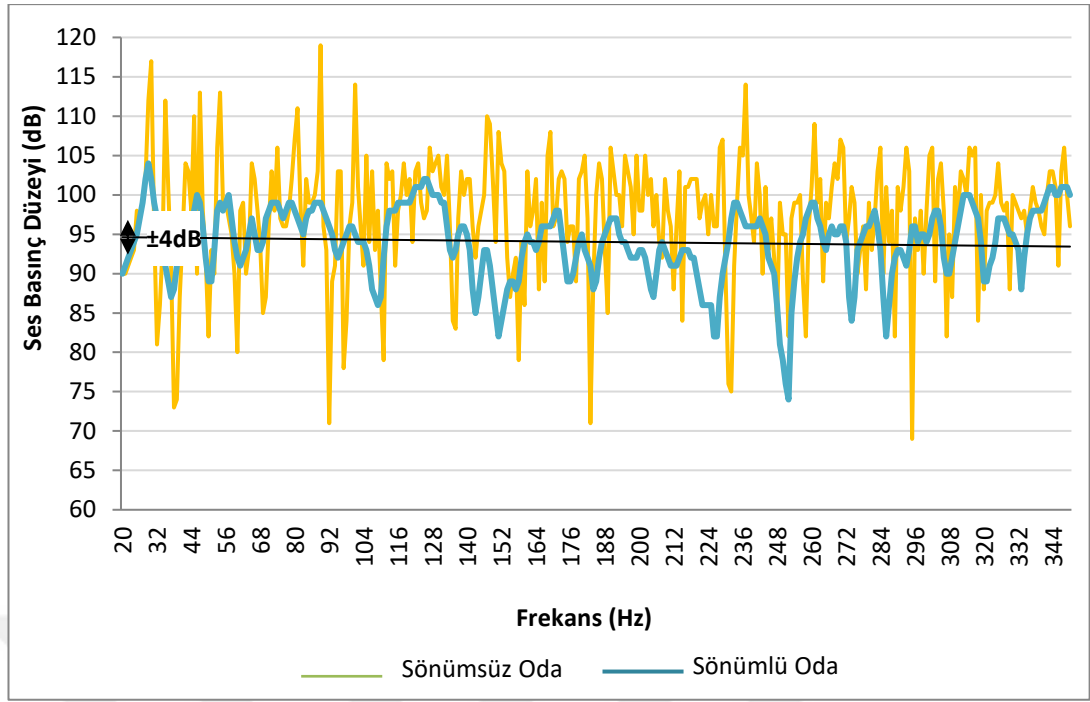
Oda Özelliği	Parametreler	Frekans (Hz)					
		63		125		250	
		Ortalama	SS	Ortalama	SS	Ortalama	SS
Sönümlenmiş Oda (Benzetim yöntemi ile elde edilen)	EDT (s)	0,84	0,11	0,67	0,09	0,42	0,11
	T_{20} (s)	0,73	0,06	0,58	0,05	0,55	0,05
	T_{60} (s)	0,62	0,03	0,76	0,05	0,58	0,04
Sönümlenmemiş Oda	EDT (s)	3,48	0,91	3,15	0,67	2,70	0,6
	T_{20} (s)	1,80	0,70	2,10	1,3	1,85	0,91
	T_{60} (s)	1,97	0,86	2,30	1,2	1,94	0,9

Akustik düzenlemenin ve oda sönümlemesinin ses alanına etkisini frekans tepkisi açısından irdelemek amacıyla MSV ve VSA ölçütleri değerlendirilmiştir (Şekil 5.34). Alıcı noktaları arasındaki varyansın ve frekans tepkisindeki sapmaların modal davranışına bağlı olarak değerlerin her iki odada en yüksek 63 Hz’de olduğu görülmektedir. MSV analizinde oda sönümlemesinin etkisi alıcılar arasındaki varyans açısından incelendiğinde, varyansın büyük ölçüde azaldığı görülmüştür. Aynı zamanda frekans tepkisindeki sağmaların değerlendirildiği VSA ölçütünde varyansın azaldığı, tepkinin düzleştiği görülmektedir.



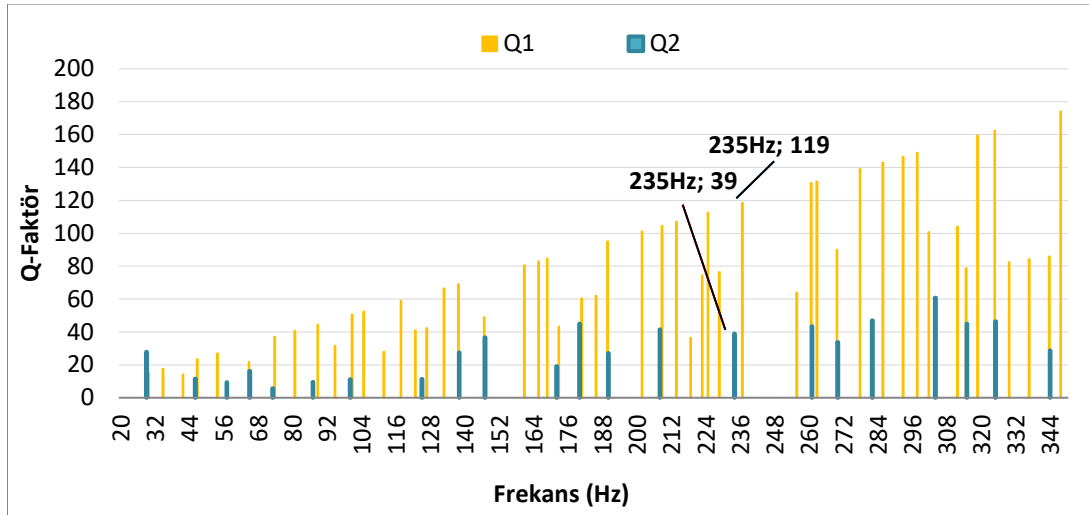
Şekil 5.34 : Stüdyo odasında sönümlenmenin etkisiyle değişen MSV ve VSA ölçütleri

Oda sönümlenmesinin etkisi alıcı bazında irdelendiğinde, L1 kaynak konumundayken M6 alıcı noktasındaki frekans tepkisi değişimi Şekil 5.35’teki gibidir. Sönümsüz odaya ait frekans tepkisinde duvar yüzeylerinden gelen güçlü yansımalar nedeniyle gelen dalga ve yansıyan dalga arasında faz çakışması olmuştur. Faz farkına göre ses basıncı çok azalmış ya da çok artmıştır. Bu da frekans tepkisinde tepe ve vadilere bağlı ses basınç düzeyi farklılıkları olmuştur. Düzey artışının yanı sıra tepe oluşumunda keskinliğin arttığı görülmektedir. Bu etkisi daha sonra ilgili ölçüt Q-Faktör ile değerlendirilecektir. Diğer yandan sönümlü odadaki frekans tepkisine bakıldığında sönümsüz odaya göre basınç düzeyinin azaldığı ve keskin tepe noktalarının azaldığı görülmektedir. Fakat ses yutucu sistemlere rağmen tepe ve vadilerin $\pm 4\text{dB}$ ’yi aştığı görülmektedir. Burada yine sönümlenmenin etkisiyle tepe oluşumundan ziyade vadi oluşumunda optimum aralığın dışına çıktığı görülmektedir. Aynı zamanda akustik düzenleme ses basınç düzeyini azaltsa da frekans tepkisindeki mod örüntüsünün, oda boyut oranlarına ve geometrisine bağlı olarak korunduğu görülmüştür.

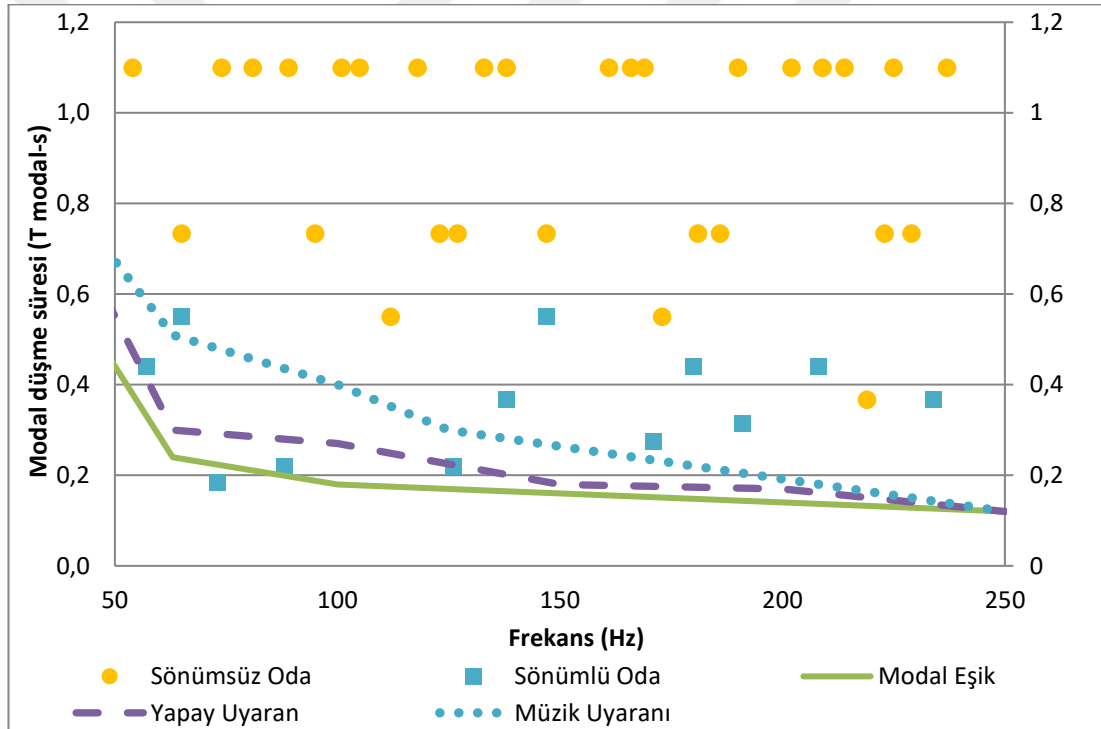


Şekil 5.35 : Stüdyo odası kaynak konumu L1 ve alıcı noktası M6 için frekans tepkisi karşılaştırması

Alıcı bazlı analizlerde tepe oluşumundaki keskinliğin artması rezonansın algılanabilirliğinin arttığını ve bu banttaki enerjinin geç sönümlendiğini göstermektedir. Şekil 5.36’da her iki durum için L1 kaynak konumu ile M6 alıcı noktasında elde edilen frekans tepkisinin Q-Faktör ölçütü ile değerlendirilmesi verilmiştir. Sönümsüz odada beklendiği üzere Q değeri orta frekanslara doğru artmakta ve Q40 ve Q140 arası değişmektedir. Diğer bir yandan yutucu sistemlerin etkisiyle azalan Q değeri ortalama olarak Q40 ve Q60 arası değişmektedir. Örneğin 235 Hz’ye bakıldığında, Q değerinin sönümlenmenin etkisiyle Q119’dan Q39’a düştüğü görülmektedir. Aynı banttaki Q değişiminin yanı sıra grafikte sönümlü odada bazı bantlardaki tepe oluşumun olmadığı görülmektedir. Her iki durumda da eşik değeri olan Q16’nın üzerinde değerler saptanmıştır. Q-Faktör ile tepe oluşumundaki keskinlikler irdelenirken Modal Düşme Süresi ile rezonansların algı ile ilişkisi değerlendirilmiştir. Şekil 5.37’de sönümlü ve sönümsüz odaya ait M6 alıcı konumunda frekansa bağlı Modal Düşme Süresi (s) verilmiştir. Oda sönümlenmesi sonucunda rezonansların algılanabilirliğinin düştüğü görülmektedir. Bununla birlikte 150 Hz ve 250 Hz arası oda sönümlenmesinde elde edilen MT(s) değerleri eşik değerinin biraz üzerindedir. Modal düşme süresi analizi, referans değerlerin elde edildiği çalışmanın 20 Hz ve 250 Hz aralığı ile sınırlı tutulmuş olması nedeniyle bu aralıklarda yapılmıştır.



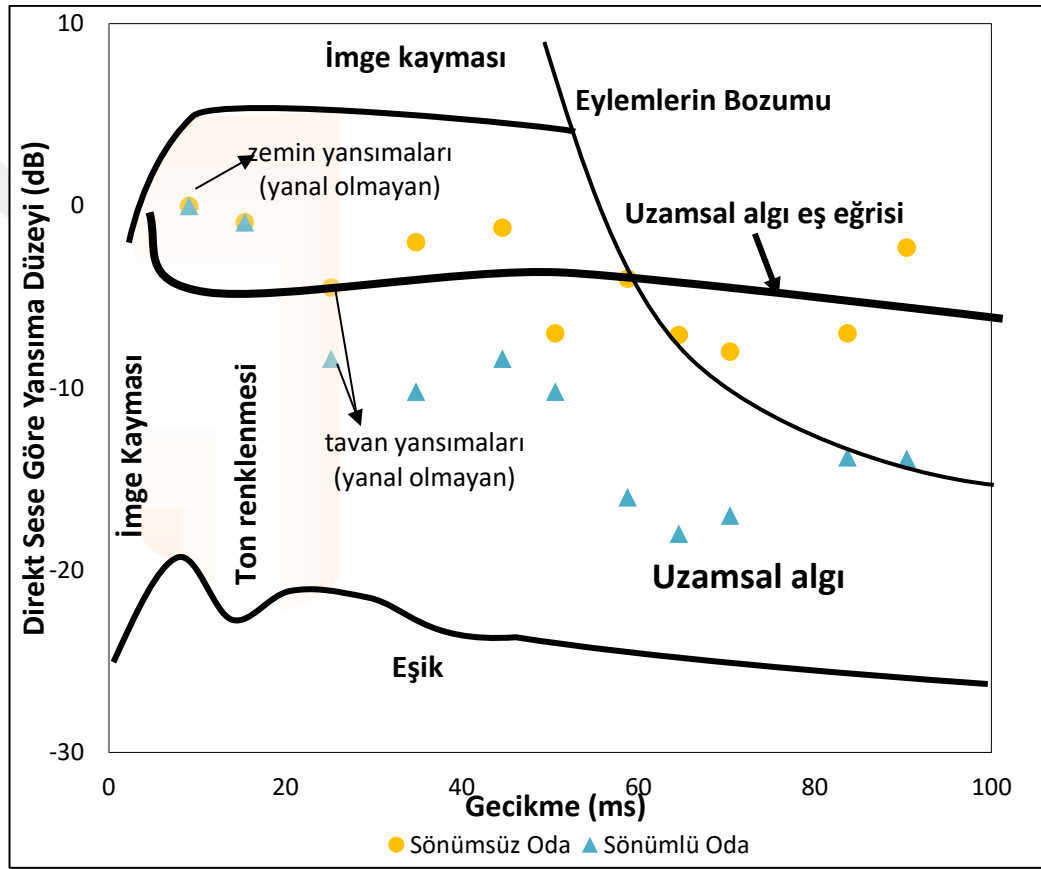
Şekil 5.36 : Stüdyo odası kaynak konumu L1 ve alıcı noktası M6 için Q değeri karşılaştırması, Q1- sönümsüz (Q1) ve (Q2) sönümlü



Şekil 5.37 : Sönümsüz oda ve mevcut durum L1 kaynak konumu ve M6 alıcı konumu için Modal Düşme Süresi (s) karşılaştırması

Alıcı bazlı yapılan diğer bir analiz de yansımaların algılanabilirliğine ilişkindir. TDFEM analizinde elde edilen ani uyarı yanıtı 125 Hz 'de oktav bantta filtrelenerek Barron'un ilgili grafiği ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.38). Alıcı noktasına gelen yansımanın direkt sese göre genliği ve gelme süresi elde edilmiştir. Aynı zamanda süreye ve zamana bağlı ses basıncı dağılımına bakılarak yansımanın hangi yüzeyden geldiği irdelenmiş, bilgiler grafiğe işlenmiştir. Renklenme ile belirtilen bölgeye gelen

yansımaların zemin ve tavan düzleminden kaynaklandığı görülmektedir. Her iki durumda da zemindeki sönümlenme değişmediğinden bu yansıma düzeyi sabit kalmıştır. Fakat tavandan gelen yansımalar sönümsüz odada betonarme yüzeyden gelmektedir ve bu nedenle renklenmeye neden olmaktadır. Tavanda uygulanan yutucu paneller sonrasında ise uzamsal algıya katkı sağlayacak şekilde yansımaların kontrol edildiği görülmektedir. Bununla birlikte sönümsüz odada belirli yansımaların algılanabilirliğinin çok yüksek boyutlarda olmadığı, uzamsal algı eşiğine yakın olduğu görülmektedir.



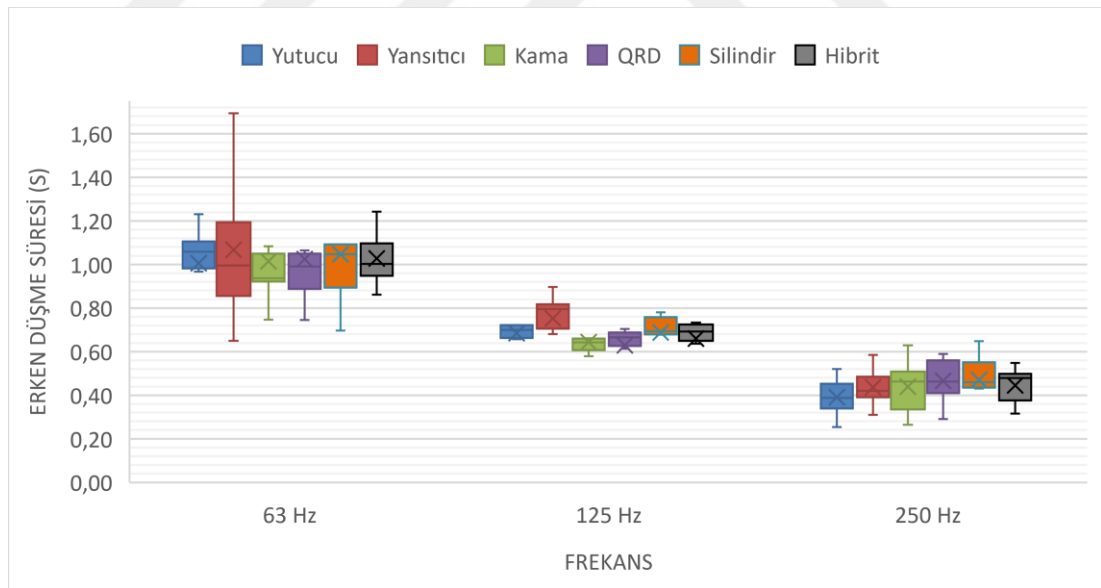
Şekil 5.38 : 125Hz'de L1 kaynak konumu ile M6 alıcı konumunda yansımaların bağıl yansıma düzeyine ve geliş zamanına göre algılanabilirliği (Barron'un grafiği baz alınmıştır)

5.5.6 Çalışma 6: Yüzey form ve empedansının ses alanına etkisi

Mevcut hacim, farklı yüzey formu ve empedansı ile oluşturulmuş sanal varyasyonları ile karşılaştırılarak ISO 23591:2021'de belirtilen azalım süresine bağlı ölçütler ve dağılıklık ile ilişkili ölçütler vasıtasıyla değerlendirilmiştir. Yüzey formunun ve yutuculuğunun zamana bağlı ses alanı etkisi değerlendirilirken özellikle küçük hacimlerde etkili olan erken düşme süresi (EDT), reverberasyon süreleri (T_{20} , T_{60}) gibi

nesnel akustik parametrelerinden yararlanılmıştır. Değerlendirmede öncelikle nesnel akustik parametrelerin ortalama ve standart sapma değerleri ile hacim içerisindeki dağılımına bakılmıştır. Standart sapmanın azalması dağınıklık artışı ile ilişkili olduğundan, bu ölçüt aynı zamanda ses ortamındaki homojeniteyi de değerlendirmektedir. Oda ve varyasyonları zaman tepkisi üzerinden değerlendirildikten sonra MSV-VSA indirekt dağınıklık analiz yöntemi ile frekans tepkisi ve spektral içeriği açısından değerlendirilmişlerdir. Son olarak diğer analizlere benzer olarak M6 alıcı noktasında elde edilen modal düşme süresi ve yansıma analizleri ile tasarlanan yüzeylerin rezonans ve yansımaların algılanabilirliği üzerindeki etkisi irdelenmiştir.

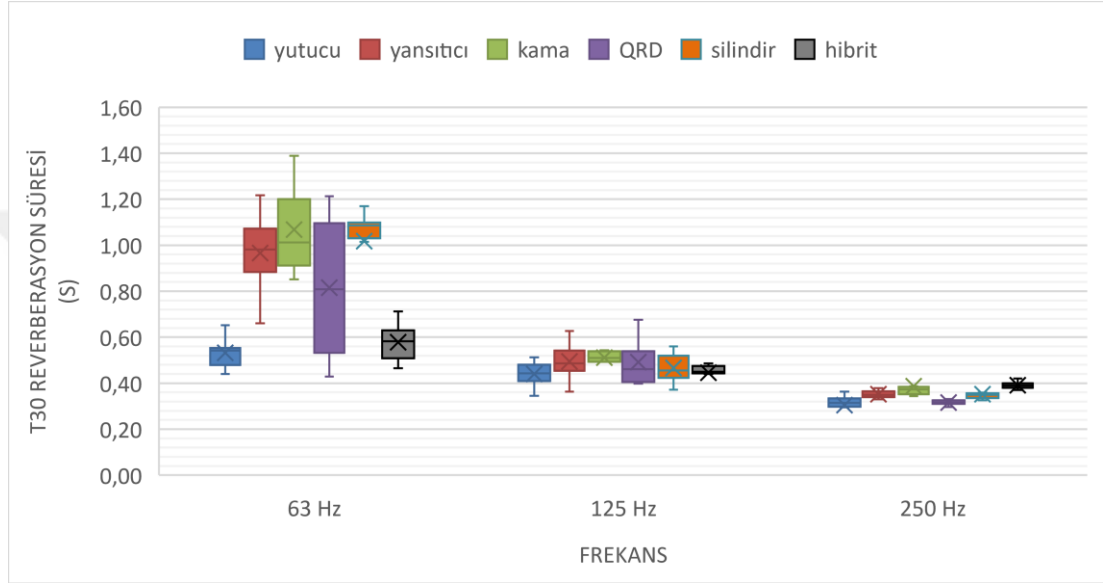
Şekil 5.39’da farklı yüzey tiplerine bağlı varyasyonların EDT değerlerinin alıcılar arası standart sapmaları ve 1/1 oktav bantta değişimi verilmiştir. İlk yansımaların değerlendirildiği EDT parametresinin değişimine bakıldığında tek bir yüzeyin farklılaşmasının hacim genelinde önemli bir fark yaratmadığı görülmektedir. Fakat yansıtıcılık artışına bağlı olarak özellikle 63 Hz’de standart sapmada etkin oldukları görülmektedir.



Şekil 5.39 : Yüzey tiplerine bağlı olarak değişen EDT parametresinin 63 Hz, 125 Hz ve 250 Hz’de 6 (M1-M6) alıcı noktasında ortalama ve standart sapma değerleri

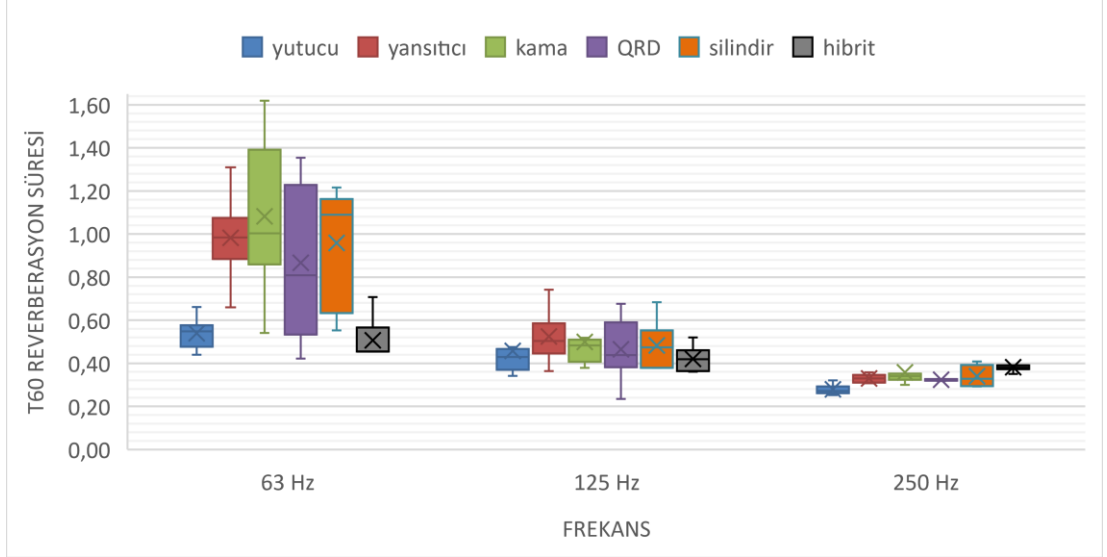
Şekil 5.40’ta, T_{20} değerlerinin alıcılar arası standart sapmaları ve 1/1 oktav bantta değişimi verilmiştir. Buna göre 63 Hz’de saçıcı sistemlerin yansıma kontrolünde etkin olmadığı, yutucu ve hibrit sistemde ilk yansıma kontrolünün sağlandığı görülmektedir.

125 Hz ve sonrasında oda sönümlenmesinin zemin, alçıplak duvar, pencere gibi diğer yapı elemanlarına ve akustik düzenlemelere bağlı olarak arttığı ve T_{20} değerinin bütün varyasyonlarda düştüğü görülmektedir. Bununla birlikte 125 Hz ve 250 Hz’de varyasyonlar arası farkın fark eşiğinin altında olduğu görülmektedir. Standart sapmalara bakıldığında ise 63 Hz’de yansıtıcı yüzeyin ve QRD sistemin sapmaları artırdığı, hibrit ve yutucu sistemde ise yansımaların en aza indirildiği görülmektedir. 250 Hz’de ise sapmalar ve ortalama değerler birbirine çok yakın çıkmıştır.



Şekil 5.40 : Yüzey tiplerine bağlı olarak değişen T_{30} parametresinin 63 Hz, 125 Hz ve 250 Hz’de 6 (M1-M6) alıcı noktasında ortalama ve standart sapma değerleri

Şekil 5.41’de, T_{60} değerlerinin alıcılar arası standart sapmaları ve 1/1 oktav bantta değişimi verilmiştir. T_{30} ile benzer bir değişimin olduğu görülmektedir. Buna göre 63 Hz’de saçıcı sistemlerin yansıma kontrolünde etkin olmadığı, yutucu ve hibrit sistemde yansıma kontrolünün sağlandığı görülmektedir. 125 Hz ve sonrasında oda sönümlenmesinin zemin, alçıplak duvar, pencere gibi diğer yapı elemanlarına ve akustik düzenlemelere bağlı olarak arttığı ve T_{60} değerinin düştüğü görülmektedir. Standart sapmalara bakıldığında ise 63 Hz’de yansıtıcı yüzeyin ve QRD sistemin sapmaları artırdığı, hibrit ve yutucu sistemde ise yansımaların en aza indirildiği görülmektedir. 250 Hz’de ise sapmalar ve ortalama değerler birbirine çok yakın çıkmıştır. Aynı zamanda saçısı sistemler sonucu 63 Hz’de elde edilen değerler T_{250} ’ye göre %250 sapma olmaktadır ve ISO 23591:2021’de belirtilen 63 Hz bandı tolerans limiti olan %155’nin üzerinde olduğu görülmektedir. 125 Hz’de ise 250 Hz’ye göre sapma miktarının %147 tolerans limitinin altında kaldığı görülmektedir.



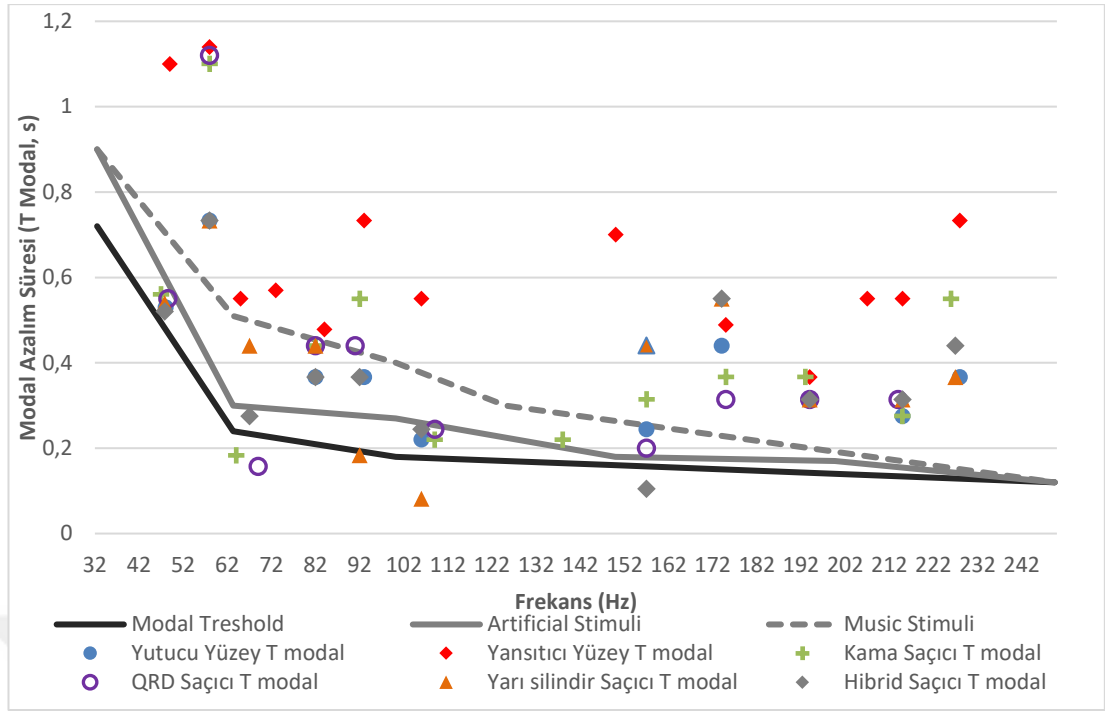
Şekil 5.41 : Yüzey tiplerine bağlı olarak değişen T_{60} parametresinin 63 Hz, 125 Hz ve 250 Hz’de 6 (M1-M6) alıcı noktasında ortalama ve standart sapma değerleri

Çizelge 5.7’de zaman tepkisi analizinde elde edilen EDT, T_{30} , T_{60} parametrelerinin standart sapma değerleri ve frekans tepkisi analizinden elde edilen uzamsal dağınıklığın değerlendirilmesi amaçlı kullanılan MSV ve VSA ölçütlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. İlk olarak frekans tepkisinin alıcılar arası varyansın ve frekans tepkisindeki sapmanın elde edildiği sırasıyla MSV ve VSA ölçütleri verilmiştir. Hacimde dağınıklık hedeflendiğinde saçıcı sistemlerin (kama örneği) yutucu sistemler kadar etkili oldukları görülmektedir. Saçıcı sistemler karşılaştırıldığında bu hacmin fiziksel özelliklerine bağlı olarak kama tipi en etkin sistem olarak görülmektedir. Yüzey tipine ve formuna bağlı olarak oluşan ses alanı yansıtıcı yüzey ile karşılaştırıldığında yutucu yüzey ve saçıcıların etkisiyle dağınıklığın maksimize edildiği görülmüştür. Dolayısıyla yutuculuk ve saçıcılık arttıkça varyans azalmış, dağınıklık artmıştır. Fakat literatürde de belirtildiği üzere yarı silindir ve QRD örneğinde olduğu gibi, alçak frekanslarda saçıcılar artan derinliğe bağlı olarak yeni modlar oluşturmakta ve bu da frekans tepkisinde tepe ve vadiler yaratmaktadır. Dolayısıyla QRD saçıcı tipinde 250 Hz’de, yarı silindirik yüzeyde ise 63 Hz ve 125 Hz oktav bantlarında varyansın arttığı görülmektedir. Çizelgenin bütününe bakıldığında ise hibrit sistemin hem 63 Hz’de sağladığı yansıma kontrolü hem de ses alanı dağınıklığı nedeniyle en ideal yüzey tipi olduğu görülmektedir. Aynı zamanda yutucu yüzey ile karşılaştırıldığında 125 Hz ve 250 Hz de yansımalara katkı sağladığı görülmektedir.

Çizelge 5.7 : Farklı yüzey tiplerinin MSV, VSA ve düşme süresi parametrelerinin standart sapma değerlerinin karşılaştırılması

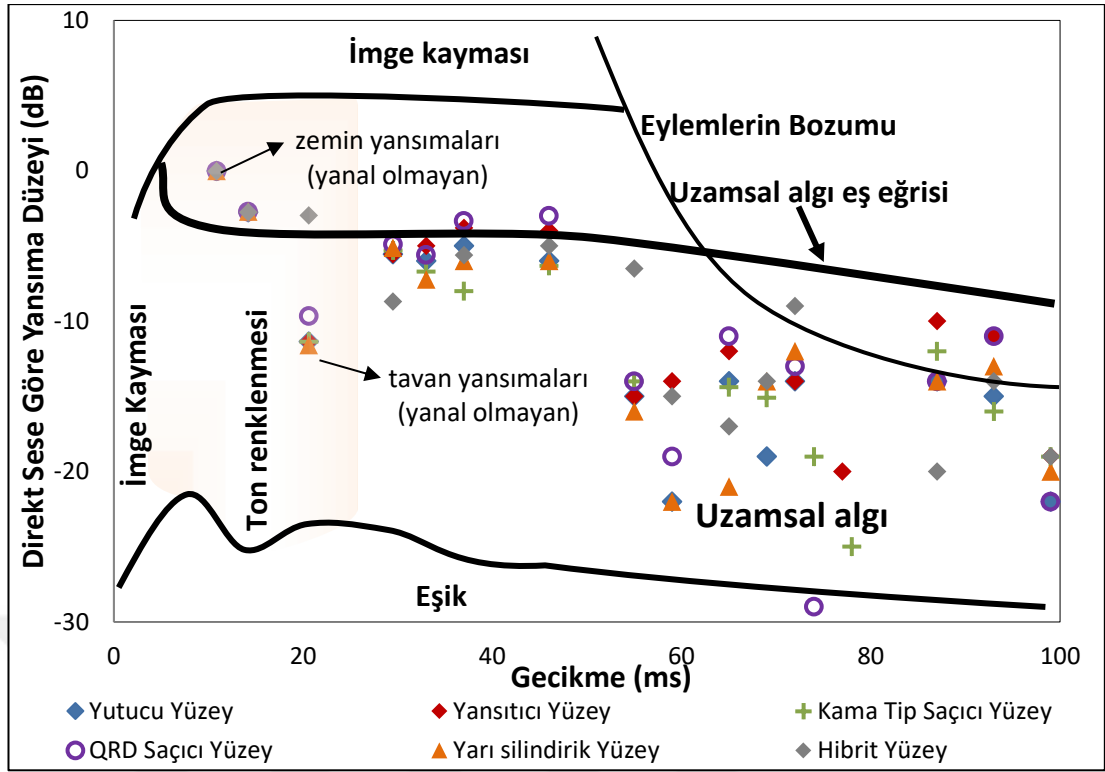
Açıklama	1/1 Oktav Bant (Hz)	Yutucu	Yansıtıcı	Kama	QRD	Yarı silindir	Hibrit
Alıcı noktaları arası homojenite (MSV, dB)	63	28,0	36,0	30,0	26,0	39,0	29,0
	125	28,0	31,0	26,0	26,0	31,0	26,4
	250	22,0	28,0	22,0	27,0	23,0	25,0
Frekans tepkisindeki düzleşme (VSA, dB)	63	8,2	9,0	8,2	9,0	9,5	7,5
	125	4,3	7,6	6,4	5,9	10,9	5,6
	250	4,1	7,0	5,0	5,8	5,6	5,2
Erken düşme süresi parametresinin standart sapması (EDT), SS %	63	21	39	24	25	27	13
	125	15	17	9	16	15	13
	250	25	31	22	25	29	21
Reverberasyon süresi parametresinin standart sapması (T_{30}), SS %	63	15	38	26	47	29	18
	125	30	26	27	36	22	15
	250	9	19	12	8	14	11
Reverberasyon süresinin standart sapması (T_{60})- SS %	63	15	30	23	21	24	19
	125	10	17	9	4	8	12
	250	16	28	12	19	21	14

Frekans tepkisinde oluşan tepe ve vadiler aynı zaman bu bantta sesin geç sönümlendiğini göstermektedir. İndirekt azalım parametresi olarak modal düşme süresi, oluşan rezonansın ve rezonans kontrolü amaçlı uygulanan sistemin algı ile ilişkili olarak değerlendirilmesi amaçlı kullanılmıştır. Şekil 5.42’de L1 kaynak konumu ve M6 alıcı konumda, farklı yüzey tipleri ile oluşturulan varyasyonlarda elde edilen frekans tepkisi Q-faktör yöntemi ile analiz edilerek değerler modal düşme süresine çevrilmiştir. Buna göre yansıtıcı sistemin rezonans algılanabilirliğinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Bununla birlikte saçıcı sistemlerin rezonansların algılanabilirliğini azaltmakla beraber saçıcı tipine bağlı olarak etkinlikleri değişmiştir. Yutucu ve saçıcı sistemlerin uygulandığı varyasyonlarda 250 Hz’ye doğru oluşan rezonansların eşik değerin üzerinde fakat eşiğe yakın olduğu görülmüştür. Bununla birlikte yansıtıcı yüzeyin olduğu varyasyonda ise oluşan rezonansların eşik değerinden oldukça yüksekte olduğu görülmüştür.



Şekil 5.42 : Kaynak L1 ve alıcı M6 konumu için varyasyona bağlı Modal Düşme Süresi değişimi

Alıcı bazında değerlendirmelere ek olarak yüzey form ve empedansına bağlı olarak yansıma algısı farklılaşmaktadır. Yansımaların değerlendirilmesi, alıcı noktasında elde edilen zaman tepkisinde yansımaların gecikme sürelerine ve geliş düzeyine bağlı olarak yapılmıştır. Şekil 5.43'te, L1 kaynak konumunda iken M6 alıcı noktasında oluşan yansımaların farklı yüzey tipleri için direkt sese göre bağıl ses basınç düzeyi ve algı ile ilişkilendirilmesi verilmiştir. Buna göre farklı yüzey formlarının alıcı algısını farklı şekillerde etkilediği görülmüştür. Ton renklenmesinin oluştuğu 0-20 ms aralığı gelen yansımaların zemin ve tavadan gelen yansımalarla oluştuğu belirlenmiştir. Dolayısıyla varyasyonlarda zemin ve tavan özellikleri değişkenlik göstermediğinden yansıma düzey ve gecikme süreleri değişmemiştir. Bunun yanı sıra empedansı değişmemesine rağmen yansıtıcı yüzey durumunda gelen yansıma düzeyinin saçıcı sistemlerde azaldığı görülmektedir. Fakat saçıcı tipine bağlı olarak azalım değişmekle beraber örneğin QRD sistemde bazı yansımaların işitme eşiğinin altına düştüğü görülmüştür. Kama tip saçıcı tipinde yutucu sisteme eş değer bir yansıma kontrolü sağlandığı görülmüştür. Bununla birlikte 80-100 ms aralığında yansıtıcı yüzeyin oluşturduğu güçlü yansımalar eylemlerin bozumu aralığındayken, saçıcıların kullanılması durumunda uzamsal algı aralığına indiği, dolayısıyla saçıcı sistemlerin yutucu sistem kadar etkili olduğu görülmüştür.



Şekil 5.43 : Stüdyo odasında farklı yüzey tiplerinin yansımaya analizi (Barron'un grafiği baz alınmıştır.)

5.6 Tartışma ve Sonuçlar

Çalışmanın bu bölümünde küçük hacimlerde özellikle alçak frekanslarda oluşan rezonans ve güçlü yansımalar gibi akustik kusurların oluşturduğu dağınık olmayan ses alanı ve düzgün olmayan frekans tepkisinin irdelenmesine ve iyileştirilmesine yönelik yüzey tasarımı vasıtasıyla bir yaklaşım önerisi geliştirilmiştir. Yaklaşımın geliştirilmesi sürecinde öncelikle kaynak kabuk ilişkisinde çeşitli değişkenler tanımlanarak farklı varyasyonlar oluşturulmuş, parametrik analiz çalışması ile her bir değişkenin ses alanına etkisi ortaya konmuştur. Hacim içerisinde dağınıklığın, frekans tepkisindeki düzgünlüğün ve erken yansıma yoğunluğunun artırılmasını hedefleyen bu yöntemde 6 farklı yüzey tipi oluşturulmuş ve ses alanına etkileri nesnel parametreler üzerinden karşılaştırılmıştır. Kullanılan saçıcı tipleri, daha önce fiziksel model ve öznel testler vasıtasıyla Kleiner ve Svensson tarafından yapılan bir araştırmadan uyarlanmıştır (Kleiner, Svensson, ve Dalenbäck 1992). Son zamanlarda yapılan küçük hacimlerin optimizasyonuna yönelik çalışmalarda, rezonans etkisini minimize etmek için frekans tepkisindeki düzlük hedeflenmekte ve algoritmalar buna yönelik hazırlanmaktadır. Fakat sadece frekans tepkisindeki düzlüğün hedeflenmesi akustik

kalitenin sağlanmasında yeterli olmamaktadır. Önerilen yöntemde farklı olarak rezonansların algı üzerindeki etkileri, erken yansıma yoğunluğu ve alıcı noktaları arasındaki değerlerin homojen dağılımı dikkate alınarak bir tasarım yaklaşımı ortaya konmuş ve uygulanabilirliği değerlendirilmiştir.

Parametrik analiz çalışması sonu elde edilen bilgiler aşağıdaki gibidir.

Çalışma 1: Oda geometrisinin ses alanına etkisi

Oda geometrisinin modların etkisiyle oluşan basınç dağılımına bakıldığında boyut oranlarının odanın mod karakterinde belirleyici olduğu görülmektedir. Düzenli biçime sahip oda ile düzensiz biçime sahip iki odanın etkin mod frekansları farklılaşmasa da plan şemasında oluşturulan duvar düzensizlikleri etkisiyle mod yolları kırılan eksenel modların ya da teğet modların etkisi azalmaktadır.

Çalışma 2: Alıcı kaynak konumunun analizi

Alıcı noktasında oluşan oda tepkisi alıcı-kaynak fonksiyonunun sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Frekans tepkisi analizlerinden aynı kaynak konumu ve oda koşullarında iki farklı alıcı noktası karşılaştırıldığında odanın mod karakterinin oda boyut ve oranlarının bir sonucu olarak her iki konumda da benzer mod desenini oluşturduğu, bununla birlikte karın konumunda bulunan alıcı noktasında düğüm konumunda bulunan alıcıya göre daha çok sapmalar olduğu görülmüştür.

Çalışma 3: Kaynak yayımının analizi

Alıcı noktasındaki frekans tepkisi aynı ortam sönümlenmesinin (damping), konumunun ve kaynak yayımının bir fonksiyonu sonu ortaya çıkmaktadır. Aynı ortam koşulunda (mevcut durum) monopol ve dipol kaynak yayımı ile yapılan analizler modal analiz ile karşılaştırılmıştır. Buna göre yayım doğrultusunda mod tahriki daha fazla olmuş ve tahrik enerjisi daha yüksek olmuştur. Alıcı konumu yayım doğrultusunda değil ise frekans tepkisinde sapmalar daha azdır. Diğer bir yandan kaynak yayım doğrultusunda bulunan alıcı noktası için ise 2 farklı durum görülmüştür. Eğer mod dağılımı ile yayım doğrultusunun (x ekseninde yayım ve x eksenel modları) çakışması durumunda frekans tepkisinde sapmalar bu bantlarda daha yüksek olmuştur. Fakat modal dağılım ile yayım doğrultusu farklı ise alıcı noktası bu yönelimde ise tahrike bağlı olarak sapmalar daha az olabilmektedir. Dolayısıyla frekans tepkisi büyük oranda kaynak yayım özelliğine göre değişkenlik göstermektedir. Bununla birlikte aynı ortam koşulunda iki alıcı noktasında oda karakterine bağlı frekans

tepkisinde kaynak yayım özelliğinden bağımsız olarak tepe ve vadi deseninde benzerlikler vardır. Odanın boyut ve oranlarının bir sonucu olarak oluşan modal dağılım ve oda karakteri her iki yayım özelliği sonucu oluşan frekans tepkisinde görülebilmektedir.

Çalışma 4: Kaynak ses gücü analizi

Rezonansların algılanabilirliği genliği ve mod frekansındaki tepenin sivriligi ile artmaktadır. Sivrilik ise oda sönümlenmesine bağlıdır. Şekilde ses gücü 0.05 Vat ve 1.6 Vat olan L1 kaynak noktası ve M6 alıcı noktalarında frekans tepkisi karşılaştırılmıştır. Kaynak gücü artırıldığında frekans tepkisi değişmeden ses basınç düzeyi artmıştır. Rezonansların keskinliği oda sönümlenmesi ile ilişkili olduğundan ses gücü artışına bağlı olarak ses basınç düzeyi artmış, tepe yapan frekansların keskinliğinde bir değişiklik olmamıştır. Fakat eş gürlük eğrisi göz önünde bulundurulduğunda alçak frekanslardaki logaritmik ses basınç düzeyi artışı psikoakustik açıdan daha yüksek algılanacaktır.

Çalışma 5: Sönümlenmenin etkisi

Odada kullanılan akustik düzenleme sistemleri değerlendirildiğinde, kullanılan sistemlerin rezonansların algılanabilirliğinde ve reverberasyon kontrolünde oldukça etkili olduğu görülmektedir. Bununla birlikte sönümlenmiş oda ile optimum değerler karşılaştırıldığında değerlerin optimum değer aralıklarının altında olduğu ve dolayısıyla bütün bantlarda ses azaltımı (total attenuation) olduğu görülmüştür. Aynı zamanda ses alanı ses basıncı dağılımı açısından değerlendirildiğinde oluşan yüksek ve alçak ses basıncı bölgelerinin yutucu sistemlerin etkisiyle değişmediği fakat noktalar arası farkın azaldığı görülmüştür. Bu nedenle doğru oda boyut ve oranlarının belirlenmesi tasarımın ilk aşamasında düşünülmelidir. Aynı zamanda sönümlenmenin etkisiyle alıcılar arası frekans tepkisindeki sapma varyansının azaldığı ve frekans tepkisindeki düzlüğün arttığı görülmüştür. Dolayısıyla kullanılan akustik düzenleme sistemlerinin oda içerisindeki ses alanı dağılımlığına etkisinin değerlendirmesinde MSV ve VSA ölçütünün (Welti ve Devantier 2006) etkin bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.

Çalışma 6: Yüzey formunun ve empedansının etkisi

Mevcut dururumda kullanılan yutucu yüzeyde elde edilen ses alanı, farklı formlarda tasarlanmış saçıcı sistemler ve hibrit sistemle oluşturulan varyasyonlar ile karşılaştırılmıştır. Buna göre elde edilen ses alanları dağılımlık açısından hacim

bazında MSV-VSA ölçütleri üzerinden ve nesnel parametrelerin standart sapma yüzdeleri üzerinden değerlendirilmiştir. Bunun sonucunda saçıcı yüzeylerin yutucu sistemler kadar reverberasyon kontrolü sağladığı görülmektedir. Bunun birlikte saçıcı sistemlerin etkinliği forma bağlı olarak değişmektedir. Yüzey tipi olarak en avantajlı sistemin 63 Hz’de panel tip yutucu ve üst oktavlarda saçıcı olarak ayarlanan kama hibrit tip saçıcı olduğu görülmektedir. Saçıcı tiplerin ortak özelliği olarak 63 Hz’de özellikle eksenel modların etkin olduğu bantta standart sapmayı artırdığı görülmektedir. Yansıtıcı yüzeyin olduğu varyasyonda ise güçlü yansımalar nedeniyle ses alanında alıcılar arası uzamsal varyansın ve frekans tepkisindeki sapmaların arttığı görülmektedir.

Benzetim yönteminin uygulanabilirliği

Bilgisayar ve yazılım teknolojisinin gelişmesiyle, benzetim yöntemleri daha verimli bir şekilde kullanılabilir hale gelmiştir. Dalga bazlı benzetim yönteminin kesinliğinin araştırıldığı pek çok çalışmada, karşılaştırıldığı diğer benzetim yöntemlerine nazaran, dalga davranışının ve faz değişiminin dahil edilmesiyle beraber, kesinliğinin daha fazla olduğu görülmüştür (Mak ve Wang 2015; Okuzono vd. 2010; Suh ve Nelson 1999; Yousefzadeh ve Hodgson 2012). Çalışmada kullanılan dalga bazlı sonlu elemanlar yöntemi olan COMSOL ile ilgili benzetim programı ile ilgili avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Öncelikle modelin oluşturulmasında kesinliği artıran özelliklerden biri, fiziksel ortamın gerçekte olduğu gibi, yüzeye indirgmeden modellenmesidir. Geometrik analiz yönteminde ise yüzey saçıcılığı, saçıcılık katsayısı ile programa tanımlanmakta ve hesaplanmaktadır. Fakat FEM yönteminde yüzey formu modellendiği şekilde hesaplanmaktadır (Hargreaves vd. 2000). Genel prensip olarak modal alanda dalga bazlı benzetim yöntemi ve dağınık alanda geometrik akustik hesaplama modelleri kullanılırken, ses yutuculuğun eşit yayılmadığı hacimlerde de dalga akustiği hesap yönteminin daha etkin olduğu görülmüştür (Hornikx, Hak, ve Wenmaekers 2014).
- Benzetim kesinliğinin artırılması temelde 2 faktöre bağlıdır: Sınır koşullarının doğru tanımlanması ve ayırıklaştırma. Sınır koşullarının tanımlanmasında kullanılan empedans verilerinin doğru bir şekilde elde edilebilmesi için ölçüm ya da teorik hesaplamalara gereksinim vardır. Ölçüm yöntemi ile empedans

verisinin elde edilmesi, çok değişken malzeme ve yapı elemanın bulunduğu gerçek fiziksel ortamlar için oldukça zaman alan bir yöntemdir. Teorik hesaplama yöntemi ile empedans verisinin elde edilmesi ise daha kolaydır fakat daha kesinliği görece daha azdır. Bu karmaşık teorik hesap yöntemleri ise özel araçlar vasıtası ile çözülebilmektedir. Modelin kesinliğini belirleyen diğer bir faktör de kafeslemedir. Dalga boyuna uygun olarak seçilen optimum eleman boyutu, beraberinde CPU artışını getirmektedir. Dolayısıyla orta ve yüksek frekanslarda analiz oldukça yüksek bir hesaplama yüküne neden olmakta ve gelişmiş bir bilgisayar teknolojisi gerektirmektedir (Sakamoto vd. 2008; Schmalte vd. 2011; Yokota vd. 2004).

- Diğer çalışmalara benzer şekilde (Dance ve Buuren 2013), Schroeder teorisinde kaynak sınır etkileşimi göz ardı edildiğinden, ölçüm ve benzetim sonuçlarına bakıldığında modal alan ve dağınık alan geçişinin Schroeder teorisinde belirtilen frekanstan daha yüksek bir değerde olduğu görülmüştür. Sınır koşulların tanımlayan empedans değerleri, benzetim çözünürlüğünü belirleyen ağ boyutlandırması ve zamana bağlı analizlerdeki zaman aralıkları doğruluk üzerinde etkilidir (Granados 2011). Ölçüm ile dalga bazlı FEM benzetim yönteminin karşılaştırma sonuçlarına bakıldığında, düşme süresi parametrelerinde (EDT, T_{20}) maksimum 0.2s (%17) sapma olduğu görülmüştür. Güncel çalışmalara göre, EDT JND geniş bant koşulların %26 olarak, alçak frekans aralıklarında ise bu hassasiyetin azaldığı saptanmıştır (Dorrego ve Vigeant 2022). Dolayısıyla benzetim ve ölçüm arasındaki sapmanın mühendislik metodu göz önünde bulundurulduğunda yüksek olduğu varsayılsa da psiko-akustik anlamda göz ardı edilebilmektedir.

Tasarım ve değerlendirme yaklaşımına ilişkin bulgular

Tasarım yaklaşımında öncelikli olarak oda geometrisinin iyileştirilmesi önerilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu oda geometrisini belirleyen hacim, oda boyut ve oranları gibi fiziksel tasarım parametrelerinin oda karakterinin belirlediği ve diğer tasarım aşamalarında değişmediği görülmektedir. Frekans tepkisindeki sapmaların minimize edilerek geometrinin uygun boyut oranları ve düzensiz plan şeması ile oluşturulması sonrasında ideal oda karakteri oluşturulabilmektedir. Sınır koşullarının ya da yüzey tasarımının belirlenmesi noktasında oda tepkisi spektral içeriği ve zamana bağlı azalım eğrileri irdelenmektedir. Alıcı ve kaynak konumuna göre oda tepkisinin

değişkenliğinin yüksek olması nedeniyle değerlendirmeler alıcı bazında ve oda bazında olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Simülasyon ya da ölçüm sonucu elde edilen veriler nesnel akustik parametreler vasıtasıyla değerlendirilmesinde ISO 23591:2021'de (International Standard Organization 2021) belirtilen T_{30} değerleri ve sapma aralıkları kullanılmıştır. Fakat farklı senaryolar arası farklılıkların reverberasyon süresi değerlendirildiğinde fark eşiğinin (JND) altında kaldığı görülmektedir. Alıcı bazında yapılan analizlerde spektral içerikteki değişimin ve rezonans kontrolünde verilerin algı eşiği ile ilişkilendirilmesinin akustik ortamın değerlendirilmesinde daha etkili olduğu görülmektedir. Aynı zamanda azalım parametrelerinin (EDT, T_{30} , T_{60}) standart sapmalarına bakıldığında ses alanı dağınıklığının zamana bağlı değerlendirilebilmektedir. Bununla birlikte önerilen MSV ve VSA kriterleri ile spektral içerik hacim bazında değerlendirilebilmektedir. Ses alanı dağınıklığının artırılmasının bir hedef kriter olarak kabul edilmesi ile akustik koşulların iyileştirilmesi mümkün olabilmektedir. Fakat bu kriterin ortamdaki sönümlenmenin artırılması ile mümkün olması nedeniyle alıcı bazında algı ile ilişkilendirilmesi ortamın gereğinden fazla yutucu olmasını önlemektedir.

6. SONUÇLAR

ISO 23591:2021 ile prova odalarının düzenlenmesine yönelik ölçütler belirlenmiş, enstrümana bağlı olarak uygun hacim ve reverberasyon süreleri tanımlanmıştır. Belirli bir hacmin altında kalan odalar için ise optimum mod dağılımını sağlayan ve rezonansların algılanmasını minimize eden bir regresyon denklemi verilmiştir. Fakat rezonansların algılanabilirliğine ilişkin bir ölçüt belirtilmemiştir. Dolayısıyla bu tür hacimlerin tasarlanmasında fiziksel tasarımının etkilerinin değerlendirilmesi için uygun koşulların nesnel olarak belirlenmesine ihtiyaç vardır. Reverberasyon, genel ve açıklayıcı bir terim olsa da küçük hacimlerde alının ilk 50 ms içerisinde oluşması nedeniyle bu parametrenin yeterliliği ve geçerliliği tartışılmaktadır. Dolayısıyla özellikle rezonansların etkisiyle küçük müzik hacimlerinde öznel ve nesnel hangi parametrelerin etkili olduğu araştırma konusu olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, küçük müzik hacimlerinde azalım eğrisi parametrelerine ek olarak rezonansların değerlendirilmesi amaçlı Q-faktör, modal düşme süresi gibi parametreler kullanılmaktadır, fakat bu parametrelerin eşik değerleri kayıt ve reproduksiyon amaçlı tanımlanmıştır. Prova ve icra koşullarındaki uygulanabilirliği tespit edilmiş diğer bir çalışma konusudur.

Değerlendirme parametrelerine ek olarak fiziksel ortamların tasarım aşamasında değerlendirme ortamını sağlayan benzetim yöntemi ise teknoloji ile paralel olarak gelişen bir disiplindir. Salon koşullarının analiz edildiği pek çok çalışmada benzetim yöntemi olarak geometrik akustik yöntemi kullanılmıştır. Bununla birlikte, dalga akustiğinin hesaplanması konusunda kullanılan FEM yöntemini teorik olarak irdeleyen pek çok çalışma olsa da hacimlerin modellenmesine, empedans verisine dair çok fazla çalışma yoktur.

Daha önce yapılan çalışmalara istinaden belirtilen eksikliklerin desteklenmesi amacıyla ortaya konan başlıca hipotezler aşağıdaki gibidir.

- Küçük müzik hacimlerinin değerlendirilmesinde reverberasyon süresi yeterli değildir. Bu nedenle optimum performans için spektral içeriğin ve zamana

bağlı değişimin rezonans algısı ile ilişkili olarak değerlendirildiği bir tasarım yaklaşımı kullanılmalıdır.

- Odanın fiziksel özelliklerine bağlı olarak ses alanı dağınıklığı istatistiksel ve algı ile ilişkili olarak değerlendirilerek yüzey tasarımı kararı verilebilir.

Ortaya konan hipotezlerin sınanması sırasında çalışmaya yön veren araştırma soruları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Küçük hacimlerin değerlendirilmesinde etkin parametreler ve ilgili standartlar nelerdir? Bu tür hacimlerde ve alçak frekanslarda optimum değer aralıkları, JND değerleri nelerdir? Enstrüman karakteristiğine göre müzisyen ihtiyacı nasıl değişmektedir? Rezonansların algılanabilirliği ile ilgili değişkenler nelerdir? Kayıt ve reproduksiyon koşullarında rezonansların algılanabilirliği için önerilen parametrelerin ve tanımlanan optimum değerlerin prova fonksiyonu için geçerliliği nedir?
- Küçük hacimlerde yansıma düzeyine bağlı olarak öznel parametreler arası ilişkiler nasıl değişmektedir? Rezonansların bu parametreler arası ilişki düzeyindeki etkisi nedir? Rezonansların kontrolü için uygulanan geniş bant yutucu sistemler ile oluşan düşük reverberasyona sahip odaların müzisyen izlenimine etkisi nedir? Odalar ISO 23591:202'e göre değerlendirildiğinde sonuçlar müzisyen izlenimi ile ne kadar örtüşmektedir?
- Ortam ihtiyacına uygun olarak yüzey karakteri belirlenebilir mi ve buna yönelik algı ile ilişkili bir değerlendirme ve tasarım yaklaşımı kurgulanabilir mi?
- Saçıcı sistemlerin bu kurguda rolü nedir?

Araştırma sorularına yönelik yapılan çalışma kapsamında akustik ölçüm, performansa dayalı yüz yüze anket ve benzetim yöntemlerinden yararlanılmıştır. Her bir çalışmada elde edilen bulgular başlıklar halinde sunulmuştur:

6.1 Ölçüm Çalışmasına İlişkin Bulgular

Schroeder teorisine göre hacmin azalması ve reverberasyon süresinin yükselmesi ile modal alan ile dağınık alan geçişi daha üst oktav bantlara kaymakta ve rezonansalar işitilebilir hale gelmektedir. Fakat Schroeder teorisi kaynak ve sınır etkileşimini göz ardı ederek sadece mod dağılımına göre modal alan ve dağınık alan arası geçişi hesaplamaktadır. Bu nedenle, ölçüm sonuçlarına bakıldığında sınır koşullarına bağlı

faz çakışmaları nedeniyle oluşan sapmaların orta frekanslara kadar devam ettiği görülmektedir. Alıcı noktaları arasındaki ölçüm farklılıklarının sadece modların etkisiyle değil aynı zamanda yüzeyde uygulanan farklı kaplama sistemleri ile de ilişkili olarak olduğu görülmüştür. Dolayısıyla modların etkisiyle beraber uygulanan akustik düzenlemenin eşit şekilde dağılmaması ses alanında farklı akustik ortamların oluşmasına neden olmaktadır. Akustik ölçüm sonuçları nesnel parametreler bazında aşağıdaki gibidir.

EDT değerleri, stüdyo odasında yutucu sistemlerin yoğunluğu nedeniyle düşük çıkmıştır, prova odasında ise yüksek EDT süresine bakılarak erken yansımaların yüksek olduğu söylenebilmektedir. Standart 23591:2021’de önerilen T_{30} değer aralıkları 300 m³ hacme sahip olan stüdyo odasında alçak sesli enstrüman grubu için 0,9-1,2 s ve yüksek sesli enstrüman grupları için 0,7-1 s’tir. 150 m³ hacme sahip olan prova odasında alçak sesli enstrümanlar için 0,75-1 s arası T_{30} önerilirken, yüksek sesli enstrüman grubu için 0,55-0,8 s aralığı önerilmektedir. Buna göre, ortalama olarak 0,4 s olan T_{30} değerleri stüdyo odasında her iki enstrüman grubu için istenen ölçütlerden düşük çıkmıştır. Diğer bir yandan prova odasında 0,65 s olan T_{30} değerlerinin istenen ölçütleri yüksek sesli enstrümanlar için sağladığı, alçak sesli enstrüman grubu için ise ölçütlere yakın çıktığı görülmüştür. Aynı zamanda standartta orta frekansa göre her oktav bant için en yüksek ve en düşük reverberasyon süreleri (T_{30}/T_{orta}) tolerans değerleri tanımlanmıştır. Buna göre stüdyo odasında 63Hz ve 125Hz’de sapma oranı tolerans değerlerinden yüksektir ($p_{63Hz}=\%155>\%140$, $p_{125Hz}=\%147>\%120$, $p_{250Hz}=\%108<\%110$). Bununla birlikte prova odasında sapma oranları tolerans değerlerinin içinde kalmıştır.

Netlik indeksi (C_{80}) prova odasında netliğin 500- 1000 Hz aralığı dışında ideal koşulları sağladığı, diğer bir yandan, stüdyo odasında ortalama 10-14 dB olan C_{80} indeksinin ideal düzeyin çok üzerinde olduğu görülmektedir. İki hacim arasındaki farkın C_{50} ve C_{80} ’de arttığı görülmektedir.

Q-faktör ve modal düşme süresi parametreleri ile odaların tek bir alıcı noktasında frekans tepkisine bakılarak rezonansların etkinliği algı ile ilişkilendirilmiştir. Prova odasında yansıma yoğunluğunun daha fazla olması ve yanal yüzeylerde herhangi bir yutucu sistem kullanılmaması nedeniyle modların daha etkili ve belirgin olduğu görülmüştür. Stüdyo odasında ise düzensiz geometri ve yutucu sistemlerin yoğun kullanımı nedeniyle modların eşik değerine yakın olduğu görülmüştür.

Destek parametresi daha çok sahne koşullarının değerlendirilmesinde kullanılsa da bu çalışmada anket kapsamında irdelenen “müzisyenin hacim tarafından desteklenmesi” ile ilgili olarak sunulmuştur. İki oda arasındaki farkın yüksek olduğu ve stüdyo odasındaki değerlerin prova odasına göre çok daha düşük olduğu görülmektedir.

Güçlülük (G) ISO 23591:2021 de belirtilen tabloya göre ampirik olarak hesaplanmıştır. Stüdyo odasında ses gücü düzeyi yüksek ve alçak her iki enstrüman grubu için istenilen değerin altında çıkmıştır. Prova odasında ise ses gücü yüksek enstrümanlar için yüksek, ses gücü düzeyi alçak enstrümanlar için ideal çıkmıştır.

İlk Gecikme Aralığı belirli bir alıcı noktasında (anket çalışmasında müzisyen konumu) analiz edilmiştir. İlk beş güçlü yansıma zeminden gelen yansımalar göz ardı edildiğinde stüdyo odasında 30 ms içerisinde alıcı noktasına ulaşırken 15 ms içerisinde ulaşmıştır. Aynı zamanda prova odasında güçlü yansımalar yine yüksek düzeyde diğer yansımalar eşlik ederken, stüdyo odasında -15 dB’nin altında kalmaktadır.

Rezonansların nesnel olarak ölçüldüğü ve algı ile ilişkilendirildiği Q-faktör ve modal düşme süresi parametrelerine bakıldığında, prova odasında yansıma yoğunluğunun daha fazla olması ve yanal yüzeylerde herhangi bir yutucu sistem kullanılmaması nedeniyle modların daha etkili ve belirgin olduğu görülmüştür. Stüdyo odasında ise düzensiz geometri ve yutucu sistemlerin yoğun kullanımı nedeniyle modların eşik değerine yakın olduğu görülmüştür.

Düşme eğrisindeki sapmaların, özellikle eğrinin ilk kısımlarında mod etkisi ve malzeme farklılığı nedeniyle daha çok olduğu görülmüştür. Düşme süresinin geç kısımlarında ise hacimdeki yansımaların dağınıklaşmasına bağlı olarak T_{30} ’da düşme eğrisinin ilk kısmının hesaplandığı EDT parametresine göre daha az sapmanın olduğu görülmüştür.

6.2 Anket Çalışmasına İlişkin Bulgular

Bu çalışma kapsamında küçük müzik hacimleri özelinde oluşan ses alanında öznel akustik parametreler arası ilişkiler ortaya konmuştur. Farklı fiziksel koşullara sahip odaların ses alanının müzisyenin icra sırasındaki izlenimini nasıl etkilediği, çalma eylemi üzerindeki etkisi, enstrümanın bu etkileşimdeki rolü ve bu etkileşimde hangi parametrelerin açıklayıcı olduğu araştırılmıştır. Müzisyenlerle yapılan anket

alışmasından elde edilen veriler istatistiki olarak analiz edilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Modal dūřme sūresi ile ilişkili yapılan akustik m sonuçları ve öznel değerlendirmeler karşılaştırılarak icra koşullarında rezonansların algılanabilirliğine ilişkin eřik değerleri değerlendirilmiştir. Daha çok dinleme testleri ya da daha geniş kapsamlı bir çalışmaya ihtiyaç olmakla beraber karşılaştırma sonuçları eřik değerlerinin, prova odalarında ve icra koşullarına yönelik de kullanılabileceğini, fakat toleransın yūkseldięini göstermiştir.
- Nicel ve nitel analizler sonucu elde edilen veriler m sonuçları ile karřılařtırılmıřtır. Stūdyo odasında dūřk EDT sūresine baęlı olarak meknsal izlenimin azaldıęı görülmektedir. Aynı zamanda T_{30} ISO 23591:2021'de istenen deęerlerin çok altındadır ve dūřk reverberasyona baęlı olarak genel izlenim olumsuz etkilenmiřtir. Aynı zamanda destek hissi azalmıř ve performansta odaklanama sorunu yaratmıřtır. Dięer bir yandan T_{30} deęerleri göre optimum aralıklarda olan prova odasında reverberasyon sūresi yūksel algılanmıřtır. Bununla birlikte standart ile tutarlı olarak yūksel ses gücü düzeyine sahip enstrümanlarda rahatsızlık daha fazla çıkmıřtır. Dolayısıyla nesnel olarak güçlülüęün reverberasyona göre anket sonuçları ve standartla daha fazla örtüřtüęü görülmektedir.
- Nitel veri analizlerinden elde edilen sonuçlara bakıldığında stūdyo odasında geniş bantta etkin ses yutucu sistemlerin kullanımı sonucu dūřen erken yansımalarla bağlı olarak meknsal izlenimin (varlık etkisi) azaldığı ve ilk olarak reverberasyon eksikliğinin rahatsızlık yarattığı grlmştir. Rezonansların etkin olduğu prova odasında ise rezonanslara bağlı akustik bozulmalar ve kamaşma genel izlenimi oldukça etkilemiştir.

Genel olarak bakıldığında küçük hacimlerde reverberasyona ek olarak rezonans algısının, ses yūkseklilięinin ve erken yansımaların önem kazandığı görülmektedir.

6.3 Benzetim alışmasına İlişkin Bulgular

Benzetim yöntemiyle ilgili yapılan çalışmalarda en çok karşılaşılan sorun sonuçların kesinliğine yöneliktir. m ile dalga bazlı FEM benzetim yönteminin sonuçları karşılaştırıldığında, dūřme sūresi parametrelerinde (EDT, T_{20}) maksimum 0.2 s (%17)

sapma olduğu görülmüştür. Güncel çalışmalara göre, EDT JND geniş bant koşulların %26 olarak, alçak frekans aralıklarında ise bu hassasiyetin azaldığı saptanmıştır. Dolayısıyla benzetim ve ölçüm arasındaki sapmanın mühendislik metodu göz önünde bulundurulduğunda yüksek olduğu varsayılsa da psiko-akustik anlamda göz ardı edilebileceği görülmüştür. Benzetim kesinliğinin artırılması temelde 2 faktöre bağlıdır: Sınır koşullarının doğru tanımlanması ve ayırıklaştırma. Sınır koşullarının tanımlanmasında kullanılan empedans verilerinin doğru bir şekilde elde edilebilmesi için ölçüm ya da teorik hesaplamalara gereksinim vardır. Ölçüm yöntemi ile empedans verisinin elde edilmesi, çok değişken malzeme ve yapı elemanın bulunduğu gerçek fiziksel ortamlar için oldukça zaman alan bir yöntemdir. Teorik hesaplama yöntemi ile empedans verisinin elde edilmesi ise daha kolaydır fakat kesinliği görece daha azdır. Bu karmaşık teorik hesap yöntemleri ise özel araçlar vasıtası ile çözülebilmektedir. Modelin kesinliğini belirleyen diğer bir faktör de kafes boyutudur. Dalga boyuna uygun olarak seçilen optimum kafes boyutu, beraberinde hesap yükü (CPU) artışını getirmektedir. Dolayısıyla orta ve yüksek frekanslarda analiz oldukça yüksek bir hesaplama yüküne neden olmakta ve gelişmiş bir bilgisayar teknolojisi gerektirmektedir.

6.4 Tasarım Yaklaşımına İlişkin Bulgular

Saha çalışmalarında elde edilen verilere göre rezonanslar dağınık olmayan bir ses alanının oluşumunda ve müzisyen izleniminde oldukça etkili olmuştur. Bu nedenle önerilen yaklaşım odanın zaman tepkisi ile beraber frekans tepkisi ile ilişkili parametrelerin değerlendirilmesini kapsamaktadır. Hacimde oluşan ses alınının dağınıklığının algı ile ilişkili olarak ve istatistiksel olarak değerlendirilmesi ve bu bağlamda ortam iyileştirilmesine ya da yüzey tasarımına yönelik önerilerin getirilmesi hedeflenmiştir.

Yaklaşımın etkinliğinin değerlendirilebilmesi amacıyla parametrik analiz çalışması kullanılmıştır. Çalışmada, kaynak ve yüzey özelliklerinin farklılaştığı varyasyonlar oluşturularak, yaklaşımda önerilen ölçütler ve parametreler aracılığı ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Oda boyut oranları belirleyici olmakla beraber kaynak özellikleri, yüzey formu, kullanılan saçıcı ya da yutucu sistemler mod karakterini deriştirmeden modların algılanabilirliğini değiştirmektedir. Dolayısıyla tasarım ya da

değerlendirme yönteminin başlangıcında doğru oda boyutlarının seçimi yapılmalı ve kullanıma yönelik ihtiyaçlar da göz önünde bulundurularak düzensiz bir geometri belirlenmelidir. Oda geometrisinin düzensiz bir geometride tasarlanması mod sayısını artırarak ses alanında dağınıklık sağlamaktadır.

- Alıcı ve kaynak konuma bağlı mod karakteri ya da mod deseni değişmemektedir, fakat modların etkisi, kaynak ya da alıcı noktasının karın (antinode) bölgesinde bulunmasına bağlı olarak frekans tepkisinde sapmaların artmasına, düğüm (node) bölgesinde bulunmasına bağlı olarak daha az sapmanın oluşmasına neden olmaktadır.
- Kaynak yayımı mod doğrultusunda aynı ise sapma fazla olmaktadır. Örneğin, paralel yüzey arası yoğun mod oluşumu var ve kaynak yayımı (dipol) bu doğrultuda ise daha fazla mod tahriki nedeniyle frekans tepkisinde sapmalar artmaktadır. Noktasal (monopol) bir kaynak ile iki kutuplu (dipol) karşılaştırıldığında ise her yöne doğru mod tahrikinin artması ile noktasal kaynakta sapmalar bir miktar daha fazla oluşmaktadır.
- Kaynak gücünün artması ile ses yüksekliği artmaktadır. Fakat mod algılanabilirliği ya da zirve yapan frekanslardaki keskinliği (sharpness) değişmemektedir. Bununla birlikte eş gürlük düzeyi göz önünde bulundurulduğunda alçak frekansların daha çok duyulmasına neden olmaktadır.
- Yüzey formu ve empedansının ses alanına etkisi nesnel akustik parametreler (EDT, T_{20} , T_{60}) irdelendiğinde yüzeyler ses alanı farklılıklarının fark eşliğinin altında olduğu görülür. Bununla birlikte rezonans kontrolü açısından saçıcı sistemlerin yutucu yüzey kadar etkili olduğu görülmektedir. Hibrit sistemler (saıcı + dar bant yutucu) ses alanı kontrolünde 63 Hz gibi alçak frekanslarda zirve ve çökmeyi azaltarak rezonans kontrolü sağlamaktadır. Aynı zamanda daha üst oktavlarda erken yararlı yansımaların sönümlenmesini engellemektedir. Aynı zamanda ses alanı dağınıklığı sağlamaktadır.

Anket ve ölçüm çalışmaları sonucunda elde edilen veriler göstermektedir ki, hacimlerin tasarımında zaman tepkisi ile beraber frekans tanım alanındaki değerlendirmeler de göz önünde bulundurulmalıdır. Geleneksel düşme süresi

parametreleri 1/3 ya da 1/1 oktav bantlarda belirli bir bilgi verse de beraber odaların rezonansa bağı spektral içeriği anlaşılmamaktadır. Bu nedenle Q-faktör ve modal düşme süresi ile alıcı bazında analizlerin yapılması gerekmektedir. Fakat literatürde elde edilen eşik değeri kayıt alanları için önerilmiştir. Anket sonuçları ve ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında optimum değerler açısından 125 Hz ve 250 Hz’de toleransın daha yüksek olabileceği görülmüştür.

Odaların frekans tepkisi alıcı bazlı değerlendirilebileceği gibi uzamsal olarak da değerlendirilebilmektedir. Çalışmada kullanılan MSV ve VSA ölçütleri ile sırasıyla alıcılar arası sapmalar ve frekans tepkisindeki varyans farklı varyasyonlar karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda odanın ses alanına uygun olarak elde edilen sistemin iyileştirilmesi ses alanında elde edilen maksimum dağınıklık ile ilişkilendirilmiştir. Karşılaştırma sonucunda ise frekans bandına yönelik farklı sistem ihtiyaçları olduğu belirlenmiştir. Buna göre 63 Hz’de ancak düzensiz oda geometrisi ile dağınıklık sağlanabilmektedir. Aynı zamanda yüzey bazında bakıldığında dar bant yutucu sistemin 63 Hz’de kontrol sağlayabildiği, diğer yüzeylerde ise yansıtıcı sisteme benzer bir tepki yarattığı görülmüştür. 125 Hz ve 250 Hz’de ise odanın diğer yapı elemanları ile beraber oda sönümlenmesi artmaktadır. Dolayısıyla sönümlenmenin fazla olduğu bir ortamda düşme sürelerine bakıldığında varyasyonlar arası farklılığın fark eşiğinin altında olduğu görülmüştür. Fakat yansımaların algılanabilirliği ve rezonansların işitilebilirliği ile ilişkili frekans tanım alanında yapılan analizlerde farkların algı eşiğinin üzerinde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu tür hacimlerin tasarımında sadece nesnel akustik parametrelerin değerlendirilmesi gerekli akustik kalitenin sağlanması anlamında yeterli değildir. Yansımaların ve rezonansların alıcı bazında ve uzamsal olarak frekans tepkisi analizleri ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, tasarım yaklaşımında kullanılan rezonansa ilişkin ölçütler ve yaklaşım aynı zamanda ISO 23591:2021’de belirtilen tasarım kriterleri ve ölçütleri açısından destekleyicidir.

6.5 Çalışmanın İleride Yapılacak Çalışmalarda Kullanılabilirliği

Küçük hacimlerin tasarımında rezonansların etkisiyle oluşan ses alanının ve rezonans çözümü olarak önerilen total azaltımın müzisyen algısı ve izleniminde oluşturduğu avantajlar ve dezavantajlar sunulmuştur.

Önerilen yaklaşımda ölçütler çerçevesinde, sorunlu frekansların çözümüne yönelik hacim bazında ve alıcı bazında yapılan algı ile ilişkili değerlendirmeler bir optimizasyon sürecini tanımlamaktadır. Yaklaşım önerisi bir örnek üzerinden irdelenmiştir, fakat gelecek çalışmalarda bir tasarımın optimizasyon sürecinde tanımlanması gereken hedefler ve kısıtlar için gerekli altyapı hazırlanmıştır. Aynı zamanda çalışmada tanımlanan ses alanı dağınıklığına dayanan optimizasyon sürecinin ve spektral içeriğin değerlendirilmesinin, sahnedeki ses alanı tasarımı ve daha büyük ölçekli müzik hacimlerin akustik tasarımı için de bir yaklaşım önerisi olarak kurgulanabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.





KAYNAKLAR

- Acousticmodelling.** (2018). “www.acousticmodelling.com”.
- Acoustics Engineering.** (2007). “Measuring Impulse Responses Using Dirac”.
- Adrian James Acoustics.** (2000). *Workshop on Room Acoustic Measurements - Analysis Of Comparative Measurements*. National Physical Laboratory.
- Allard, J. F., ve Y. Champoux.** (1992). “New Empirical Equations for Sound Propagation in Rigid Frame Fibrous Materials”. *The Journal of the Acoustical Society of America* 91(6):3346-53.
- Angus, Jamie.** (1999). “The Effect of Diffusers on Frequency Dependent Room Mode Decay”. New York.
- ANSI/ASA S12.60.** (2020). *ANSI/ASA S12.60/Part 1-2010 (r2020) - Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools*. American National Standards Institute.
- Aretz, Marc, ve Michael Vorländer.** (2012). “Combined Wave and Ray Based Room Acoustic Simulations of Small Rooms”. Aachen University, Berlin.
- Barron, Michael.** (2010). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. Madison Avenue, New York.
- Barron, Mike.** (1971). “The Subjective Effects of First Reflections In Concert Halls—The Need For Lateral Reflections”. *Journal of Sound and Vibration* 15(4):475-94. doi: 10.1016/0022-460X(71)90406-8.
- Beranek, L. L.** (1962). *Music, Acoustics and Architecture*. Wiley; 1st edition.
- Bjor, Ole Herman, ve Igor Nikolic.** (2004). “Building and Room Acoustics Measurements With Sine Sweep Technique”. Strasbourg, France.
- Blauert, Jens, ve Werner Lindemann.** (1986). “Auditory spaciousness: Some further psychoacoustic analyses”. *The Journal of the Acoustical Society of America* 80(2):533-42. doi: 10.1121/1.394048.
- Bolt, Richard Henry.** (1947). “Normal Frequency Spacing Statistics”. *Journal of Acoustical Society of America* 19:71-90.
- Bonello, Oscar Juan.** (1981). “A New Criterion for the Distribution of Normal Room Modes”. *Journal of the Audio Engineering Society* 29(9):597-605.
- Bradley, J. S.** (2010). “Review of Objective Room Acoustics Measures and Future Needs”. Melbourne, Australia.
- Bradley, J. S., R. Reich, ve S. G. Norcross.** (1999). “A Just Noticeable Difference in C 50 for Speech”. *Applied Acoustics* 58(2):99-108. doi: 10.1016/S0003-682X(98)00075-9.

- Bunton, John D., ve Richard H. Small.** (1982). "Cumulative Spectra, Tone Bursts, and Apodization". *Journal of the Audio Engineering Society* 30(6):386-95.
- Burghauser, Jarmil, ve Antonín. Špelda.** (1971). *Akustische Grundlagen des Orchestrierens: Handbuch für Komponisten, Dirigenten und Tonmeister*. Regensburg: G. Bosse.
- Cabrera, Densil.** (2007). "Acoustic clarity and auditory room size perception". 3:1830-37.
- Collison, Bill.** (2010). "QRDude versiyon 3.10".
- COMSOL Multiphysics.** (2018). "Comsol Multiphysics User Guide".
- Cox, Trevor, William Davies, ve Yiu Lam.** (1993). "The Sensitivity of Listeners to Early Sound Field Changes in Auditoria". *Acta Acustica united with Acustica* 79:27-41.
- Cox, Trevor J., ve Peter D'Antonio.** (2004). *Acoustic Absorbers and Diffusers, Theory, Design and Application*. New York: Taylor & Francis.
- Cox, Trevor J., Peter D'Antonio, ve Mark R. Avis.** (2004). "Room Sizing and Optimization at Low Frequencies". *Journal of the Audio Engineering Society* 52(6).
- Cremer, Lothar, ve Helmut A. Müller.** (1982). *Principles and Applications of Room Acoustics*. Applied Science.
- Çelik, Hilal, Nur Başer Baykal, ve Hale Nur Kılıç Memur.** (2020). "Nitel Veri Analizi ve Temel İlkeleri". *Eğitimde Nitel Araştırmalar Dergisi* 8(1):379-406. doi: 10.14689/issn.2148-2624.1.8c.1s.16m.
- Dammerud, Jens Jørgen.** (2009). "Stage Acoustics for Symphony Orchestras in Concert Halls". University of Bath, Bath.
- Dance, Stephen M., ve Gil Van Buuren.** (2013). "Effects of Damping on the Low-Frequency Acoustics of Listening Rooms Based on an Analytical Model". *Journal of Sound and Vibration* 332:6891-6904.
- Davis, Don, Eugene Patronis, ve Pat Brown.** (2013). *Sound System Engineering*. Oxford, UNITED KINGDOM: Taylor & Francis Group.
- Demirkale, Sevtap Yılmaz.** (2007). *Birsen Çevre ve Yapı Akustiği*. Ankara: Birsen Yayınevi.
- Dorrego, Fernando del Solar, ve Michelle C. Vigeant.** (2022). "A Study of the Just Noticeable Difference of Early Decay Time for Symphonic Halls". *The Journal of the Acoustical Society of America* 151(80).
- Dorrego, Fernando, ve Michelle Vigeant.** (2020). "The Just Noticeable Difference of Early Decay Time". *The Journal of the Acoustical Society of America* 148(4). doi: 10.1121/1.5147716.
- EBU Tech 3286.** (2000). *EBU Tech 3286 Assessment Methods for the Quality of Sound Material - Multichannel*.
- Ekiz, Durmuş.** (2020). *Bilimsel Araştırma Yöntemleri / Doç. Dr. Durmuş Ekiz*. Anı Yayıncılık.

- Errede, Steven.** (2017). *Acoustics of Small Rooms, Home Listening Rooms, Recording Studios*. Illinois: University of Illinois.
- Everest, F. Alton, ve Ken C. Pohlmann.** (2009). *Master Handbook of Acoustics*. The McGraw-Hill Companies.
- Fabiani, Marco, ve Anders Friberg.** (2011). "Influence of Pitch, Loudness, and Timbre on the Perception of Instrument Dynamics". *The Journal of the Acoustical Society of America* 130.
- Fazenda, Bruno M., Matthew Stephenson, ve Andrew Goldberg.** (2015). "Perceptual thresholds for the effects of room modes as a function of modal decay". *The Journal of Acoustical Society of America* 137(3).
- Fazenda, Bruno, Matthew Stephenson, ve Andrew Goldberg.** (2015). "Perceptual Thresholds for the Effects of Room Modes as a Function of Modal Decay". *Journal of Acoustical Society of America*.
- Fazenda, Bruno, ve Matthew Wankling.** (2008). "Optimal Modal Spacing and Density for Critical Listening". San Francisco, CA, USA.
- Franck, Andreas, ve Marc Aretz.** (2007). "Wall Structure Modeling For Room Acoustic And Building Acoustic Fem Simulations". Madrid.
- Gade, Anders Christian** (1989). "Investigations of Musicians' Room Acoustic Conditions in concert halls. Part I: Methods and laboratory experiments". *Acustica*.
- Gade, Anders Christian.** (2010). "Acoustics For Symphony Orchestras; Status After Three Decades Of Experimental Research". Melbourne, Australia.
- Gade, Anders Christian** (2015). "Classical Musicians' Perception of Room Acoustic Conditions". *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain* 25(3):232-35.
- Gilford, C. L. S.** (1979). "The Acoustic Design of Talks Studios and Listening Rooms". *Journal of the Audio Engineering Society* 27(1):17-31.
- Halmrast, Tor.** (2000). "Orchestral Timbre: Comb-Filter Coloration from Reflections". *Journal of Sound and Vibration* 232(1):53-69.
- Halmrast, Tor.** (2013). "Musician'S Perceived Timbre And Strenght In (Too) Small Rooms".
- Hargreaves, Tristan J., Trevor J. Cox, Y. W. Lam, ve Peter D'Antonio.** (2000). "Surface Diffusion Coefficients For Room Acoustics: Free-Field Measures". *Journal of Acoustical Society of America* 108(4).
- Harvie-Clark, Jack, Nicholas Dobinson, ve Richard Hinton.** (2012). "Acoustic Response In Non-Diffuse Rooms". Prague.
- Heutschi, Kurt.** (2016). *Lecture Notes on Acoustics I*. Zurich: Institute for Signal- and Informationprocessing, ISI Swiss Federal Institute of Technology, ETH.
- Hodgson, M.** (1996). "When Is Diffuse-Field Theory Applicable?" *Applied Acoustics* 49:197-207.

- Hong-wei, Wang, ve Huang Kun-peng.** (2009). "Simulation of Room Impulse Response by using Hybrid Method of Wave and Geometrical Acoustics". *Journal Of Temporal Design In Architecture And The Environment* 9(1):9-13.
- Hornikx, Maarten, Constant Hak, ve Remy Wenmaekers.** (2014). "Acoustic Modelling of Sports Halls, Two Case Studies". *Journal of Building Performance Simulation* 8(1):26-38.
- IBM Corp.** (2020). "IBM SPSS Statistics".
- Ingard, Uno.** (1953). "On the Theory and Design of Acoustic Resonators". *The Journal of the Acoustical Society of America* 25(1037).
- International Standard Organization.** (2021). *ISO 23591:2021: Acoustic quality criteria for music rehearsal rooms and spaces.*
- Jacobsen, Finn.** (2009). "The Sound Field in a Reverberation Room". Lecture Notes, Acoustic Technology, Department of Electrical Engineering.
- Jeong, Cheol-Ho ve NX.** (2012). "Absorption and impedance boundary conditions for phased geometrical-acoustics methods". *The Journal of the Acoustical Society of America* 132(4):2347-58.
- Kalkandjiev, Zora Schärer.** (2015). "The Influence of Room Acoustics on Solo Music Performances. An Empirical Investigation". Technischen Universität Berlin, Berlin.
- Kaplanis, Neofytos, Søren Bech, Søren Holdt Jensen, ve Toon van Waterschoot.** (2014). "Perception of Reverberation in Small Rooms: A Literature Study". Helsinki, Finland.
- Kaplanis, Neofytos, Søren Bech, Tapio Lokki, ve Søren Holdt Jensen.** (2019). "Perception and Preference of Reverberation in Small Listening Rooms for Multi-Loudspeaker Reproduction". *The Journal of the Acoustical Society of America* 146(5).
- Karagöz, Yalçın.** (2010). "Nonparametrik Tekniklerin Güç Ve Etkinlikleri". *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi* 9(33).
- Kato, Kosuke, Tsubasa Nagao, Toshio Yamanaka, Keiji Kawai, ve Ken-Ichi Sakakibara.** (2010). "Study on Effect of Room Acoustics on Timbral Brightness of Clarinet Tones. Part I: Subjective Evaluation Through a Listening Experiment". Sydney, Australia.
- Kleiner, Mendel, Peter Svensson, ve Bengt-Inge Dalenbäck.** (1992). "Auralization of QRD and Other Diffusing Surfaces Using Scale Modelling". San Francisco, CA, USA.
- Kleiner, Mendel, Tichy, Jiri.** (2014). *Acoustics of Small Rooms.* CRC Press.
- Knöfel, Björn, Linda Weisheit, ve Jan Troge.** (2018). "Musicians and Their Practice Rooms: What Do They Think About Present Room Acoustics and What Would They Prefer?" Crete.
- Krokstad, A., S. Strom, ve S. Sørsdal.** (1968). "Calculating the Acoustical Room Response by the Use of a Ray Tracing Technique". *Journal of Sound and Vibration* 8(1):118-25. doi: 10.1016/0022-460X(68)90198-3.

- Kuttruff, Heinrich.** (2009). *Room Acoustics*. 5th bs. Spon Press.
- Lachmann, Martin, Christiane Bangert, Martin Peter, ve Domink Kessler.** (2019). "Rooms for Music Education and Rehearsal – Evolution of Their Acoustic Design and Comparison of Results Between Questionnaires and Measurement". Amsterdam.
- Lam, Yiu Wai.** (2005). "Issues For Computer Modelling Of Room Acoustics In Non-Concert Hall Settings". *Acoustical Science and Technology* 26(2):145-55.
- Lokki, T., J. Patynen, A. Kuusinen, ve S. Tervo.** (2012). "Disentangling Preference Ratings of Concert Hall Acoustics Using Subjective Sensory Profiles". *The Journal of the Acoustical Society of America* 132(5):3148-61. doi: 10.1121/1.4756826.
- Long, Marshall.** (2006). *Architectural Acoustics*. London, UK: Elsevier Academic Press.
- Louden, M. M.** (1971). "Dimension Ratios Of Rectangular Rooms With Good Distribution Of Eigentones". *Acustica* 24:101-4.
- Mak, Cheuk Ming, ve Zhen Wang.** (2015). "Recent Advances in Building Acoustics: An Overview of Prediction Methods and Their Applications". *Building and Environment* 91:118-26.
- Mariette Bengtsson.** (2016). "How to Plan and Perform a Qualitative Study Using Content Analysis". *NursingPlus Open* (2):8-14.
- Marshall, A. H., D. Gottlob, ve H. Alrutz.** (1978). "Acoustical Conditions Preferred For Ensemble". *The Journal of the Acoustical Society of America* 64:1437-42.
- Marshall, A. H., ve J. Meyer.** (1985). "The Directivity and Auditory Impressions of Singers". *Acustica* 58:130-40.
- McCue, Edward, ve Richard H. Talaske.** (2004). "Acoustical Design of Music Education Facilities". Strasbourg.
- Mehta, Cyrus R., ve Nitin R. Patel.** (2010). *IBM SPSS Exact Tests*. SPSS Inc. 1989, 2010.
- Meyer, J.** (1971). "Directivity of the Bowed Stringed Instruments and Its Effect on Orchestral Sound in Concert Halls". *The Journal of the Acoustical Society of America* 51(6):1994-2009.
- Meyer, J.** (2009). *Acoustics and Performance of the Music*. 5. Edition. Germany: Springer.
- Miles, Matthew B., A. Michael Huberman, ve Johnny Saldana.** (2014). *Qualitative Data Analysis*. SAGE.
- Milković, Marin, Miljenko Krhen, ve Siniša Fajt.** (2017). "Correlation Between Objective and Subjective Acoustic Quality Parameters of Professional Sound Control Rooms". *Tehnicki Vjesnik* 24:543-50. doi: 10.17559/TV-20150921112448.

- Mondet, Boris, Jonas Brunskog, ve Jens Holger Rindel.** (2017). "Retrieving Complex Surface Impedances From Statistical Absorption Coefficients". Hong Kong.
- Murphy, Damian T., Alex Southern, ve Lauri Savioja.** (2014). "Source Excitation Strategies for Obtaining Impulse Responses in Finite Difference Time Domain Room Acoustics Simulation". *Applied Acoustics* 82:6-14. doi: 10.1016/j.apacoust.2014.02.010.
- Navarro, Juan M., ve Jose Escolano.** (2015). "Simulation of Building Indoor Acoustics Using an Acoustic Diffusion Equation Model". *Journal of Building Performance Simulation* 8(1):3-14.
- Naylor, G. M., ve R. J. M. Craik.** (1988). "The Effects of Level Difference and Musical Texture on Ease of Ensemble". *Acustica* 65:95-100.
- Newell, Philip.** (2008). *Recording Studio Design*. Oxford, UK: Focal Press.
- Noxon, Arthur.** (1986). "Room Acoustics and Low Frequency Damping". Los Angeles, CA, USA.
- Okuzono, Takeshi, Toru Otsuru, Reiji Tomiku, ve Noriko Okamoto.** (2010). "Fundamental Accuracy of Time Domain Finite Element Method for Sound-Field Analysis of Rooms". *Applied Acoustics* Applied Acoustics(71):940-46.
- Olsson, Harry F.** (1967). *Music, Physics and Engineering*. New York: Dover Books.
- Osman, Riduan.** (2005). "Predicting the Acoustic Quality of Small Music Rooms". PhD Thesis, University of Sydney, Australia.
- Otondo, Felipe, ve Jens Holger Rindel.** (2004). "The Influence of the Directivity of Musical Instruments in a Room". *Acta Acustica United With Acustica* 90:1178-84.
- Papadakis, Nikolaos M.** (2017). "Application of Finite Element Method for Estimation of Acoustic Parameters". Technical University of Crete, Chania, Greece.
- Park, Hocheul, ve Jin Yong Jeon.** (2016). "Acoustical Investigation of Ambience Sound for Auditory Environments in Music Performance Spaces". *Building and Environment* 107 (2016):10-18.
- Pätynen, Jukka, ve Tapio Lokki.** (2010). "Directivities of Symphony Orchestra Instruments". *Acta Acustica united with Acustica* 96(1):138-67. doi: 10.3813/aaa.918265.
- Pelzer, Sönke, Marc Aretz, ve Michael Vorländer.** (2011). "Quality Assessment of Room Acoustic Simulation Tools by Comparing Binaural Measurements and Simulations in an Optimized Test Scenario". Aalborg, Denmark.
- Pierce, John J.** (1983). *The Science of Musical Sound*. New York: Scientific American Books.
- Prato, Andrea, Federico Casassa, ve Alessandro Schiavi.** (2016). "Reverberation Time Measurements in Non-Diffuse Acoustic Field by the Modal Reverberation Time". *Applied Acoustics* 110:160-69.

- R. Bistafa, Sylvio, Mark P. Hodgkin, William S. Morita, Bruno O. Kohn, ve Joao J. Neto.** (2012). "Adaptive Control of Low-Frequency Acoustic Modes in Small Rooms". *The Open Acoustics Journal* 5(1).
- Rasmussen, Birgit, Jens Holger Rindel, ve Helge Henriksen.** (1989). "Design and Measurement of Short Reverberation Times at Low Frequencies in Talk Studios". Audio Engineering Society.
- Rindel, Jens Holger.** (2011). "Fundamentals of Acoustics and Noise Control". Lecture Notes, Department of Electrical Engineering, Technical University of Denmark.
- Rindel, Jens Holger.** (2014). "New Norwegian Standard on the Acoustics of Rooms for Music Rehearsal and Performance". Forum Acusticum.
- Rubak, Per.** (2004). "Coloration in Room Impulse Responses". içinde C. BNAM2004-2. Mariehamn, Åland.
- Rumsey, Francis.** (2002). "Spatial Quality Evaluation for Reproduced Sound: Terminology, Meaning, and a Scene-Based Paradigm". *Journal of Audio Engineering Society* 50(9):651-66.
- Russell, Daniel A., Joseph P. Titlow, ve Ya-Juan Bemmen.** (1998). "Acoustic Monopoles, Dipoles, And Quadrupoles: An Experiment Revisited". *American Journal of Physics* 67(8):660-64.
- Sakamoto, Shinichi, Hiroshi Nagatomo, Ayumi Ushiyama, ve Hideki Tachibana.** (2008). "Calculation of Impulse Responses and Acoustic Parameters in a Hall by the Finite-Difference Time-Domain Method". *Acoustical Science and Technology* 29(4).
- Sakuma, Tetsuya, ve Shinichi Sakamoto.** (2014). *Computational Simulation in Architectural and Environmental Acoustics*. Tokyo: Springer Japan.
- Sanders, Janne.** (2003). "Suitability Of New Zealand Halls For Chamber Music".
- Sato, S., Y. Ando, ve S. Ota.** (2000). "Subjective Preference of Cellists for the Delay Time of a Single Reflection in a Performance". *Journal of Sound and Vibration* 232(1):27-37. doi: 10.1006/jsvi.1999.2683.
- Schmalle, Holger, Dirk Noy, Stefan Feistel, Gabriel Hauser, Wolfgang Ahnert, ve John Storyk.** (2011). "Accurate Acoustic Modeling of Small Rooms". New York, NY, USA.
- Schroeder, M. R.** (1961). "Novel Uses of Digital Computers in Room Acoustics". *Journal of Acoustical Society of America* 33:1669. doi: 10.1121/1.1936681.
- Schroeder, M. R., ve K. H. Kuttruff.** (1962). "On Frequency Response Curves in Rooms. Comparison of Experimental, Theoretical, and Monte Carlo Results for the Average Frequency Spacing Between Maxima". *Journal of Acoustical Society of America* 34(1):76-80.
- Sevastiadis, Christos, George Kalliris, ve George Papanikolaou.** (2010). "Investigation of Low-Frequency Sound Colouration Treatments in Small Rooms by Means of Finite Element Analysis". *International Journal of Acoustics and Vibration* 15(3).

- Shtrepi, Louena, Arianna Astolfi, Gianluca D'Antonio, ve Martin Guski.** (2016). "Objective And Perceptual Evaluation Of Distance-Dependent Scattered Sound Effects In A Small Variable-Acoustics Hall". *The Journal of the Acoustical Society of America* 140(5):3651-62.
- Shtrepi, Louena, Arianna Astolfi, Sönke Pelzer, Renzo Vitale, ve Monika Rychtáriková.** (2015). "Objective and Perceptual Assessment of the Scattered Sound Field in a Simulated Concert Hall". *Journal of Acoustical Society of America* 138:1485-97. doi: 10.1121/1.4929743.
- Siltanen, Samuel, Tapio Lokki, ve Lauri Savioja.** (2010). "Rays or Waves? Understanding the Strengths and Weaknesses of Computational Room Acoustics Modeling Techniques". Melbourne, Australia.
- Sinal, Özgün, ve Semiha Yilmazer.** (2018). "Effects of Perceived Singing Effort on Classical Singers' Reverberation Time Preferences Towards Music Practice Rooms". *Applied Acoustics* 136:132-38. doi: 10.1016/j.apacoust.2018.02.013.
- Skålevik, Magne.** (2014). "Consistency In Music Room Acoustics". Krakow.
- Stephenson, Matthew.** 2012. "Assessing the Quality of Low Frequency Audio Reproduction in Critical Listening Spaces". University of Salford, Salford, UK.
- Suh, J. S., ve P. A. Nelson.** (1999). "Measurement of Transient Response of Rooms and Comparison with Geometrical Acoustic Models". *The Journal of the Acoustical Society of America* 105(4):2304-17.
- T. Bayazıt, Nurgün.** (2006). *Akustik Ölçüm Notları*. İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Fiziği Laboratuvarı.
- Toole, Floyd E.** (2008). *Sound Reproduction: Loudspeakers and Rooms*. Boston: Elsevier Ltd.
- Toole, Floyd E., ve Sean E. Olive.** (1988). "The Modification of Timbre by Resonances: Perception and Measurement". *Journal of Audio Engineering Society* 36(3).
- TS EN ISO 3382.** (2010). *TS EN ISO 3382-1 Akustik - Odaların Akustik Parametrelerinin Ölçülmesi - Bölüm 1: Gösteri Mekanları (ISO 3382-1-2009)*. Türk Standardları Enstitüsü.
- TS EN ISO 3382-2.** (2009). *TS EN ISO 3382-2 Akustik - Odaların Akustik Parametrelerinin Ölçülmesi - Bölüm 2: Sıradan Odalarda Çınlama Süresi (ISO 3382-2-2008)*. Türk Standardları Enstitüsü.
- TS EN ISO 16283-1.** (2014). *TS EN ISO 16283-1 Akustik- Yapıların ve Yapı Elemanlarının Ses Yalıtımı İçin Sahada Yapılacak Ölçümler - Bölüm 1: Hava ile Yayılan Sesin Yalıtımı (ISO 16283-1:2014)*. Türk Standardları Enstitüsü.
- Ueno, Kanako, ve Hideki Tachibana.** (2003). "Experimental Study On The Evaluation Of Stage Acoustics By Musicians Using A 6-Channel Sound Simulation System". *Acoustical Science and Technology* 24(3):130-38.

- Vigeant, Michelle C., Robert D. Celmer, Chris M. Jasinski, Meghan J. Ahearn, Matthew J. Schaeffler, Clothilde B. Giacomoni, Adam P. Wells, ve Caitlin I. Ormsbee.** (2015). "The Effects of Different Test Methods on the Just Noticeable Difference of Clarity Index for Music". *Journal of Acoustical Society of America* 138(1):476-91.
- Vorländer, Michael.** (1989). "Simulation of the Transient and Steady-State Sound Propagation in Rooms Using a New Combined Ray-Tracing/Image-Source Algorithm". *The Journal of the Acoustical Society of America* 86(1):172-78. doi: 10.1121/1.398336.
- Vorlander, Michael.** (1998). "Objective Characterization of Sound Fields in Small Rooms". Copenhagen, Denmark.
- Vorländer, Michael.** (2011). "Models And Algorithms For Computer Simulations In Room Acoustics". Valencia.
- Vorländer, Michael.** (2013). "Computer Simulations in Room Acoustics: Concepts and Uncertainties". *The Journal of the Acoustical Society of America* 133(1203).
- Wankling, Matthew, ve Bruno Fazenda.** (2009). "Subjective Validity of Figures of Merit for Room Aspect Ratio Design". Munich.
- Wankling, Matthew, Bruno Fazenda, ve William Davies.** (2010). "Improving the Assessment of Low Frequency Room Acoustics Using Descriptive Analysis". San Francisco, CA, USA: Audio Engineering Society.
- Wankling, Matthew, Bruno Fazenda, ve William Davies.** (2012). "The Assessment of Low-Frequency Room Acoustic Parameters Using Descriptive Analysis". *Journal of Audio Engineering Society* 60(5).
- Welti, Todd, ve Allan Devantier.** (2006). "Low-Frequency Optimization Using Multiple Subwoofers". *Journal of Audio Engineering Society* 54(5).
- Yadav, Manuj, Densil Cabrera, Luis Miranda, William L. Martens, Doheon Lee, ve Ralph Collin.** (2013). "Investigating Auditory Room Size Perception with Autophonic Stimuli". New York, NY, USA.
- Yokota, Takatoshi, Shinichi Sakamoto, Hideki Tachibana, Masahito Ikeda, Kengo Takahashi, ve Toru Ooturu.** (2004). "Comparison of Room Impulse Response Calculated by the Simulation Methods Based on Geometrical Acoustics and Wave Acoustics". Kyoto, Japan.
- Yousefzadeh, Behrooz, ve Murray Hodgson.** (2012). "Energy and Wave-Based Beam Tracing Prediction of Room-Acoustical Parameters Using Different Boundary Conditions". *The Journal of the Acoustical Society of America* 132(3):1450-61.
- Zhang, Shuying, ve Joonhee Lee.** (2021). "Diffuseness Quantification in a Reverberation Chamber and Its Variation with Fine-Resolution Measurements". *Buildings* 11(11):519. doi: 10.3390/buildings11110519.
- Ziemer, Tim.** (2014). "Implementation of the Radiation Characteristics of Musical Instruments in Wave Field Synthesis Applications". Universität Hamburg, Hamburg.



EKLER

EK A: Akustik Ölçüm Sonuçları

EK B: Anket Formu

EK C: MSV -VSA Ölçütlerinin Frekans Tepkisi Üzerinden Elde Edilmesi



EK A: Akustik Ölçüm Sonuçları

Saha çalışmaları kapsamında bulunan odaların nesnel değerlendirme parametrelerinin elde edilmesi amacıyla TS EN ISO 3382-1:2010 ve TS EN ISO 3382-2:2009 standartlarına uygun olarak yapılan hacim akustiği ölçüm sonuçları 2 kaynak (L1, L2) ve 6 alıcı noktası için 1/1 oktav bantta ve ek olarak ortalama ve standart sapma değerleriyle beraber sunulmuştur. Çizelge A.1’de stüdyo odasına ait EDT, T20, T30, T60 sonuçları sunulmuştur. Çizelge A.2’de stüdyo odasına ait C20, C50, C80 ve TS sonuçları verilmiştir. Çizelge A.3’te prova odasına ait EDT, T20, T30, T60 sonuçları sunulmuştur. Çizelge A.4’te prova odasına ait C20, C50, C80 ve TS sonuçları verilmiştir. Çizelge A.5’te stüdyo odasına ait SNR ölçüm sonuçları verilmiştir. Çizelge A.6’da prova odasına ait SNR ölçüm sonuçları verilmiştir.

Çizelge A.1: Stüdyo odası L1 ve L2 kaynak noktaları için alıcı noktaları 1/1 oktav bantta ölçüm sonuçları

Parametre	Frekans (Hz)	ORT	L1 Kaynak Konumu						L2 Kaynak Konumu					
			M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6
EDT (s)	63	0,517	0,511	0,727	0,517	0,42	0,659	0,837	0,195	0,614	0,653	0,585	0,249	0,23
	125	0,443	0,428	0,453	0,456	0,571	0,484	0,321	0,371	0,483	0,687	0,392	0,32	0,345
	250	0,398	0,453	0,638	0,482	0,064	0,466	0,366	0,397	0,402	0,445	0,325	0,347	0,387
	500	0,368	0,39	0,561	0,383	0,364	0,312	0,296	0,361	0,3	0,366	0,426	0,303	0,353
	1000	0,394	0,457	0,404	0,333	0,404	0,419	0,427	0,415	0,391	0,437	0,331	0,27	0,437
	2000	0,465	0,511	0,485	0,452	0,468	0,482	0,485	0,435	0,437	0,522	0,444	0,402	0,458
	4000	0,496	0,513	0,534	0,46	0,459	0,47	0,497	0,518	0,532	0,564	0,457	0,472	0,474
T20 (s)	63	0,646	0,654	0,713	0,738	0,625	0,54	0,679	0,634	0,654	0,534	0,521	0,76	0,699
	125	0,576	0,59	0,451	0,741	0,563	0,592	0,618	0,578	0,477	0,583	0,502	0,614	0,604
	250	0,432	0,453	0,464	0,376	0,531	0,458	0,445	0,486	0,381	0,415	0,441	0,362	0,366
	500	0,393	0,37	0,379	0,408	0,456	0,417	0,394	0,401	0,404	0,435	0,332	0,388	0,334
	1000	0,405	0,398	0,391	0,414	0,408	0,444	0,401	0,395	0,4	0,39	0,404	0,421	0,392
	2000	0,472	0,456	0,476	0,483	0,487	0,488	0,452	0,453	0,467	0,497	0,459	0,458	0,484
	4000	0,505	0,509	0,506	0,491	0,513	0,489	0,526	0,506	0,515	0,507	0,508	0,495	0,491
T30 (s)	63	0,614	0,596	0,62	0,649	0,66	0,549	0,637	0,59	0,643	0,631	0,499	0,671	0,622
	125	0,586	0,575	0,511	0,661	0,59	0,622	0,565	0,579	0,497	0,651	0,649	0,593	0,537
	250	0,422	0,422	0,438	0,41	0,476	0,454	0,405	0,438	0,39	0,412	0,428	0,399	0,389
	500	0,395	0,383	0,366	0,393	0,418	0,442	0,39	0,392	0,42	0,411	0,368	0,413	0,339
	1000	0,412	0,425	0,407	0,421	0,415	0,434	0,404	0,425	0,422	0,397	0,389	0,423	0,378
	2000	0,472	0,48	0,494	0,477	0,481	0,493	0,441	0,466	0,464	0,49	0,466	0,441	0,471
	4000	0,506	0,515	0,505	0,5	0,512	0,51	0,518	0,501	0,509	0,5	0,508	0,49	0,499
T60 (s)	63	0,629	0,596	0,62	0,738	0,66	0,549	0,637	0,59	0,643	0,631	0,499	0,76	0,622
	125	0,58	0,575	0,511	0,741	0,59	0,622	0,565	0,579	0,497	0,651	0,502	0,593	0,537
	250	0,415	0,422	0,253	0,41	0,531	0,454	0,458	0,438	0,39	0,412	0,428	0,399	0,389
	500	0,401	0,383	0,366	0,408	0,456	0,442	0,39	0,392	0,42	0,435	0,368	0,413	0,339
	1000	0,41	0,425	0,407	0,421	0,415	0,434	0,404	0,425	0,4	0,397	0,389	0,423	0,378
	2000	0,47	0,456	0,494	0,477	0,481	0,493	0,441	0,466	0,464	0,49	0,466	0,441	0,471
	4000	0,506	0,515	0,505	0,5	0,512	0,51	0,518	0,501	0,509	0,5	0,508	0,49	0,499

Çizelge A.2: Stüdyo odası L1 ve L2 kaynak noktaları için alıcı noktaları 1/1 oktav bantta ölçüm sonuçları

Parametre	Frekans (Hz)	ORT	L1 Kaynak Konumu						L2 Kaynak Konumu					
			M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6
C20 (s)	63	1,33	3,77	-1,58	0,03	2,92	1,96	0,5	4,9	1,86	-1,01	-4,64	1,37	5,89
	125	-2,09	1,18	-3,09	-2,1	2,36	-5,17	-1,39	0,04	-0,88	-7,63	-3,84	2,31	-6,85
	250	1,34	0,71	-2,8	3,59	10,64	2,66	5,73	-1,95	4,98	2,11	-3,66	-5,27	-0,61
	500	2,73	-0,08	0,29	3,53	4,89	3,89	2,44	2,48	5,13	5,32	-0,39	3,01	2,21
	1000	1,86	2,76	0,37	1,79	3,76	1,52	1,2	0,46	3,04	1,47	2,05	1,69	2,18
	2000	0,74	-0,58	-1,32	1,64	3,92	0,12	-0,03	0,33	3,89	0,28	0,28	0,55	-0,2
	4000	-0,41	-2,28	-2,28	-0,14	3,21	-0,96	1,36	-1,54	3,01	-1,12	-1,67	-0,72	-1,79
C50 (s)	63	4,39	5,24	2,45	5,1	8,51	0,59	3,41	8,15	0,01	3,87	0,77	7,08	7,48
	125	5,44	6,13	3,66	5,58	3,85	2	8,85	6,45	4,13	1,04	7,3	8,72	7,62
	250	7,92	6,28	1,27	8,81	12,56	8,61	10,13	5,65	10,14	8,25	8,43	6,89	8,05
	500	9,16	6,65	4,82	10,15	10,29	11,12	9,98	8,85	11,34	10,02	6,58	9,04	11,04
	1000	8,11	6,84	6,08	9,66	9,24	7,89	7,78	7,25	9,12	7,59	7,99	10,19	7,68
	2000	6,52	4,36	4,99	7,74	8,34	5,74	6,09	6,2	8,56	5,92	6,55	7,56	6,19
	4000	5,5	4,11	3,84	6,57	8,33	5,04	6,7	3,85	6,85	3,99	5,46	5,5	5,79
C80 (s)	63	8,43	9,56	8,46	8,91	9,25	6,68	5,44	12,93	7,21	6,33	5,68	11,02	9,66
	125	9,92	10,21	9,83	9,18	11,47	8,58	10,08	10,91	9,98	4,14	10,98	10,23	13,4
	250	12,94	12,35	7,2	14,41	16,67	12,3	14,13	12,79	17,48	12,14	11,92	12,4	11,46
	500	13,71	13,61	10,45	14,24	14,28	15,94	14,6	13,24	15,55	13,68	11,03	13,3	14,55
	1000	12,68	11,78	11,7	13,37	13,81	11,38	13,15	10,97	13,7	13,03	12,99	14,24	12,01
	2000	10,66	9,26	9,53	11,67	12,76	10,45	9,68	10,7	12,45	9,64	9,95	11,27	10,61
	4000	9,91	8,72	8,78	10,57	12,06	9,98	10,63	8,68	11,02	8,68	9,59	10,01	10,13
TS (ms)	63	45,2	38,4	60,9	48,2	36,8	52,4	54	30,9	43,3	51,3	61,5	36,5	28,7
	125	42	35,7	46,3	40,6	33,1	51,3	38,2	41,4	40,7	59,3	42,3	32,3	42,4
	250	28,8	31,9	49,4	21,6	12,7	24,9	18,6	34,7	18,6	26	38,5	37	31,6
	500	22,1	26,2	32,9	18,5	15,4	18,6	22,7	22,7	16,4	17,2	30,3	22,7	21,5
	1000	23,9	26,1	28,9	20,2	18,7	23,8	23,6	27,7	20,7	23,4	27	22,7	24,4
	2000	28,8	35,4	36	23,7	19,9	30,9	31,4	30,7	19,4	30,8	31,9	27,2	28,3
	4000	32,2	39,4	39,1	28,6	19,5	34,1	26,7	39,1	23	36,2	36	32,8	32,5

Çizelge A.3: Prova odası L1 ve L2 kaynak noktaları için alıcı noktaları 1/1 oktav bantta ölçüm sonuçları

Parametre	Frekans (Hz)	ORT	L1 Kaynak Konumu						L2 Kaynak Konumu					
			M1	M2	M3	M4	M5 (köşe)	M6 (köşe)	M1	M2	M3	M4	M5 (köşe)	M6 (köşe)
EDT (s)	63	0,57	0,75	0,608	0,551	0,336	0,761	0,376	0,436	0,744	0,814	0,408	0,537	0,553
	125	0,64	0,505	0,642	0,699	0,505	0,573	0,654	0,545	0,686	0,801	0,581	0,668	0,508
	250	0,63	0,768	0,57	0,611	0,608	0,434	0,81	0,482	0,621	0,758	0,673	0,518	0,768
	500	0,44	0,566	0,355	0,41	0,455	0,277	0,507	0,521	0,428	0,456	0,421	0,533	0,566
	1000	0,40	0,559	0,418	0,318	0,359	0,367	0,488	0,353	0,334	0,398	0,381	0,465	0,559
	2000	0,53	0,656	0,506	0,452	0,48	0,643	0,538	0,451	0,489	0,529	0,481	0,607	0,656
	4000	0,56	0,573	0,6	0,558	0,5	0,623	0,58	0,541	0,571	0,562	0,543	0,568	0,573
T20 (s)	63	0,79	0,704	1,004	0,958	0,72	0,9	0,881	0,629	0,826	0,594	0,624	0,671	0,704
	125	0,83	0,931	0,88	0,794	0,959	0,674	0,821	0,822	0,797	0,861	0,814	0,75	0,931
	250	0,77	0,838	0,857	0,632	0,804	0,638	0,817	0,767	0,683	0,857	0,802	0,76	0,838
	500	0,63	0,679	0,738	0,553	0,58	0,554	0,645	0,704	0,603	0,708	0,616	0,59	0,679
	1000	0,59	0,645	0,574	0,575	0,563	0,686	0,626	0,547	0,47	0,635	0,588	0,664	0,645
	2000	0,77	0,825	0,802	0,781	0,723	0,808	0,837	0,772	0,7	0,786	0,717	0,822	0,825
	4000	0,68	0,765	0,662	0,68	0,64	0,686	0,726	0,622	0,649	0,667	0,658	0,753	0,765
T30 (s)	63	0,79	0,782	1,045	1,124	0,717	0,861	0,865	0,622	0,828	0,54	0,633	0,721	0,782
	125	0,90	0,987	0,881	0,879	0,897	0,731	0,756	0,829	0,986	0,961	0,976	0,867	0,987
	250	0,82	0,866	0,859	0,776	0,87	0,631	0,803	0,869	0,79	0,942	0,78	0,803	0,866
	500	0,65	0,742	0,698	0,563	0,536	0,617	0,788	0,746	0,643	0,741	0,564	0,582	0,742
	1000	0,62	0,658	0,636	0,648	0,635	0,652	0,666	0,544	0,45	0,681	0,647	0,656	0,658
	2000	0,79	0,805	0,838	0,825	0,736	0,806	0,81	0,811	0,722	0,814	0,749	0,804	0,805
	4000	0,71	0,762	0,706	0,721	0,686	0,72	0,736	0,673	0,685	0,68	0,698	0,741	0,762
T60 (s)	63	0,78	0,704	1,004	0,958	0,717	0,861	0,865	0,622	0,818	0,54	0,633	0,721	0,704
	125	0,84	0,987	0,881	0,879	0,897	0,731	0,756	0,829	0,797	0,961	0,814	0,867	0,987
	250	0,80	0,866	0,859	0,632	0,87	0,631	0,803	0,767	0,843	0,857	0,78	0,803	0,866
	500	0,63	0,742	0,698	0,563	0,535	0,617	0,522	0,746	0,643	0,741	0,564	0,59	0,742
	1000	0,60	0,658	0,636	0,648	0,635	0,652	0,666	0,544	0,351	0,681	0,647	0,656	0,658
	2000	0,77	0,805	0,838	0,825	0,575	0,806	0,81	0,811	0,722	0,814	0,749	0,804	0,805
	4000	0,67	0,762	0,592	0,721	0,536	0,72	0,736	0,558	0,685	0,68	0,698	0,741	0,762

Çizelge A.4: Prova odası L1 ve L2 kaynak noktaları için alıcı noktaları 1/1 oktav bantta ölçüm sonuçları

Parametre	Frekans (Hz)	L1 Kaynak Konumu							L2 Kaynak Konumu					
		ORT	M1	M2	M3	M4	M5 (köşe)	M6 (köşe)	M1	M2	M3	M4	M5 (köşe)	M6 (köşe)
C20 (s)	63	-1,10	-0,13	-4,14	0,36	-1,6	-1,93	0,18	-1,94	-4,62	-2,46	0,24	-0,67	3,51
	125	-2,05	-2,16	-3,76	-3,94	-3,02	1,27	-5,02	-7,17	-2,86	-2,64	1,91	2,03	0,71
	250	-0,56	0,52	2,87	-2,09	-1,43	2,15	-1,32	-0,5	0,14	-0,89	-2,06	-1,21	-2,88
	500	1,20	0,22	-0,27	1,12	0,94	5,09	2,63	1,55	4,93	-0,97	1,68	-0,06	-2,45
	1000	1,90	2,43	3,65	1,8	2,88	2,17	0,83	1,79	1,04	-0,97	3,73	2,48	0,93
	2000	-0,44	-0,3	0,2	0,52	-1	-1,54	0,24	0,57	2,41	-2,1	-0,9	-1,26	-2,09
	4000	-1,40	-1,63	0,16	-0,62	-2,6	-1,66	-0,41	-1,13	-1,3	-2,89	-1,52	-1,35	-1,83
C50 (s)	63	3,38	2,76	1,33	7,31	1,19	0	7,68	0,96	1,12	-1,34	9,98	2,9	6,7
	125	3,81	4,47	2,68	6,04	-0,66	6,28	4,49	1,87	4,01	2,39	4,5	4,32	5,32
	250	4,13	5,98	6,23	2,86	1,13	6,22	3,01	4,82	5,75	3,32	4,72	3,6	1,9
	500	6,81	7,29	7,68	6,41	7,36	9,72	7,05	5,56	8,53	5,29	7,35	5,52	3,97
	1000	7,84	7,63	10	8,05	8,18	8,35	6,09	8,3	8,53	6,93	9,03	7,05	5,9
	2000	5,14	4,99	6,38	6,46	4,62	3,98	5,42	6,18	7,06	4,3	5,87	3,71	2,72
	4000	4,20	4,07	5,08	4,74	3,83	3,56	4,48	4,8	4,27	3,27	4,22	4,51	3,53
C80 (s)	63	6,53	3,1	8,25	8,13	2,83	4,44	8,72	6,41	3,26	2,71	13,02	8,31	9,15
	125	7,28	6,61	7,47	7,1	5,4	9,02	7,04	6,84	5,88	6,15	8,91	6,86	10,06
	250	7,83	8,69	9,65	7,78	5,09	9,63	6,04	9,74	8,72	6,56	7,83	8,52	5,75
	500	10,77	10,52	10,1	9,58	11,38	14,28	10,51	9,72	13,85	10,05	12,3	9,12	7,86
	1000	11,83	11,74	13,52	12,68	12,53	11,47	10,14	13,18	13,76	11,18	12,5	10,44	8,79
	2000	9,23	9,02	10,6	10,19	9,09	7,37	9,05	11,17	11,29	8,31	9,68	7,85	7,15
	4000	8,18	7,6	8,91	9	8	7,53	8,57	8,78	8,19	7,74	8,13	7,96	7,7
TS (ms)	63	53,48	55,5	49,3	43	87	67,5	41,1	46,2	62,7	72,3	36,1	42,6	38,5
	125	51,41	53,4	56,1	50,9	67,5	39,2	51,6	54,5	52,7	56,7	40,5	47	46,8
	250	44,07	38,7	31,1	48,7	51,3	31,7	53	39,8	37,3	50,3	43	47,3	56,6
	500	30,78	34	29,1	31,1	30	20,6	28	32,9	20,4	35,5	27	35,2	45,5
	1000	27,12	27,8	21,2	26	26,3	26,1	31,8	24,4	25,5	32,3	21,8	28,4	33,8
	2000	37,08	38,1	32	31,4	38,6	43,7	35,6	31,2	26	41,4	33,4	44,2	49,4
	4000	39,76	40,8	34,9	36,4	43,3	40,6	36,9	36,8	38,7	43,8	40,7	41,1	43,1

Çizelge A.5: Stüdyo odası SNR ölçüm sonuçları

Parametre	Frekans (Hz)	ORT	L1 Kaynak Konumu						L2 Kaynak Konumu					
			M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6
SNR	63	35	36	37	34	32	36	32	36	35	36	34	35	34
	125	39	38	39	37	36	39	36	42	40	41	40	36	43
	250	38	37	37	38	39	38	37	38	40	38	41	40	39
	500	39	38	38	38	39	38	39	38	39	39	40	39	40
	1000	43	43	42	44	44	42	43	43	43	43	43	43	44
	2000	46	45	45	47	47	45	46	45	46	45	45	46	45
	4000	42	42	41	43	44	42	43	40	42	41	41	41	41

Çizelge A.6: Prova odası SNR ölçüm sonuçları

Parametre	Frekans (Hz)	ORT	L1 Kaynak Konumu						L2 Kaynak Konumu					
			M1	M2	M3	M4	M5 (köşe)	M6 (köşe)	M1	M2	M3	M4	M5(köşe)	M6 (köşe)
SNR	63	33	29	32	30	33	35	36	31	34	36	32	31	36
	125	35	30	33	31	35	37	39	32	35	39	34	34	37
	250	37	32	33	32	33	39	37	39	40	39	40	40	39
	500	36	35	35	35	35	36	37	37	37	37	39	37	37
	1000	39	37	36	38	38	40	40	40	40	40	40	40	39
	2000	42	40	41	41	41	43	44	43	42	43	43	43	44
	4000	42	40	41	41	40	42	42	42	42	43	41	42	42

EK B: Anket Formu

Saha çalışmaları kapsamında müzisyen izlenimine ilişkin öznel değerlendirmeyi ölçmek amaçlı yüz yüze yapılan anket çalışmasına ait anket formu Çizelge B.1 ve Çizelge B.2’de verilmiştir.



Çizelge B.1: Anket formu-sayfa 1

MÜZİSYENLERİN PERFORMANS SONRASINDA MÜZİK HACİMLERİYLE İLGİLİ ÖZNEL DEĞERLENDİRMELERİ ÜZERİNE ARAŞTIRMA ANKETİ					
Değerli müzisyenler;					
Aşağıda bulunan anket çalışması, Prof. Dr. Sevtap Yılmaz danışmanlığında yürütülen doktora çalışması kapsamında, anonim olarak kullanılacaktır. Anketin amacı performans sonrasında hacim akustığı açısından müzisyenlerin öznel değerlendirmelerini ve izlenimlerini edinmektir. Yanıtlarınız istatistiksel olarak ve gizli tutularak değerlendirilecektir. Sonuçlar ve kişisel bilgiler sadece bu araştırma için kullanılacak ve başka bir amaçla kullanılmayacaktır. Araştırmaya katkılarınız için teşekkür ederiz.					
Araştırma Grubu					
İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Yapı Fiziği Doktora Programı					
A	KİŞİSEL BİLGİLER				
1	Kaç yaşındasınız?				
2	Hangi enstrümanı, ne kadar süredir çalışıyorsunuz?				
3	Mesleki kıdeminiz?				
B	GENEL PERFORMANS DEĞERLENDİRMELERİ				
1	Ortam akustığı performansınızı ne derecede etkiler?				
	Etkisiz	Zayıf Etkili	Etkili	Kuvvetli etkili	Çok Kuvvetli Etkili
	1	2	3	4	5
2	Akustik dışında mekân içerisinde performansınızı etkileyen etmenler (görsel konfor, aydınlatma, gün ışığı, ısısal konfor, psikolojik vs.) nelerdir?				
3	En çok hangi ortamlarda enstrüman çalmayı tercih ettiğinizi maddelerle açıkla mısınız?				
C	ORTAM KOŞULLARININ PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ				
1	Anket çalışması için çaldığınız eserin ismi ve türü nedir?				
2	Enstrümanın ses yüksekliğinden rahatsız oldunuz mu?				
	Hiç	Ara sıra	Bazen	Sıklıkla	Çok Sık
	1	2	3	4	5
3	Performansta ne sıklıkta odaklanma sorunu yaşadınız?				
	Hiç	Ara sıra	Bazen	Sıklıkla	Çok Sık
	1	2	3	4	5
4	Kendi enstrümanınızı ya da sesinizi duymakta zorlandınız mı?				
	Hiç	Ara sıra	Bazen	Sıklıkla	Çok Sık
	1	2	3	4	5
5	Çalarken denge kurmakta zorlandınız mı?				
	Hiç	Ara sıra	Bazen	Sıklıkla	Çok Sık
	1	2	3	4	5
6	Dinamik farklılığı (pianissimo – fortissimo) olan pasajlarda zorlandınız mı?				
	Hiç	Ara sıra	Bazen	Sıklıkla	Çok Sık
	1	2	3	4	5
7	Yansımaların performansınıza ne kadar etkisi oluyor?				
	Etkisiz	Zayıf Etkili	Etkili	Kuvvetli etkili	Çok Kuvvetli Etkili
	1	2	3	4	5
8	Geç yansımaların performansınıza etkisi nasıldır?				
	Etkisiz	Zayıf Etkili	Etkili	Kuvvetli etkili	Çok Kuvvetli Etkili
	1	2	3	4	5

Çizelge B.2: Anket formu-sayfa 2

D	ORTAM KOŞULLARININ AKUSTİK AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ				
1	Yüzeylerden yeterli yansıma alabiliyor musunuz?				
	Hiç	Az	Orta	Fazla	Çok Fazla
	1	2	3	4	5
2	Hangi yüzeylerden olumlu ya da olumsuz yansıma etkisi alıyorsunuz?				
	Yan duvarlar				
	Tavan				
	Zemin				
	Arka duvar				
	İdeal koşullarda sizin için hangi yüzeylerden yansıma gelmesi önemlidir?				
3	Yüzeylerden herhangi bir güçlü yansıma ya da yankı alıyor musunuz?				
	Hiç	Az	Orta	Fazla	Çok Fazla
	1	2	3	4	5
	Eğer işitiliyorsa, performansınızı nasıl etkiledi?				
4	Odadaki rezonans algısını (belirli tonların titreşimi) değerlendiriniz.				
	Hiç	Az	Orta	Fazla	Çok Fazla
	1	2	3	4	5
5	Odanın ses yüksekliği (gürlük) tepkisini değerlendiriniz.				
	Hiç	Az	Orta	Fazla	Çok Fazla
	1	2	3	4	5
6	Odanın tizlilik etkisini değerlendiriniz.				
	Hiç	Az	Orta	Fazla	Çok Fazla
	1	2	3	4	5
7	Odanın baslılık etkisini değerlendiriniz.				
	Hiç	Az	Orta	Fazla	Çok Fazla
	1	2	3	4	5
8	Odanın ton (bas/tiz) dengesini nasıl buluyorsunuz?				
	Bas Ağırlıklı	Bas	Dengeli	Tiz	Çok Tiz
	1	2	3	4	5
9	Odanın Reverberasyon süresini değerlendiriniz ve bir kelime ile ifade ediniz.				
	Hiç	Az	Orta	Fazla	Çok Fazla
	1	2	3	4	5
10	Odanın netliğini değerlendiriniz ve bir kelime ile ifade ediniz. (Enstrüman ve oda sesinin net algılanması)				
	Çok Bulanık	Bulanık	Nötr	Net	Çok Net
	1	2	3	4	5
11	Odanın akustik olarak sıcaklığını değerlendiriniz?				
	Soğuk	Soğuğa Yakın	Nötr	Sıcağa Yakın	Sıcak
	1	2	3	4	5
12	Odanın akustik olarak performansınızı desteklemesini değerlendiriniz.				
	Yalnız çalışıyormuş hissi	Zayıf bir destek etkisi	Ortalama bir destek etkisi	Yeteri kadar desteğin hissedilir olması	Desteğin kuvvetli ve hissedilir olması
	1	2	3	4	5
13	Odanın tınısını değerlendiriniz.				
	Yapay	Yapaya Yakın	Nötr	Doğal	Çok Doğal
	1	2	3	4	5
14	Odanın genel olarak akustiğini değerlendiriniz.				
	Çok Kötü	Vasat	Orta	İyi	Çok İyi
15	Sizce bu ortama en uygun müzik stili nedir?				
16	Size göre yukarıdaki değerlendirmelerden en önemlisi hangisidir?				
17	Odanın görsel etkisini ve performansınıza katkısını değerlendiriniz.				
	Kötü	Zayıf	Orta	İyi	Çok İyi
	1	2	3	4	5
E	DİĞER YORUMLAR Odanın izleniminize ve performansınıza etkisini akustik açıdan değerlendiriniz.				

EK C: MSV ve VSA Ölçütlerinin Frekans Tepkisi Üzerinden Elde Edilmesi

Çizelge C.1’de FDFEM analizinde elde edilen 1 Hz aralıklı frekans tepkisi üzerinden MSV ve VSA kriterlerinin istatistiksel olarak hesaplanması verilmiştir. Aynı prosedür 125 Hz ve 250 Hz oktav bantları için gerçekleştirilmiştir.



Çizelge C.1: Referans hacimde 63 Hz 1/1 oktav bandı için MSV ve VSA ölçütlerinin hesaplanması

Frekans (Hz)	Varyasyon 1 (yutucu yüzey)												Varyans	Ortalama uzamsal varyans	Uzamsal Ortalama	Uzamsal Ortalamanın Varyansı
	L1-M1	R	M2	R	M3	R	M4	R	M5	R	M6	R	Var (Lp(s,f))	Ort (Var (Lp(s,f)))	Ort (Lp(s,f))	Var (Mean (Lp(s,f)))
44	83	-6,61491	83	-6,4469	96	9,919288	80	-9,64256	79,0	-10,7943	89	-1,1843	58,5		-4,1	
45	86	-3,6136	79	-10,4448	95	8,893568	85	-4,65919	83	-6,79012	91	0,807466	45,6		-2,6	
46	88	-1,61228	79	-10,4427	95	8,867849	90	0,324191	86	-3,78592	94	3,799231	43,6		-0,5	
47	89	-0,61097	83	-6,44056	94	7,842129	94	4,307567	88	-1,78172	97	6,790997	30,8		1,7	
48	88	-1,60965	87	-2,43845	95	8,816409	94	4,290943	89	-0,77751	97	6,782763	22,7		2,5	
49	90	0,391667	90	0,563661	93	6,79069	92	2,274319	89	-0,77331	95	4,774528	8,5		2,3	
50	92	2,392983	89	-0,43423	90	3,76497	91	1,257695	89	-0,76911	93	2,766294	3,3		1,5	
51	92	2,394299	86	-3,43212	90	3,73925	89	-0,75893	87	-2,76491	90	-0,24194	7,9		-0,2	
52	92	2,395615	82	-7,43	90	3,71353	89	-0,77555	85	-4,76071	90	-0,25017	17,9		-1,2	
53	91	1,396932	80	-9,42789	89	2,687811	90	0,207824	84	-5,75651	91	0,741591	22,9		-1,7	
54	89	-0,60175	77	-12,4258	89	2,662091	86	-3,8088	82	-7,75231	90	-0,26664	30,9		-3,7	
55	85	-4,60044	71	-18,4237	90	3,636371	81	-8,82542	82	-7,74811	84	-6,27488	50,8		-7,0	
56	81	-8,59912	77	-12,4216	90	3,610651	89	-0,84205	90	0,256096	78	-12,2831	48,0		-5,0	
57	83	-6,5978	81	-8,41945	87	0,584932	93	3,141329	94	4,260297	93	2,708653	29,4		-0,7	
58	87	-2,59649	83	-6,41734	80	-6,44079	94	4,124705	95	5,264499	96	5,700419	33,3		-0,1	
59	88	-1,59517	89	-0,41523	83	-3,46651	93	3,108081	95	5,2687	94	3,692185	11,7		1,1	
60	87	-2,59386	90	0,586885	84	-2,49223	91	1,091457	95	5,272901	89	-1,31605	8,8		0,1	
61	85	-4,59254	89	-0,411	84	-2,51795	90	0,074834	94	4,277102	89	-1,32428	8,9		-0,7	
62	84	-5,59122	88	-1,40889	84	-2,54367	88	-1,94179	94	4,281304	91	0,667481	11,0		-1,1	
63	84	-5,58991	88	-1,40678	85	-1,56939	84	-5,95841	94	4,285505	93	2,659247	17,4		-1,3	
64	81	-8,58859	87	-2,40467	85	-1,59511	77	-12,975	93	3,289706	93	2,651013	40,8		-3,3	
65	79	-10,5873	87	-2,40256	85	-1,62083	73	-16,9917	93	3,293907	93	2,642778	63,5	28	-4,3	8,2
66	81	-8,58596	87	-2,40045	86	-0,64655	71	-19,0083	92	2,298108	92	1,634544	66,1		-4,5	
67	82	-7,58464	84	-5,39834	85	-1,67227	76	-14,0249	92	2,30231	92	1,62631	38,4		-4,1	
68	82	-7,58333	83	-6,39622	85	-1,69799	81	-9,04153	93	3,306511	92	1,618075	26,3		-3,3	
69	83	-6,58201	84	-5,39411	85	-1,7237	85	-5,05816	94	4,310712	92	1,609841	18,9		-2,1	
70	85	-4,58069	85	-4,392	85	-1,74942	86	-4,07478	93	3,314913	92	1,601607	11,4		-1,6	
71	87	-2,57938	86	-3,38989	86	-0,77514	87	-3,0914	93	3,319115	92	1,593372	7,6		-0,8	
72	87	-2,57806	87	-2,38778	85	-1,80086	88	-2,10803	94	4,323316	93	2,585138	9,0		-0,3	
73	88	-1,57675	88	-1,38567	83	-3,82658	88	-2,12465	95	5,327517	92	1,576903	10,8		-0,3	
74	88	-1,57543	88	-1,38356	80	-6,8523	88	-2,14128	96	6,331718	92	1,568669	19,2		-0,7	
75	89	-0,57411	89	-0,38145	78	-8,87802	89	-1,1579	97	7,33592	91	0,560435	26,6		-0,5	
76	91	1,427202	90	0,620666	76	-10,9037	91	0,825476	99	9,340121	91	0,5522	41,8		0,3	
77	93	3,428518	91	1,622777	75	-11,9295	93	2,808853	100	10,34432	91	0,543966	52,8		1,1	
78	94	4,429835	90	0,624889	73	-13,9552	95	4,792229	102	12,34852	92	1,535732	75,3		1,6	
79	95	5,431151	89	-0,373	76	-10,9809	97	6,775605	103	13,35272	94	3,527497	66,9		3,0	
80	94	4,432467	84	-5,37089	83	-4,00662	98	7,758981	103	13,35693	97	6,519263	52,0		3,8	
81	93	3,433783	82	-7,36878	87	-0,03234	98	7,742357	102	12,36113	98	7,511029	48,4		3,9	
82	92	2,435099	88	-1,36667	90	2,941939	98	7,725734	99	9,365328	99	8,502794	18,0		4,9	
83	91	1,436415	90	0,635445	92	4,916219	97	6,70911	95	5,36953	98	7,49456	7,8		4,4	
84	91	1,437731	91	1,637556	92	4,890499	96	5,692486	89	-0,62627	97	6,486325	8,0		3,3	
85	91	1,439047	91	1,639668	93	5,86478	95	4,675862	90	0,377932	94	3,478091	4,5		2,9	
86	92	2,440364	91	1,641779	93	5,83906	95	4,659238	93	3,382133	91	0,469857	3,9		3,1	
87	92	2,441168	90	0,64389	94	6,81334	95	4,642615	96	6,386335	89	-1,53838	11,0		3,2	

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyadı : Dilara KELLE

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2007, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, İç Mimarlık Bölümü
- **Yüksek lisans** : 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Anabilim Dalı, Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2018'den beri muhtelif akustik danışmanlık işlerinde ve araştırma projelerinde görev almaktadır.
- 2016-2020 yılları arasında yarı zamanlı öğretim görevlisi olarak İstanbul Bilgi Üniversitesi'nde görev yapmıştır.
- 2018-2019 yılları arasında yarı zamanlı öğretim görevlisi olarak İstanbul Kültür Üniversitesi'nde görev yapmıştır.
- 2016 yılında Pamukkale Üniversitesi Kınıklı Kampüs Camii Hacim Akustiği Projesi'nde yer almıştır.
- 2015 yılında İzmir Konak Belediyesi Hizmet Binası proje yarışmasında mansiyon
- 2007-2018 yılları arası mimari ve iç mimari proje işlerinde tasarımcı olarak yer almıştır.
- 2006 yılında öğrenci değişim programı ile Coburg University of Applied Sciences and Arts'da (Almanya) bulunmuş, çeşitli workshop çalışmalarında yer almıştır.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kelle D, Demirkale Y. S.** 2022. Musicians' Impressions of Low Frequency Sound Field in Small Music Rooms. *ITU-A|Z The Journal of Faculty of Architecture*. DOI: 10.5505/itujfa.2022.47124
- **Kelle D, Yılmaz S.** 2022. The Implementation of Wave-Based Finite Element Method for the Analysis of a Small Music Room. *8. Uluslararası Mimarlık ve Tasarım Kongresi*. İstanbul.

DİĞER YAYINLAR VE SUNUMLAR:

- **Kelle D, Dümen A. S., Yılmaz S.** 2021 Kayıt Stüdyolarının Akustik Yaklaşımları ve Örnek Uygulama. 14. *Ulusal Akustik Kongresi*. İstanbul.
- **Kelle D, Yılmaz S.** 2016. Açık Planlı Ofislerde Hacim Akustiği Koşullarını İyileştirme Analizi. 2. *Ulusal yapı Fiziği ve Çevre Kontrolü Kongresi*. İstanbul.
- **Teke D, Yılmaz S.** 2013. Arena Tip Salonlarda Mimari Tasarım Öğelerinin Akustik Performansa Etkileri. 10. *Ulusal Akustik Kongresi*. İstanbul.

