T.C.
DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
GÜZEL SANATLAR ENSTİTÜSÜ
MÜZİK TEKNOLOJİSİ BİLİM DALI
Yüksek Lisans Tezi

FARKLI TİPTEKİ MÜZİK SINIFLARI VE ETÜD ODALARI İÇİN UYGUN AKUSTİK KOŞULLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Hazırlayan
Atakan ZERAFET

Danışman
Dr. Öğr. Üye Serhat DURMAZ

İzmir / 2023

YEMİN METNİ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum "*Farklı Tipteki Müzik Sınıfları ve Etüt Odalarındaki Uygun Akustik Koşulların Karşılaştırılması*" adlı çalışmanın, tarafımdan, bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve bunu onurumla doğrularım.

Tarih
... / ... / ...

Atakan ZERAFET
İmza

TUTANAK

Dokuz Eylül Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü' nün …… / …… / ……. tarih ve …… sayılı toplantısında oluşturulan jüri, Lisansüstü Öğretim Yönetmeliği'nin ……..maddesine göre…….....Öğrencisi ……..……'nın …… ……..…… ……..…… konulu tezi incelenmiş ve aday ……/……./ ……... tarihinde, saat …….'da jüri önünde tez savunmasına alınmıştır.

Adayın kişisel çalışmaya dayanan tezini savunmasından sonra ……. dakikalık süre içinde gerek tez konusu, gerekse tezin dayanağı olan bilim dallarından jüri üyelerine sorulan sorulara verdiği cevaplar değerlendirilerek tezin …….. olduğuna oy …… ile karar verilmiştir.

BAŞKAN

ÜYE ÜYE

ÖZET

Müzik prova odaları, müzisyenlerin gelişim sürecini doğru değerlendirebilmek adına gerçeğe yakın bir duyumla sonuçlanan akustik tasarım gerektirir. İyi bir duyum, oda boyutlarının uygunluğu ve oda içerisinde yeterli emici yüzeyin sağlanmasıyla elde edilebilir. 20.yy.'ın ikinci yarısından bu zamana kadar gelen temel çalışmalarda belirli hacim limitlerinin altındaki ve üstündeki modeller için çınlama önerileri sunulmuştur. Son 10 yılda tüm prova odalarında maksimum bir gürlüğün hedeflenmesinden ötürü çınlama ve ses yüksekliği birlikte değerlendirilmiş; bu gürlüğün sağlanabildiği çalgı, hacim ve çınlama uyumluluklarına göre prova odası düzenlemeleri önerilmiştir. Bu yöntem ilk olarak NS8178 Norveç standardında sunulmuş; sonrasında da ISO23591 standardının ilk versiyonuyla birlikte evrensel bir öneri haline getirilmiştir.

Bu tezde, Dokuz Eylül Üniversitesi Devlet Konservatuvarı ve Güzel Sanatlar Fakültesi binalarından seçilen dört farklı hacim ve tipteki müzik prova odalarında akustik teşhis ve iyileştirme çalışmaları yürütülmüştür. Bir başka çalışma kapsamında elde edilen ölçüm verileri analiz edilerek hem odanın parametre değerleri okunmuş hem de simülasyonların gerçekleştiği yazılım olan ODEON'da malzeme kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir. İlk olarak boyut optimizasyonunun uygunluğu ve olabilirliği değerlendirilmiştir. İkinci olarak odanın çınlama değeri, ISO23591 standardındaki ses yüksekliği ve çınlama-spektrum dengesi prensiplerine uygun bir hale getirilmiştir.

Bu çalışma, daha geniş bir hacim aralığında sunulan ISO23591 standardının 20-90 m^3 aralığındaki en etkin kullanımını sorgulamaktadır. En kapsamlı ve dönüştürülebilir çalgı uyumluklarının hangi akustik aralıklarda oluşturulabileceğine yönelik tartışmaları içerir. Değişken akustiğin bu hacim grubundaki etkin bir kullanım örneği oluşturulmuştur ve müzikteki zengin dinamik aralığıyla ilişkilendirilerek standarda ek birtakım yaklaşımlarda bulunulmuştur.

ABSTRACT

Music rehearsal rooms require an acoustic design that results in a realistic sensation, enabling musicians to accurately evaluate their development process. A good sensation can be achieved through the appropriateness of the room dimensions and the provision of sufficient absorbent surfaces within the room. In the fundamental studies conducted from the second half of the 20th century until now, reverberance suggestions have been provided for models below and above certain volume limits. In the last 10 years, reverberance and sound level have been evaluated together due to the aim of achieving maximum loudness in all rehearsal rooms. Rehearsal room arrangements have been proposed based on the compatibility of instruments, volume, and reverberance, considering the attainable loudness. This method was initially presented in the NS8178 Norwegian standard and later incorporated into the universal recommendation with the first version of the ISO23591 standard.

In this thesis, acoustic diagnostics and enhancement studies were conducted in four different volumes and types of music rehearsal rooms selected from the Dokuz Eylül University State Conservatory and Faculty of Fine Arts buildings. Measurement data obtained from another study were analyzed, allowing for the reading of the room's parameter values and calibration of materials in the ODEON software, which facilitated simulations. Firstly, the suitability and feasibility of dimension optimization were evaluated. Secondly, the room's reverberance value was adjusted to comply with the principles of sound level and reverberance-spectrum balance in the ISO23591 standard.

This study investigates the most effective use of 20 - 90 m^3 in the ISO23591 standard presented in a wider volume range. It includes discussions on the creation of the most comprehensive and convertible musical instrument compatibilities within acoustic ranges. An example of effective use of variable acoustics in this volume group has been established, and additional approaches have been made to the standard, relating it to the rich dynamic range in music.

ÖNSÖZ

Tezimde müzik eğitimindeki işitsel ortamın ihtiyaçlarını anlamayı ve bu ihtiyaçların sayısal karşılıklarını analiz etmeyi hedefledim. Seçtiğim konunun sanat eğitimindeki verimliliği arttırmaya yönelik araştırmalar ve teknikler içermesi en önemli motivasyonlarımdan biri oldu. Aynı zamanda müzikoloji, hacim akustiği ve veri analizi alanlarının çok disiplinli bir formda birleşmesinden ve literatürdeki en güncel teknikleri içermesinden ötürü yeni meraklar ve bakış açıları kazandığım bir çalışma süreci geçirdim.

Bu tezden önce, danışmanım Serhat Durmaz tarafından yürütülen, 2022 yılında tamamlanan 2020-KB-FEN-025 numaralı *MEB Eğitim Kurumlarındaki Müzik Etüt Sınıflarında Akustik Konfor ve Gürültü Kirliliğinin Araştırılması* başlıklı bilimsel araştırma projesinin ölçüm ve 3D modelleme süreçlerinde görev aldım. 2022 yılında, tezimdeki tekniğin bir alt başlığının sonuçlarını istatiksel olarak ve yazılım geliştirmek suretiyle analiz ettim. Bu çalışmanın yöntem ve sonuçlarını makale olarak danışmanımla birlikte yayınladım. Dolayısıyla bu iki çalışmadaki model, veri ve deneyimlerin tezimdeki katkıları çok büyüktür.

Tez dönemim boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Dr. Serhat Durmaz'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bilimsel hazırlık dönemimden bu yana Müzik Teknolojisi, akustik ve sesle ilgili kendilerinden çok şey öğrendiğim değerli hocalarım Prof. Dr. Feridun Öziş, Prof. Dr. Cihan Işıkhan ve Doç. Dr. Suat Vergili'ye de çok teşekkür ederim.

Atakan ZERAFET

İÇİNDEKİLER

YEMİN METNİ ii
TUTANAK iii
ÖZET iv
ABSTRACT v
ÖNSÖZ v
İÇİNDEKİLER vii
ŞEKİLLER LİSTESİ x
TABLOLAR LİSTESİ xii
KISALTMALAR xiv
GİRİŞ 1

BİRİNCİ BÖLÜM
TEMEL KAVRAMLAR

1.1 Frekans 5
1.2 Dinamikler 6
1.3 Ses Zarfı 8
1.4 Müzik Algısı ve Psikoakustik 9
1.4.1 Frekans ve Zamana İlişkin Değerlendirmeler 10
1.4.2 Dinamikler ve Ses Zarfına İlişkin Değerlendirmeler 11

İKİNCİ BÖLÜM
HACİM AKUSTİĞİ

2.1 Sesin Odadaki Yayılımı 13
2.1.1 Çınlama Süresi 13
2.1.2 Malzemede Emicilik 14
2.1.3 Bir Konumdaki Sesin Seviyesi 18
2.1.4 Odaya Özgü Ses Gücü Parametresi (G) 18
2.2 Akustik Dürtü Tepkisi Analizi 19

2.2.1 Filtreleme 21
2.2.2 Hilbert Dönüşümü 22
2.2.3 Gürültü Seviyesinin Tespit Edilmesi 23
2.2.4 Zaman Parametrelerinin Analizi 23
2.2.5 Enerji Parametrelerinin Analizi 26
2.3 Güncel Akustik Parametreler 28

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
MODAL AKUSTİK

3.1 Modal Frekanslar 30
3.1.1 Eksenel Modal Frekanslar 31
3.1.2 Eksenel Olmayan Modal Frekanslar 32
3.2 Dikdörtgen Odalarda Modal Spektrum Analizi 32
3.2.1 Optimum Oda Oranları 33
3.2.2 Modal Frekansların Değerlendirilmesi 36
3.3 Dikdörtgen Olmayan Odalarda Modal Spektrum Analizi 38

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
MÜZİK PROVA ODALARI

4.1 Müzik Prova Odaları Genel Özellikleri 42
4.2 Hacim ve Akustik Parametre İlişkileri 43
4.3 Ses Yüksekliği ve Akustik Parametre İlişkileri 44
4.3.1 NS8178 Kapsamındaki İlk Yaklaşımlar 47
4.3.2 ISO 23591 Standardındaki Güncel Yaklaşımlar 49
4.4 Müzik Prova Odalarındaki Akustik Düzenleme 50
4.4.1 Müzisyen Değerlendirmeleri 51
4.4.2 Farklı Frekans Bölgelerine Yönelik Uygulamalar 52
4.4.3 Değişken Akustik Yöntemleri 53

BEŞİNCİ BÖLÜM
ÇALIŞMANIN YÖNTEMİ

5.1 Akustik Ölçüm Koşulları 55
5.2 Dürtü Yanıtı Analizleri 55
5.3 Simülasyon ve Genetik Optimizasyon 56
5.4 Boyut Uygunlaştırma 57
5.4.1 Yatay Açılandırma 58
5.4.2 Eksen Değişimi 61
5.5 Akustik İyileştirme 62

ALTINCI BÖLÜM
MODELLEME

6.1 101 Modeli 68
6.1.1 Genetik Optimizasyon 68
6.1.2 Akustik Simülasyon 69
6.2 104 Modeli 76
6.2.1 Genetik Optimizasyon 76
6.2.2 Akustik Simülasyon 77
6.3 501 Modeli 81
6.3.1 Genetik Optimizasyon 82
6.3.2 Akustik Simülasyon 82
6.4 311 Modeli 86
6.4.1 Genetik Optimizasyon 87
6.4.2 Akustik Simülasyon 88
DEĞERLENDİRME 97
SONUÇ 98
KAYNAKÇA 100
EK 1: Her bir sınıftaki çalgı uyumluluk listesi 105
ÖZGEÇMİŞ

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1- Ses gücü faktör ölçeği (Meyer, 2009:353)

Şekil 2- Ses zarfı: (1) atak, (2) azalış, (3) kalış, (4) sönümleniş bölgeleri (Müller, 2021:27)

Şekil 3- Sırasıyla piyano ve flüt çalgılarının tek uyarımlı tipik dalga formları (Müller, 2021:48)

Şekil 4- Eş gürlük eğrileri (aktaran Meyer, 2009:7)

Şekil 5- ISO 11654 kapsamında sunulan a_w referans eğrisi (aktaran Bıałek, Nowicka, 2016:3).

Şekil 6- RIR zarfı (kırmızı)

Şekil 7- Farklı üst limitlerin integrasyona etkileri

Şekil 8- Düşüş bölgelerindeki örnek regresyon vektörleri (kırmızı kesikli).

Şekil 9- Zaman parametreleri analiz aşamaları

Şekil 10- C80 ve D50 parametre analizi akış diyagramı

Şekil 11- Oda içerisindeki basınç bölgelerinin modal frekans derecesine göre değişimi, temel frekans (a), ikinci harmonik (b), üçüncü harmonik (c)

Şekil 12- Oda içerisindeki eksenel olmayan mod oluşumları, teğetsel (a), eğik (b)

Şekil 13- Bolt tarafından sunulan optimum oda oranları bölgesi (kırmızı bölge)

Şekil 14- EBU (sarı) ve IEC (mavi) optimum oda oranları bölgeleri

Şekil 15- Örnek bir modeldeki frekans tepkisi üzerinde Schroeder frekansı konumu (kırmızı işaret ile)

Şekil 16- Açılandırılmış odalardaki ses basıncı görünümleri, eksenel mod (a), teğetsel mod (b), eğik mod (c)

Şekil 17- RT-G-V-α grafiğinde Beranek dikdörtgeni (aktaran Nijs, Vries, 2005:230)

Şekil 18- Farklı çalışmalardaki sonuçların düşük ve büyük hacimlerdeki ekstrapolasyonları (Heringa, Isbrücker ve Valk, 2009:4)

Şekil 19- NS8178 RT-V ilişkisi (NS8178, 2014:14)

Şekil 20- Düşük ve yüksek ses seviyeli odalarda optimum RT oran bölgesi (yeşil alan), (NS8178, 2014:15)

Şekil 21- Optimum oda oranları çizgisinin Bolt alanındaki konumu (kırmızı)
Şekil 22- Aynı oda oranlı açılandırmadaki kenar isimlendirmeleri
Şekil 23- Uzunluk eksenindeki açılandırmanın oda oranındaki etkisi, IEC (mavi), EBU (sarı), Bolt (kırmızı), ISO23591 (siyah çizgi), dikdörtgen model (kırmızı daire), açılandırılmış oran (yeşil daire)
Şekil 24- ISO23591 standardında düşük ve yüksek sesli prova odası bölgeleri (Rindel, 2021:22)
Şekil 25- 101 sınıfı akustik simülasyon öncesi model
Şekil 26- 101 modelinde GO ve ölçüm sonuçları karşılaştırması
Şekil 27- 101 modeli simülasyon panel yerleşimleri (A paneli-kırmızı)
Şekil 28- 101 modeli yaylı çalgılar için kurulan panel yerleşimleri (A paneli-kırmızı, B paneli-mavi)
Şekil 29- 101 modeli sırasıyla piyano ve yaylı simülasyonları sonrası karşılaştırma
Şekil 30- 104 sınıfı akustik simülasyon öncesi model
Şekil 31- 104 modelinde GO ve ölçüm sonuçları karşılaştırması
Şekil 32- 104 modeli akustik simülasyon panel yerleşimleri (A paneli-kırmızı, C paneli-sarı, B paneli-mavi)
Şekil 33- 104 modeli simülasyonlar sonrası karşılaştırma
Şekil 34- 501 sınıfı akustik simülasyon öncesi model
Şekil 35- 501 modelinde GO ve ölçüm sonuçları karşılaştırması
Şekil 36- 501 modeli akustik simülasyon panel yerleşimleri (D panelleri-yeşil, B paneli-mavi)
Şekil 37- 501 modeli simülasyonlar sonrası karşılaştırma
Şekil 38- 311 sınıfı akustik simülasyon öncesi model
Şekil 39- 311 modelinde GO ve ölçüm sonuçları karşılaştırması
Şekil 40- 311 sınıfı boyut optimizasyonu sonrası model
Şekil 41- 311 modeli akustik simülasyon panel yerleşimleri (E paneli-mor, F paneli-turkuaz)
Şekil 42- 311 modeli simülasyon sonrası karşılaştırmalar

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1- Çalgılara ait *pp* ve *ff* ses seviyeleri (Rindel, 2014:2)

Tablo 2- DIN EN ISO 11654 standardında a_w performans sınıf ilişkileri (aktaran Bıałek, Nowicka, 2016:5).

Tablo 3- Farklı işlevlere yönelik mekânlarda istenen RT değerleri

Tablo 4- Örnek bir modeldeki eksenel modal frekans spektrumu

Tablo 5- Çalgı gruplarındaki optimum RT aralıkları (aktaran Osman, 2010:4)

Tablo 6- ISO 3382 parametreleri için JND değerleri (ISO3382-1, 2010:10)

Tablo 7- 1:1.21:1.48 oranı için optimum açılandırma derecelerinin listesi

Tablo 8- 1:1.85:2.1 oda oranının açılandırma sonrası değişim listesi

Tablo 9- Optimizasyon öncesi yapı elemanlarına atanan malzeme emicilik değerleri

Tablo 10- Mevcut durum α değerleri ve ölçüm sonuçları

Tablo 11- 101 modeli modal frekans spektrumu

Tablo 12- 101 modelinde Panel A emicilik katsayıları ve simülasyon sonuçları

Tablo 13- 101 modelindeki çalgılara ait uyumluluklar (dB)

Tablo 14- 101 modelinde yaylılar için panel emicilikleri ve simülasyon sonuçları

Tablo 15- 101 modelinde düşük sesli kurulumuna göre yaylı çalgı uyumlulukları

Tablo 16- 104 modeli mevcut durum emicilik ve parametre değerleri

Tablo 17- 104 modelinde hedef ortalama çınlamaya göre alt-üst limit değerleri

Tablo 18- 104 modeli panel emicilikleri ve simülasyon sonuçları

Tablo 19- 104 modelindeki çalgı uyumlulukları (dB)

Tablo 20- 501 modeli mevcut durum ve emicilik değerleri

Tablo 21- 501 modeli panel emicilikleri ve simülasyon sonuçları

Tablo 22- 501 modeli çalgı uyumluluk listesi

Tablo 23- 311 modeli mevcut durum emicilik değerleri ve simülasyon sonuçları

Tablo 24- 311 modelinde alanı ve emiciliği azaltılmış sandalye alanının etkisi

Tablo 25- 311 modeli boyut optimizasyonun modal spektrumdaki etkisi

Tablo 26- Küçültülmüş hacimdeki parametre sonuçları

Tablo 27- 500 Hz rezonans frekansı için delikli panel teorik boyutları

Tablo 28- 311 modeli için E - F delikli panellerine ait Zorba tasarım parametreleri
Tablo 29- 311 modelindeki emici malzemeler ve simülasyon sonuçları
Tablo 30- 311 modeli için rezonatör boyutları
Tablo 31- 311 Modeli çalgı uyumluluk listesi

KISALTMALAR

NS8178	*Norwegian Standard 8178*
pp	*pianissimo*
p	*piano*
mf	*mezzoforte*
f	*forte*
ff	*fortissimo*
f (Hz)	Frekans - *Hertz*
C (m/s)	Ses hızı
L (m)	Dalga boyu
PA	Basınç (*Pascal*)
W	Güç (*Watt*)
I (W/m^2)	Yoğunluk
dB	Desibel
Lw	Ses gücü
I_0	İnsan kulağı duyma eşiği (referans)
D (dB)	Çalgıya ait dinamik alan
k	Ses gücü faktörü
α	Emicilik katsayısı
A (S*α)	Sabine değeri (Sabine/m^2)
V (m^3)	Oda hacmi
ASTM C423-09a	*Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberant Room Method*
ISO	*International Organization for Standardization*
α_w	Ağırlıklı emicilik değeri
σs	Hava akış direnci
σ	Özdirenç değeri
Q	Yönelgenlik
G	Ses gücü parametresi

RIR	Oda dürtü tepkisi
b	Oktav bant genişliği
f_a (Hz)	Alt kesim frekansı
f_b (Hz)	Üst kesim frekansı
f_m (Hz)	Merkez frekansı
SNR (dB)	Sinyal gürültü oranı
RT60 (s)	Çınlama süresi
EDT (s)	Erken düşüş süresi
T20 (s)	*Time 20*
T30 (s)	*Time 30*
D50	Konuşma Netlik Parametresi
C80	Müzik Netlik Parametresi
f_0 (Hz)	Temel harmonik frekans
f_s (Hz)	Schroeder frekansı
FEM	*Finite Element Methods*
JND	*Just Noticable Difference*
ξ	Bölgesel Eğrilik parametresi
C	Eğrilik parametresi
GO	Genetik optimizasyon
STI	*Sound Transmisson Index*

GİRİŞ

Sadece görsellik ve işlevsel çözümler için gerçekleştirilen bir mimari tasarımda cisimlerin ışığı soğurma enerjileri (renkleri), yüzey yapıları ve şekillerine göre düzenlemelerde bulunulur. Bu düzenlemelere ses soğurma boyutu kazandırıldığında odanın kullanım şekli hem görsellik hem de ses alanı açısından desteklenmiş olur. Oda konsepti, içeride ağırlıklı olarak dolanacak sesin yapısı ve odanın kullanım şekliyle ilişkilidir. Bu çalışmanın konusu olan müzik prova odalarındaki eğitim amacı öncelikli olarak "netlik" olgusunu gerektirir ve farklı eksenler üzerinden bunu referans alır.

Bir öğrencinin nota okumadaki, müzik teorisindeki ve teknik becerilerindeki gelişimi için tüm kaynaklar ve uygun çalgılar eğitim kurumlarında barındırılabilir. Artikülasyon, dinamikler gibi teknik becerilerle de desteklenen müzikal ifade biçimleri her çalgıda farklı şekillerde açığa çıkar ve bu çalgıdaki ustalıkta sanatsal çeşitliliği destekler. Bir müzik öğrencisi, *legato* tekniğinin yumuşak veya *staccoto*'nun keskin geçişlerini deneyimlerken oda akustiğinin bu geçişleri bulanıklaştıran bir nitelikte olması duyum değerlendirmelerini zorlaştırır. Dolayısıyla oda akustiği, öğrenciye ve öğretmene artikülasyon, dinamik gibi müzikal ifadeler açısından doğru bir geri dönüş sağlamalıdır. Bu konudaki literatür zamana bağlı temel parametre kontrollerini oda yüzeyleri üzerinden sağlamayı önerir. Bu kontroller çalgıdaki sönümlenişi zaman ekseninde kısaltarak akan eserdeki artikülasyon boyutunun net duyumunu destekler.

Bu alanda son 10 yılda, Jens Holger Rindel tarafından ortaya atılan "dinamikte gürlük tekniği" üzerinde çalışılmaktadır. 2014 yılında *Norwegian Standart 8178* (NS8178) ile sunulan bu teknik, büyük ve küçük hacimli prova odalarını, çalgı veya grup ne kadar güçlü olursa olsun ortak bir maksimum dinamik seviyede buluşturmaktadır. Bu aynı zamanda ses seviyesinde de kontrolü sağlamaktadır. Gürlüğün farklı yankı karakteristikleri gerektirmesi, bugüne kadar yapılan çalışmalarda genel olarak tanımlanan yankı önerilerini her bir çalgı ve hacim grubu için kesin değerlerle belirlemiş ve işlevsel bir sonuca bağlamıştır. NS8178'deki öneriler, 2021 yılında güncellenerek *ISO 23591*

standardında çok detaylı ve kapsamlı bir biçimde sunulmuştur. Böylece yeni yaklaşımlar sayesinde farklı koşullardaki gürlük özelliği arttırılmaya çalışılmıştır.

Ülkemizdeki eğitim kurumlarında genellikle küçük hacimli ve ses yalıtımlı müzik prova odaları tercih edilmektedir. Ses yalıtımı, çoğu zaman akustik proje ve raporlar kapsamında sayısal değerlerle ifade edilmese de, temel olarak yankısız bir duyum özelliği sağlar. Odalar, çoğu zaman çalgının duyum karakteristiği dikkate alınmadan kontrolsüzce tasarlanmaktadır ve hacimleri gereği sadece bireysel veya ikili çalışmalar için uygun olmaktadır. Öğrenciler grup veya koro çalışmalarında koridor gibi aşırı yankılı mekânlarda çalışmak zorunda kalabilmektedir. Bugüne kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde artikülasyon olgusunun kısmen önemsendiği ancak büyük müzik gruplarını da kapsayacak derecede geniş ve uygun bir ortam sağlamakta zorlanıldığı izlenmektedir.

Bu çalışmada farklı tipteki müzik sınıfları ve etüt odalarındaki akustik koşulların karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Oda modelleri, Dokuz Eylül Üniversitesi Devlet Konservatuvarı ve Güzel Sanatlar Fakültesi'nde prova ve derslik amaçlı kullanılan sınıflardan seçilmiştir. Farklılıklar yapısal form ve hacim özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Yerinde yapılan ölçümler, akustik tasarımı gerçekleşmemiş ve ses yalıtımı sağlanmamış odanın mevcut durumunu ortaya koyarken, çalışmanın devamında yapılan simülasyonlar akustik "iyileştirme" özelliklerini sağlamıştır.

Seçilen modellerdeki ortak özelliklerden biri de ülkemizde müzik eğitim kurumlarındaki hacim tercihlerinin çok geniş bir aralığını temsil etmesidir. Bu mevcut hacimler ISO23591 standardı ile karşılaştırıldığında birçok elverişsiz hal ve durumlar mevcuttur. Bu elverişsizlikler özellikle oda boyutlarıyla ilişkilidir. Bu çalışma kapsamında, standardın sunduğu teknik ile bu odalardan alınabilecek en yüksek verimi sağlayan iyileştirme yöntemleri araştırılmıştır. Çalgı gruplarının uyumluluğu; sesin aynı dinamik seviyede duyulması ve özellikle *forte* performansta belirli bir ses yüksekliği üzerine çıkmaması ile belirlenir. Bu uyumluluk tüm çalgı grupları için değerlendirilerek değişken akustik sistemiyle hacim özelindeki en etkin kullanım yöntemleri araştırılmıştır.

Aynı zamanda müzikal dinamikteki zenginlik göz önüne alınarak çalgı gruplarının farklı dinamiklerde alabilecekleri sonuçlar değerlendirilmiş ve standarda ek birtakım önerilerde bulunulmuştur.

BİRİNCİ BÖLÜM

TEMEL KAVRAMLAR

1.1 Frekans

Frekans her bir saniyede gerçekleşen periyodik hareket dolayısıyla zaman ekseninde alınan birim saniye yolun kapsadığı titreşim sayısıdır. Sinüzoidal ses dalgaları, zaman ekseninde gerçekleştirdikleri maksimum genlik değerleriyle periyodik özellik gösterirler. Periyodik olma durumları, zamanda belirli aralıklarla aynı titreşimlerin tekrarlandığı anlamına gelir. Sinyalin iki tepe noktası arasında aldığı yol dalga boyu değeridir. Frekans ve dalga boyu arasındaki ilişki Denklem 1'deki gibidir (Howard, Angus:2013, 11).

$$f = \frac{c}{L} \qquad (1)$$

f: Frekans (Hz)
c: Ses hızı (m/s)
L: Dalga boyu (m)

Müzikal akustikteki frekans spektrumu, Denklem 1 ile aracılığıyla dalga boyuna dönüştürülebilir. Böylece akustik tasarım yapılması planlanan odalarda var olan enerjiye karşı gösterilmesi gereken direnç ile ilgili ilk kanılara varılabilir. Örneğin, batı müziğinde en geniş frekans aralığına sahip ana çalgılardan biri olan piyano 27.5 Hz (L=21 m; La 0 notası) ile 4186.0 Hz (L=4 cm; Do 8 notası) aralığında ses üretebilir. Alçak frekansların uzun dalga boyları, özellikle küçük odalarda frekansların kalitesi ve kontrolü bakımından daha fazla mühendislik işlem gerektirir.

Frekans, müzikal akustik değerlendirmelerinde çeşitliliğin en fazla olduğu parametredir. Örneğin; her bir çalgı farklı frekans aralığında sesler üretir. Çalgıya ait tınının oluşumunda etkisi büyük olan harmonik frekanslar, her bir çalgı için farklı değerlere konumlanır. Keman, 260 – 440 Hz aralığında karakteristik frekans değerlerini üretir (Meyer, 2009:86). Viyola ses karakteristiği benzemesine rağmen daha büyük boyutlarda olduğu için daha düşük değerlerde harmonikler üretir (Meyer, 2009:95). Çello, hava kaynaklı rezonans değerini 110 Hz civarında üretirken sesteki karakteristik yapısını 300 – 500 Hz aralığından alır (Meyer, 2009:98). Piyano ise 200 – 1000 Hz aralığında baskın frekanslara sahiptir (Meyer, 2009:103). Tüm bu çeşitlilik sonucunda müzikal akustikte odaya ait filtrelemenin daha yumuşak ve gerçeğe yakın olması

gerektiği düşünülmektedir. Çünkü çalgıya ait rezonanslar genellikle yararlıyken, odaya ait değiştirici akustik etkiler müziğin genel ahengini, karakterini bozabilir.

1.2 Dinamikler

Dinamik değerler, spektruma yayılmış her bir frekansın enerji miktarlarını veren büyüklüklerdir. Bir ses kaynağının sahip olduğu toplam enerji ise spektrumdaki birim enerjilerin toplamıdır. Bir çalgının harmonik - zayıf enerjili frekansları veya bir orkestradaki çalgılara ait ses enerjileri arasındaki fark dinamik değerlerle tanımlanabilir. Hacim akustiği, bu iki örnekte olduğu gibi kaynakların fiziksel dünyadaki büyüklüklerinden çok birbirleriyle olan ilişki ve farklarına göre düzenlemelerde bulunur. Ses dalgaları fiziksel dünyada basınç (pressure, PA), güç (power, W) ve yoğunluk (intensity, W/m^2) büyüklükleriyle ölçülür (Hartmann, 2013:99). Basınç değerleri pozitif ve negatif eksende simetrik özellik gösterir; güç ise sayısal olarak basınç değerlerinin karesi olduğu için sadece pozitif değerler alır. Ses yoğunluğu, ses büyüklüğünün mekan içerisindeki duyumunun ne kadar güçlü veya zayıf olduğuyla ilişkilidir (Hartmann, 2013:102). Hacim akustiği ve diğer tüm ses bilimleri sürecin son elemanı olan insan kulağının duyma eşiğinin W veya PA biriminden sayısal değerleriyle karşılaştırmalar yapar. Buna göre ses kaynağındaki enerji veya diğer tüm ara birimlerdeki enerji değişimleri, insan kulağı duyma eşiğinin logaritmik ölçekteki katı (Desibel - dB) üzerinden ifade edilir. İnsan kulağı en az 2×10^{-5} PA atmosferik basınç ve 10^{-12} W/m^2 ses yoğunluğuna duyarlıdır. Bir ses kaynağının ses yoğunluğu üzerinden sahip olduğu ses gücü değeri (dB), Denklem 2'deki gibi bulunabilir (Hartmann, 2013:103).

$$L = \log_{10}\frac{I}{I_0} \qquad (2)$$

L_w: Ses gücü
I: Ses yoğunluğu (W/m^2)
I_0: İnsan kulağı duyma alt eşiği (W/m^2)

Bir kompozisyonu oluşturan her bir çalgı, sahip olduğu genel bir ses seviyesinin yanında belirli anlarda farklı ses seviyelerinde çalınır. Kompozitör, parçanın genel dinamiğini ve zamandaki dinamik değişimleri nota üzerinde belirtir; çalgıcı ise tuşe, üfleme veya yayı çekiş gücündeki değişimlerle farklı ses seviyeleri üretir.

Müzikteki dinamikler küçükten büyüğe doğru *pianissimo (pp), piano (p), mezzoforte (mf), forte (f), fortissimo (ff)* şeklinde sıralanır. Her bir çalgıya özgü dinamik gösterge seviyeleri, literatürde yankılı ve yankısız ortamlarda yürütülen birden çok deneysel çalışmanın referans alınması ve yeniden hesaplanmasıyla belirlenmiştir (aktaran Meyer, 2009:37). Çalgılara ait *pp* ve *ff* ses seviyeleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1- Çalgılara ait *pp* ve *ff* ses seviyeleri (Rindel, 2014:2)

Çalgılar	L_W - *pp* (dB)	L_W - *ff* (dB)
Piyano (Meyer, 2009:105)	60	104
Keman	65	97
Viyola	68	93
Çello	67	97

Tablo 1'de sunulan *pp* ve *ff* dinamiklerdeki ses seviyeleri arasındaki farklar, çalgıların dinamik alan değerini verir. Bu ölçekteki tüm aralıklar eşit değerlendirildiği için her bir üst göstergeye geçiş sonucunda ses seviyesinde dinamik alanın çeyreği kadar artış yaşanır. Göstergeler arasındaki ilişki Denklem 3'te sunulmuştur.

$$D = L_W(ff) - L_W(pp) \qquad (3)$$

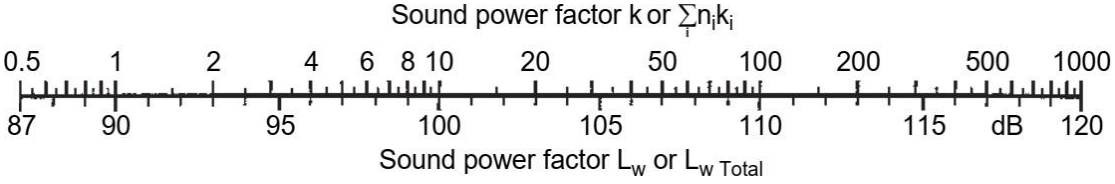
$$L_W(f) = L_W(ff) - \frac{D}{4}$$

D: Dinamik alan (dB)
$L_w(ff)$: *ff* ses basıncı (dB)
$L_w(pp)$: *pp* ses basıncı (dB)
$L_w(f)$: *f* ses basıncı (dB)

Ses gücü faktörü (k), bir çalgının forte güç seviyesinde ürettiği ortalama ses seviyesinin, 90 dB referans olarak alındığında elde edilen logaritmik oran değeridir. Her bir çalgı için k değeri Denklem 4 ile hesaplanır. Ses gücü faktör ölçeği Şekil 1'de gösterilmiştir (Rindel, 2014:2).

$$k = 10^{\frac{L_w(f) - 90}{10}} \qquad (4)$$

k = 1 @ 90 dB, 1 mW ses gücü değeri



Şekil 1- Ses gücü faktör ölçeği (Meyer, 2009:353)

Bir müzik grubunun forte güç seviyesinde ürettiği toplam ses gücü seviyesi Denklem 5 ile hesaplanabilir.

$$L_{W,total} = 90 + 10 \times \log \sum_{i} n_i \; k_i \qquad (5)$$

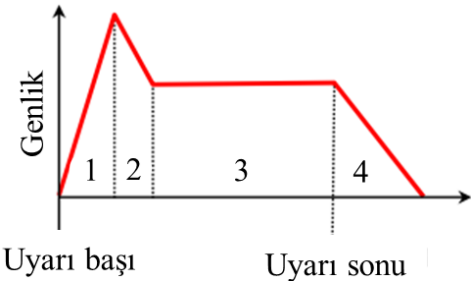
i: Çalgı tipi
n_i: Her bir çalgıdaki adet
k_i: Her bir çalgıdaki güç faktörü
$L_{w,total}$: Toplam ses seviyesi (dB)

Bu değerler, daha ileri hacim akustiği analiz ve uygulamaları için referans olarak belirlense de farklı koşullar her bir çalgı için farklı ses seviyeleri doğurur. Harmonik frekanslar, *f* performanslar için destekleyiciyken *pp* performanslarda çalımı zorlaştırır. Yayı çekiş hızları ve kemana değme noktası, azımsanamayacak büyüklükte seviye değişimlerine sebep olabilir (Meyer, 2009:90). Piyanodaki dinamik, kapağın kapalılığına ve pedal kullanımına bağlı olarak tiz ve bas frekans bölgelerinde farklı etkilenir (Meyer, 2009:105).

Dinamik gösterge geçişlerinde sadece ses seviyelerinde değil spektrumda da önemli değişimler yaşanmaktadır. Bir dinleme cihazındaki düşük ses seviyelerinde esere ait *ff* geçişinin verdiği sanatsal etki belirgindir. Bu sebeple müzikal ögelerdeki dinamik kavramı sadece ses yüksekliğine indirgenemez. Bu durum, frekans eksenindeki çeşitliliğin bir başka örneğidir (Meyer, 2009:35).

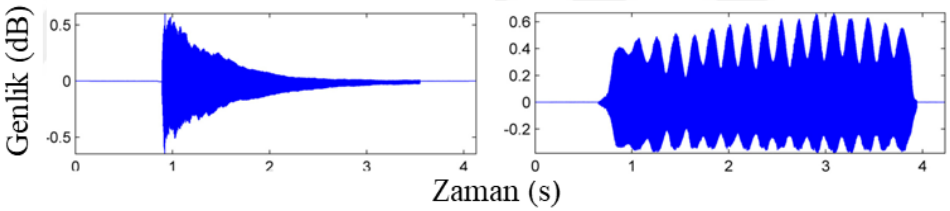
1.3 Ses Zarfı

Ses kaynağının tek ve sonlanmış bir uyarana verdiği genlik tepkisi zarf (*envelope*) olarak isimlendirilir. Ses, bu uyarılmayla birlikte tepe noktasına ulaşır, güç kesildiğinde kendi doğasına uygun bir biçimde azalarak sıfır noktasına iner. Zarf; sesin tepe noktasına çıkışını gerçekleştirdiği, bu noktadan sonraki ilk azalışların yaşandığı, düştüğü konumdaki varlığını koruduğu ve azalarak tamamen sönümlendiği dört bölgeden oluşur. Bu bölgeler sırasıyla atak (*attack*), azalış (*decay*), kalış (*sustain*) ve sönümleniş (*release*) olarak isimlendirilir. Her bir bölge için geçen süre, ses tınısının oluşumunda önemli bir rol oynar. Buradaki zaman, sesteki değişimin eğim değeriyle ters orantılıdır; yüksek eğimli çıkış veya inişler tepe ve sıfır noktası arasındaki geçen süreyi azaltır. Ses zarfındaki atak, azalış, kalış ve sönümleniş bölgeleri Şekil 2 üzerinden incelenebilir.



Şekil 2- Ses zarfı: (1) atak, (2) azalış, (3) kalış, (4) sönümleniş bölgeleri (Müller, 2021:27)

Her bir çalgı farklı bir ses zarfı karakteristiğindedir. Perküsyon, piyano gibi çalgılar yüksek eğimli ani çıkışlarla atak bölgesi oluşturur. Üflemeli çalgılar ve yaylı grupları ise tepe noktasına daha uzun sürelerde ulaşırlar. Perküsyonlar darbesel uyaranlarla icra edildikleri için kalış zarfları uzun süreli değildir. Özellikle üflemeli çalgılar daha uzun süreli kalış zarfına sahiptir. Piyano ve üflemeli çalgılarının tek uyarımlı tipik dalga formu örnekleri Şekil 3 üzerinden incelenebilir.



Şekil 3- Sırasıyla piyano ve flüt çalgılarının tek uyarımlı tipik dalga formları (Müller, 2021:48)

1.4 Müzik Algısı ve Psikoakustik

Psikoakustik, işitilebilir ses uyaranları sonucu oluşan algılar karşılığındaki psikolojik tepkileri inceleyen bir bilim dalıdır. Uyaranlar arasındaki nicel ilişkilerin bir ifadesidir. Müzikal akustikte müziğin en az kendisi kadar veya daha estetik bir biçimde dinleyiciye ulaştırılması isteği müzisyenler, dinleyiciler ve fizik bilimciler arasında ortak birtakım değerlendirme kavramlarının üretilmesini gerekli kılmıştır. Her bir fonksiyon çıktısı dinleyici ve müzisyenin estetik veya fiziksel büyüklük algısında çoğu zaman ortak değerlendirmelerle karşılık bulur.

1.4.1 Frekans ve Zamana İlişkin Değerlendirmeler

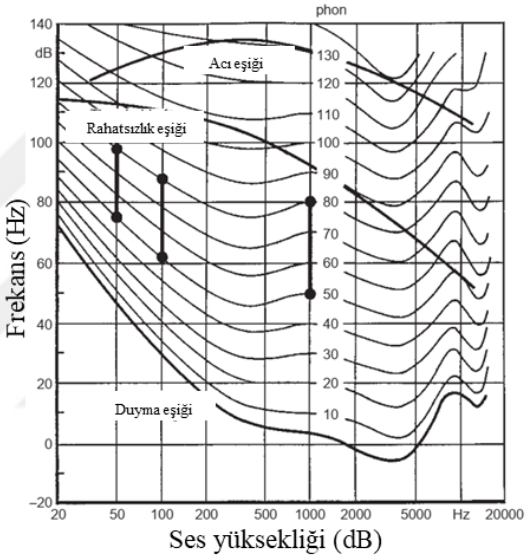
Her bir oda, ses enerjisi frekans dengesinde adeta farklı bir *equalizer* görevi görür. Frekanslar, 1 saniyedeki titreşim sayısına göre küçükten büyüğe spektrum halinde sıralanır; her bir titreşim farklı bir ses yüksekliği (dB) değerine sahiptir. Frekans grupları alçak frekanslardan tize *sub-bass* (16-60 Hz), *bass* (60-250 Hz), *low-mid* (250-2k Hz), *mid* (2k-4k Hz), *high-mid* (2k-6k Hz), *high* (6k-20k Hz) isimleriyle değerlendirilir (Pedersen, Grimshaw-Aagaard:2018, 235). Enerjinin yoğunlukta olduğu her bir frekans grubu dinleyici ve müzisyen algısında farklı bir değerlendirmeyle sonuçlanır. Herhangi bir frekans grubundaki yoğunluk, odanın o frekans bölgesini daha uzun sürede sönümleyebileceği şekilde tasarlandığında artar. Daha uzun sönümlenme zaman ilişkisi bakımından her bir nota sönümlenişinin bir sonrakinin atak bölgesiyle iç içe geçmesine neden olur; bu durum seslerin net algılanma karakteristiğini etkiler.

Alçak frekans bölgesindeki yoğunluk müziğin daha sıcak olarak nitelendirilmesine sebep olur ve duyum açısından aranan bir özelliktir. Alçak frekans grubundaki uzun dalga boyları, yüksek bir enerjinin manipüle edileceği sonucunu doğurur. Bu durum sıcak duyuma yönelik tasarımlarda kontrollü yapılmayan işlemlere, istenmeyen aşırılıklara neden olarak berraklık özelliğinin azalmasına yol açar.

Berraklıktaki azalma, sekizlik ve onaltılık notaların yoğun olduğu erken dönem klasik müzik eserlerinde pek sevilmez. Romantik dönem müziği özellikle uzun sönümleniş bölgesine yönelik tasarımlar için daha uygundur (Berg, Stork, 2005:219). Uzun sönümlenmeler sesin daha çok dolanmasına olanak sağlayacağı için salonun daha dolu algılanmasına olanak sağlayabilir. *High-mid* ve *high* frekanslardaki fazla enerjiyle ses daha parlak algılanacaktır. (Berg, Stork, 2005:220). Bu açıdan bakıldığında parlaklığın sıcaklıkla ters orantılı, doluluğun da sıcaklık veya parlaklıkla doğru orantılı olduğundan söz edilebilir.

1.4.2 Dinamikler ve Ses Zarfına İlişkin Değerlendirmeler

Frekans eş gürlük algıları, spektrum boyunca farklı miktarlarda enerjiler gerektirdiğini göstermektedir. Bu farklılıklar desibel ölçeğindeki duyma eşiğine benzer bir şekilde frekans ekseninde yeni bir referans gerektirmiştir. Bu yaklaşım 1 kHz referans değerindeki her bir ses yüksekliğini (dB) aynı değerli *phon* birimiyle eş tutar; böylece gürlük kavramı algısal, psikoakustiğe özgü bir kavramken ölçülebilir bir parametre halini alır. Eş gürlük eğrileri Şekil 4 üzerinden incelenebilir.



Şekil 4- Eş gürlük eğrileri (aktaran Meyer, 2009:7)

Şekil 4 incelendiğinde 1 kHz üzerindeki tüm phon ve ses yüksekliği (dB) değerleri birbirine eşittir. Özellikle 200 Hz altı bölgedeki tüm eş gürlük eğrileri daha yüksek dB değerleriyle sağlanmıştır. Bu durum, duyum aralığı alt ve üst limitleri olan 20 Hz – 20 kHz'e doğru yaklaştıkça duyma performansının azalmasıyla ilişkilendirilebilir. Burada dikkat çeken bir diğer sonuç, frekansta yaşanan aynı seviye değişimlerinin aynı gürlük algısı değişimine sebep olmayacağı yönündedir (Meyer, 2009:7).

İKİNCİ BÖLÜM

HACİM AKUSTİĞİ

2.1 Sesin Odadaki Yayılımı

Oda akustiğinde ses kaynağı yönlülük özellikleri doğrultusunda ses dalgaları yayar; ses dalgaları oda içerisinde çarptıkları materyallerin özelliklerine göre manipüle olur. Bu manipülasyon, temel olarak yön değişimi ve enerji kaybı olarak değerlendirilebilir. Gelen ses enerjisi; yüzeyden yansıyan, yüzeyde emilen ve yüzeyin komşu bileşenlere geçirdiği ses enerjilerinin toplamına eşittir. Ses dalgalarının meydana geldiği ve diğer alıcı konumlar arasındaki engelsiz ilk yansıma, sesin o konumdaki "direkt ses" bileşenini doğurur. Burada hava moleküllerindeki sürtünmeden kaynaklı olarak mesafeyle birlikte artan kayıplar gerçekleşir. Diğer tüm yön manipülasyonu içeren yansımalar direkt ses sonrasında odada aldıkları mesafeler kadar ardı ardına dizilir.

Çınlamayı bu çalışma kapsamında, doğrudan gelen sese, zaman ekseninde, sonradan eklenen bileşenler kümesi şeklinde tanımlayabiliriz. Çınlamanın uzunluğu, oda içerisinde çok sayıdaki parametreden etkilenmekte ve konumdan konuma küçük değişimler gösterebilmektedir. Emicilik katsayılarının ve ses dalgalarının odada yön değiştirerek aldığı parçalı mesafelerindeki seviyelerin matematiksel ortalamasıyla tek bir değerle incelenebilir. Sabine ile başlayan ve genel kabul gören çınlama süresi hesaplama yönteminin Eyring, Millington, Kuttruff, Arau gibi farklı bilim insanlarının önerdiği güncellenmiş formülleri yardımıyla gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmek adına literatüre kazandırılmış olduğunu görmekteyiz. Bu çalışmada, standartlarda da önerilen Sabine eşitliği esas alınmıştır.

2.1.1 Çınlama Süresi

Bir odadaki yayınık ses alanı, kaynak W gücünde enerji yayarken tüm yüzeylere gelen ses enerjisi ve ortalama emicilik katsayısının çarpımı kadar güç kaybeder. Oda hacmindeki zamana bağlı enerji değişimi; kaynaktaki güç değeriyle, yüzey alanı üzerinden kayıplar arasındaki farka eşittir. Eğim, Denklem 6'da gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$D = 10 \log_{10} e^{cA/4V} \quad (6)$$

D: Düşüş eğimi (dB/t)
e: 2.71
c: Ses hızı (m/s)
A: Sabine değeri (m^2/sabine)
V: Oda hacmi (m^3)

Burada t = 0 ve t = ∞ değerleri arasındaki düşüş eğimi, sesteki 60 dB azalışın zaman eksenindeki karşılığı olan çınlama süresi hesabı için kullanılabilir. 60 dB düşüşün zaman eksenindeki karşılığı Denklem 7'deki gibidir. Ses hızı, oda sıcaklığıyla ilişkili bir değerdir ve 20°C oda sıcaklığı, 343 m/s hız değeri temel alınmıştır (Maekawa, Rindel ve Lord, 2010: 66).

$$RT = \frac{60}{D} = \frac{55.3*V}{c\,A} = \frac{0.161*V}{A} \; @\; 20°C \quad (7)$$

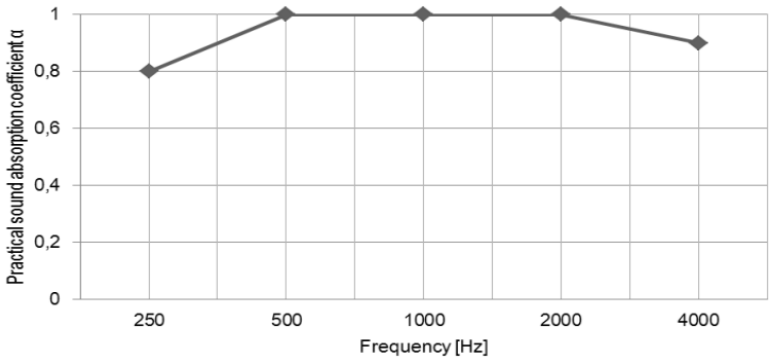
D: Düşüş eğimi (Hz)
V: Oda hacmi (m^3)
c: Ses hızı (m/s)
A: Sabine değeri (S*α)

2.1.2 Malzemede Emicilik

Bir ses dalgası, oda içerisinde çarptığı yüzeylerde kendi frekans içeriğindeki her bileşenden farklı miktarlarda kaybeder. Bu kayıplar, her bir malzemenin soğurma enerjisine eşittir. Kaybedilen ve gelen enerjinin oranı her bir materyalin sesi soğurma katsayısıdır (α) ve 0 - 1 arasında değerler alır.

Malzemelerin emicilik ölçüm ve tanımlarını içeren iki önemli standart mevcuttur. Bunlar Amerikan menşeli ASTM C423-09a; Avrupa menşeli DIN EN ISO 11354 ve DIN EN ISO 11654 standartlarıdır. Avrupa standardına göre "pratik emici değeri", bir malzemenin 1/1 oktav bant değerlerindeki soğurma performansını gösteren değerlerdir. Pratik emici değerleri; 1/1 oktav banttaki merkez frekansının ve alt - üst kesim frekanslarının 1/3 oktav banttaki ölçülmüş α değerlerinin ortalamasıdır.

Her bir malzemenin ağırlıklı emicilik değeri (α_w), DIN EN ISO 11654 kapsamında sunulan referans eğrisinin pratik emici değerleriyle yapılan karşılaştırmalarıyla belirlenir. Referans eğri, ölçülen değerlere doğru -0.05 kaydırılır. Kaydırma işlemi, ölçülen değerlerle referans eğri arasındaki farkların toplamı ≤ 0.1 olana kadar devam eder. 250 Hz, 500 – 1000 Hz ve 2000 - 4000 Hz değerlerinde büyük farklar (> 0.25) olması halinde çeşitli harf göstergeleri (sırasıyla L – M – H) belirtilir. Ağırlıklı α_w değeri, ölçülen değerlere en çok yakınsayan referans çizgisindeki 500 Hz'e karşılık gelen α değeri olarak belirlenir (aktaran Bıałek, Nowicka, 2016:2). ISO 11654 eğrisi kapsamında sunulan a_w referans eğrisi Şekil 5'te gösterilmiştir. DIN EN ISO 11654 standardındaki a_w performans sınıf ilişkileri Tablo 2'de gösterilmiştir.



Şekil 5- ISO 11654 kapsamında sunulan a_w referans eğrisi (aktaran Bıałek, Nowicka, 2016:3).

Tablo 2- DIN EN ISO 11654 standardında a_w performans sınıf ilişkileri (aktaran Bıałek, Nowicka, 2016:5).

Ses emilim sınıfı	**α_w değerleri**
A	0.9 - 0.95 - 1
B	0.8 - 0.85
C	0.6 - 0.65 - 0.7 - 0.75
D	0.3 - 0.35 - 0.4 - 0.45 - 0.5 - 0.55
E	0.15 - 0.2 - 0.25

Materyaller farklı frekans bölgelerindeki α değerlerine göre emici, yansıtıcı ve saçıcı olarak sınıflandırılır. Emici özellik > 0.5 α değerleriyle sağlanırken, < 0.2 aralığı yansıtıcı bir akustik nitelik sunar (Lombardo, 2009:53). Akustik malzemeler genel olarak gözenekli, panel-membran emiciler ve rezanotörler olarak sınıflandırılabilir (Gonzalez, 2009:27). Gözenekli materyaller (halı, perde, mineral yünü, cam elyafı) yüksek

frekanslarda emiciyken; membran emici ve rezanotörler ise bas bölgesinde etkindir. Ancak her biri için uygulanan ek yöntemler veya aynı teorilerin farklı sayısal parametrelerle uygulanmış halleri birden fazla frekans bölgesine yönelik hibrit çözümler sunmayı mümkün kılmaktadır. Kalınlık, yüzey açıklığı, hava boşluklu hacim ve panelin kurulum şekli gibi faktörler, akustik panelin bas, orta veya tiz frekans bölgesindeki davranışını belirleyen önemli etkenlerdir.

Cam elyafı, taş yünü ve mineral yün gibi malzemelerden üretilen gözenekli materyallerin frekans spektrumundaki emiciliği; akış özdirencinden ve gözeneklilikten etkilenir. Gözeneklilik, gözenek hacminin toplam materyal hacmine olan oranıdır. Bir malzemenin özdirenci ise, bilim kalınlık değerindeki direnç değeridir. Akış direnci, materyalin giriş ve çıkış yüzeylerindeki basınç farkı ile sabit akış hızının oranıdır (Rossing, 2014: 996). Hava moleküllerinin malzeme içerisine girişinin kolaylığı bu değerle ifade edilir. Bu değerin ölçüm kalınlığıyla oranı, tıpkı yoğunluk (kg/m^3) gibi farklı boyutlarda değişmeyen ve emiciliği belirleyen bir özdirenç değeri sunar. Özdirenç değerinin matematiksel ifadesi, Denklem 8'de verilmiştir (Cox, D'Antonio, 2016:139).

$$\sigma_s = \frac{\Delta P}{U} \qquad \sigma = \frac{\sigma_s}{d} \tag{8}$$

σ_s: Hava akış direnci (rayls)
ΔP: Basınç farkı (Pa)
U: Parçacık hızı (m/s)
σ: Özdirenç değeri (rayls/m)

Malzemedeki yoğunluk arttıkça malzeme içi akışkanlık azalır; dolayısıyla özdirenç değeri artar. Bu sebeple daha yüksek değerlerde bir ses emiciliği elde edilir (Seddeq, 2009:4611). Malzeme gözenekliliğindeki artış yüzey üzerindeki sürtünmeyi arttıracağı için ses emicilik performansını arttırır (Cox, D'Antonio, 2016:140).

Kalınlık değerinin hedef dalga boyunun en az 1/10 katı olduğu gözenekli materyal tasarımları, bas frekans bölgesinde etkin rol oynamaya başlar (Lombardo, 2009:55). Panel kalınlığının dört katı kadar olan dalga boyuna sahip frekans bileşeninde en yüksek emicilik gözlenir (Seddeq, 2009:4612). Bu panel kalınlığı iç malzemeyle veya

duvarla arasındaki hava boşluğu ile sağlanabilir. Böylece daha geniş bir frekans spektrumunda etkili emicilik sağlanır.

Panel veya membran tipi paneller; iki şerit arasına yerleştirilmiş ince bir zar yüzeyin duvarla arasındaki hava boşluğunu sıkıştırmasıyla bas frekans bölgesinde bölgesel emicilikler sağlar (Gonzalez, 2009:27). Panelin üretim boyutlarına bağlı olarak değişen rezonans frekansı Denklem 9 ile bulunabilir (Cox, D'Antonio, 2016: 171). Denklem 9'a göre artan hava boşluğu etkin frekans değeri *sub-bass* bölgeye yaklaştırır.

$$f = \frac{60}{\sqrt{md}} \qquad (9)$$

f: Rezonans frekansı
m: Panel kütlesi (kg/m^2)
d: Derinlik (m)

Helmholtz rezonatörler, tıpkı membran emicilerde olduğu gibi titreşen hava molekülleri sayesinde bir bas emiciliği sağlar. Bu hava boşlukları farklı geometrilerde (küre, prizma) tasarlanıp tek veya çoklu sistemler halinde bir araya getirilir. Membran tipi ve helmholtz tipi rezonatörlerde hava boşluğu içerisine veya panel arkasına gözenekli malzeme yerleştirilebilir. Hava boşluğuna yerleşen gözenekli malzeme bant genişliğinde artış sağlarken maksimum yerel emilim gücünü azaltır. Tekli helmholtz rezonatörlerin tasarım parametrelerine göre tonlanan frekans değeri Denklem 10'da gösterilmiştir (Gray, 1972:447).

$$f = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{\pi d^2}{4\,V\,(l + 0.8d)}} = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{A}{V\,(l + 0.8d)}} \qquad (10)$$

f: Rezonans frekansı
c: Ses hızı (m/s)
d: Port açıklık çapı (m)
l: Port uzunluğu (m)
V: Rezonatör hacmi (m^3)
A: Port alanı (m^2)

Çoklu Helmholtz rezonatörler; ince kalınlıklı membran emicilerle, yüzeyde dağılmış çok sayıda küçük boyutlu helmholtz rezonatörlerin hibrit bir yapısıdır (Gonzalez, 2009:31). Açıklıklar farklı geometrilerde tercih edilebilir. Bu açıklık formları dairesel delikli, dikey yarıklı ve paralel şeritli şeklinde tasarlanabilir. Her bir geometrik form, frekans değerinde farklı hesaplamaları gerektirir. Dairesel delikli panellerin frekans hesabı Denklem 11'de gösterilmiştir (Lombardo, 2009:57).

$$f = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{p}{(D+1.6d)\,h}} \quad (11)$$

f: Rezonans frekansı (Hz)
c: Ses hızı (m/s)
p: Açıklık yüzdesi (%)
D: Arka boşluk derinliği (m)
d: Panel çapı (m)
h: Panel kalınlığı (m)

2.1.3 Bir Konumdaki Sesin Seviyesi

Bir ses kaynağının odanın bir diğer konumundaki ses yüksekliği, direkt ses bileşeni ve o konumdaki çınlama bölgesindeki bileşen enerjilerin toplamı kadardır. Direkt ses bileşeni, ses kaynağı gücü ve konumla arasındaki mesafeden etkilenirken, çınlama bölgesindeki ses kaynağı seviyesi farklıdır. Buradaki kaynak, ilk yansımadan geriye kalan (1-α) oranındaki bir enerji değeridir. Yönelgenliği olmayan bir ses kaynağının belirli bir r mesafedeki toplam enerjisi Denklem 12'de gösterilmiştir.

$$L_p = L_w + 10\log_{10}\left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4\,(1-\alpha)}{S\alpha}\right) \quad (12)$$

L_p: Bir konumdaki ses basıncı (dB)
L_w: Ses kaynağı gücü (dB)
r: Mesafe (m)
S: Yüzey alanı (m^2)
α: Ortalama emicilik katsayısı

Yönelgenliği (Q) olan bir ses kaynağının bir diğer konumdaki ses yüksekliğine etkisi Denklem 13'te gösterilmiştir. (1-α) / Sα sayısal değeri; odaya özgü bir R parametresi ve oda sabiti olarak belirlenmiştir (Maekawa, Rindel ve Lord, 2010: 73).

$$L_p = L_w + 10\log_{10}\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4\,(1-\alpha)}{S\alpha}\right) \quad (13)$$

L_p: Bir konumdaki ses basıncı (dB)
L_w: Ses kaynağı gücü (dB)
Q: Yönelgenlik faktörü
r: Mesafe (m)
S: Yüzey alanı (m^2)
α: Ortalama emicilik katsayısı

2.1.4 Odaya Özgü Ses Gücü Parametresi (G)

Ses yüksekliğiyle ilişkili bir diğer parametre, odanın sesteki güçlendirici etkisini tanımlayan ses gücü (G, sound *Strength*) değeridir. Ses gücü, çok yönlü bir ses

kaynağındaki toplam enerji ve 10 m uzaklığındaki alıcı noktasında meydana gelen direkt enerjinin farkına eşittir. Denklem 14'teki $1/4\pi r^2$ bileşeni herhangi bir noktanın direkt ses güç değeriyken, $4(1-\alpha)/S\alpha$ bileşeni yansımalar sonucu oluşan bileşenlerin toplam enerjisidir. Bu iki bileşen etkisi, G parametresinin tanımıyla benzeştirilerek Denklem 14'teki gibi düzenlenmiştir (Rindel, 2014:3). Kaynak noktasındaki toplam enerji hesabında r değeri 0 olduğu için direkt ses bileşenine yer verilmemiştir; ancak ortalama emicilik değeri kaynak ses enerjisinde etkilidir.

G = Kaynak noktası - 10 m ötedeki direkt ses

$$G = 10\log_{10}\left(\frac{4\,(1-\alpha)}{S\alpha}\right) - 10\log_{10}\left(\frac{1}{4\pi r_0^2}\right)$$

$$G \cong 10\log_{10}\left(\frac{4\,(1-\alpha)}{S\alpha}\right) + 31 \qquad (14)$$

r_0: 10 m.
S: Yüzey alanı (m^2)
α: Emicilik katsayısı

2.2 Akustik Dürtü Tepkisi Analizi

Bir mekândaki akustik, geleneksel formüllerin yanı sıra ISO 3382-1 standardında sunulan yöntemlerle, geniş spektrumda, eşit enerji bileşenli aktif bir ses kaynağının zaman ekseninde susturulduğu ve odadaki uyarılmış enerjinin arka plan gürültü seviyesine indiği iki an arasındaki bölge incelenerek analiz edilebilir. Bu veri, odanın bir sesteki kalış (*sustain*) ve sönümleniş (*release*) zarflarına olan etkileriyle ilgili bilgiler sunar. Ses kaynağı odayı tetikleyen bir dürtü sinyali üretir; incelenen veri ise odanın bu dürtüye verdiği akustik tepkidir. Oda dürtü tepkisi (RIR), sesin zaman eksenindeki sönümlenme hızı, oda yüzeylerinin sesi yansıtma performansı ve oda hacmine bağlı olarak değişmektedir. Bu durum farklı çınlama özelliğine sahip odalardaki RIR verilerinde farklı uzunlukta düşüş eğrilerinin üretilmesine yol açar.

RIR ölçümlerinde oda içerisindeki ses kaynağı – ölçüm noktası konumları ve birbirleri arasındaki uzaklıkları etkilidir. Bunun en önemli sebebi, akustik parametrelerin oda içerisinde konumdan konuma değişiklik göstermesidir. Ölçüm noktası etrafındaki akustik malzemelerin saçıcılığı veya emiciliği, herhangi bir yüzeyin içbükey veya dışbükey oluşu gibi geometrik form özellikleri bu çeşitliliği sağlar. Tüm bunlar tek bir RIR verisinde bölgesel değişimlerin yaşanması için yeterlidir. RIR verisindeki bu

bölgeler, erken yansıma ve geç yansıma olarak gruplandırılmıştır. Erken yansıma bölgesi, ses kaynağı etrafındaki yüzeylerin özelliklerinden etkilenirken; geç yansıma bölgesi oda hacminin etkileriyle şekillenir.

RIR ile oda akustiği analizlerinde çeşitlilik sağlayan bir etken daha mevcuttur. Bu çeşitlilik, her bir frekans grubunun kontrol edilebilir farklı özelliklerde olmasından kaynaklanır. Tiz frekanslar düşük dalga boylu olmaları sebebiyle daha fazla soğurulur; ancak bas frekanslar güçlü enerjileri ile odadaki varlıklarını daha uzun süre korurlar.

Bir odadaki akustiğin tüm yönleriyle ele alınabilmesi için bu çeşitlilik etkilerinin hepsinin değerlendirilmesi gerekir. Ölçüm noktası çeşitliliği ve özellikle küçük odalardaki bas bölgeyi de kapsayan geniş frekans kontrolü çok önemlidir. Akustik analiz, frekans içeriğindeki her bir bölgenin filtreden geçilerek bileşenlere ayrılmasıyla başlar ve frekansa özgü teşhislerle genel bir akustik tasarım sağlanır. Analiz, çeşitli veri yumuşatma teknikleri ve yine frekansa özgü gürültü – sinyal oranı ve dinamik alanın belirlenmesiyle devam eder. Bu analizdeki temel amaç, bir RIR verisinden akustik parametrelerin hesaplanacağı tek dereceden polinom denklemlere ulaşmaktır.

RIR analizinde, parametre çıkarımlarındaki birtakım belirsizliklerinden ötürü, farklı seçimler birbirine yakın ama farklı sonuçlar doğurabilir. Bunun sebepleri; farklı filtre derecelerinin seçilmesi, farklı gürültü kompanzasyonu tekniklerinin uygulanması veya hiç uygulanmaması, direkt sesten önceki dikkate alınan ilk seviyedeki farklılıklar olabilir (Mansilla, vd, 2015: 3333-3343).

2.2.1 Filtreleme

RIR analizleri, oktav bant merkez frekans değerli sayısal filtrelerden geçirilerek her bir frekans değerindeki düşüş eğrileri ile elde edilir. TS EN 61260 - 1 standardı, analog ve dijital sistemlerdeki oktav veya kesirli filtre tasarım yöntemlerini tanımlar Standartta oktav oranı (G), 2 değerine yakın veya eşit olacak şekilde iki farklı sayı tabanı seçeneği halinde sunulur. G değeri, on tabanlı sistemde $10^{3/10}$ (1.995), iki tabanlı sistemde ise 2 değerine eşittir (TS EN 61260-1, 1996:2). Standartta özellikle on tabanlı sistem önerilmektedir. Örnek olarak; merkez frekansı f_m Hz olan 1/b oktav bant genişlikli filtrenin alt (f_1) ve üst kesim (f_2) frekansları, Denklem 15 ile hesaplanabilir (TS EN 61260-1, 1996:3).

$$f_a = G^{-1/2b} \times f_m$$
$$f_u = G^{+1/2b} \times f_m \quad (15)$$

f_a: Alt kesim frekansı (Hz)
f_b: Üst kesim frekansı (Hz)
1/b: Oktav bant genişliği
f_m: Merkez frekansı (Hz)

Burada oktav bant genişliği, merkez frekansın ne kadarlık bir frekans aralığını temsil edeceğini belirleyen bir parametredir. Bu aralığın daha dar olması, değerlendirilecek frekans sayılarının daha fazla olmasıyla sonuçlanır. Bu da tıpkı yeterli sıklıkta örneklenmiş bir sinyal gibi daha yüksek çözünürlüklü bir frekans analizi sunar; detaylı frekans incelemelerinde çözünürlüğü yüksek spektrumlar daha iyi sonuç verir. Merkez frekans, bu filtrelemedeki en büyük etken derecesine sahip iken alt ve üst kesimlere doğru gidildikçe etki azalır. Bu azaltma değerleri standart kapsamında 3 farklı sınıf halinde seçime sunulmuştur: Sınıf 0, Sınıf 1 ve Sınıf 2. ISO 3382 - 1 standardı 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz merkez frekans değerli, 1/1 oktav bant genişlikli akustik değerlendirmeleri optimum olarak değerlendirmektedir. Denklem 15, örnek olarak 1 kHz için değerlendirilecek olursa alt ve üst kesim frekansları sırasıyla 710 ve 1420 değerlerini alır. 2 kHz merkez frekanslı filtre ise yaklaşık 1420 Hz alt limit değerine sahiptir.

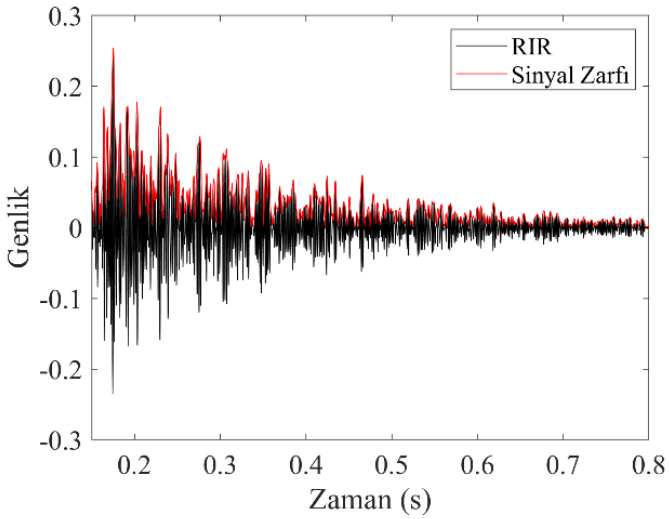
2.2.2 Hilbert Dönüşümü

Filtrelenmiş sinyaller + ve – bölgede yaptığı salınımlarla zaman eksenine göre simetrik bir görünümdedir. Hilbert dönüşümündeki amaç, filtrelenmiş sinyallerin pozitif kısımdaki üst zarfı elde etmektir. Sinyal zarfı (X_a); gerçel kısmı RIR (X_r), sanal kısmı RIR sinyalin Hilbert dönüşümü uygulanmış formu (X_i) olan analitik bir sinyaldir. Analitik sinyaller, negatif frekans bileşenlerini içermezler; zaman eksenindeki faz, frekans ve büyüklük gibi anlık parametreleri ölçmede kullanılırlar (Lyons, 1997:365). Bir sinyalin analitik versiyonu Denklem 16 ile elde edilebilir (Lyons, 1997:364).

$$X_a(t) = X_r(t) + X_i(t) \cdot i \qquad (16)$$

X_a: Sinyal zarfı
X_r: Sinyal zarfının gerçel kısmı
X_i: Sinyal zarfının sanal kısmı

X_i, RIR ve Denklem 17'de dizi formülü verilen Hilbert dönüşümünün konvolüsyon tekniği ile çarpılmasının bir sonucudur (Lyons, 1997:370). RIR zarfı Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6- RIR zarfı (kırmızı)

$$h(t) = \frac{2\sin^2(\pi t/2)}{\pi t} \qquad (17)$$

h(t): Hilbert dönüşümü
t: Zaman (s)

2.2.3 Gürültü Seviyesinin Tespit Edilmesi

Her bir frekans bandı farklı sinyal gürültü oranı (SNR) değerlerine sahiptir. Tiz frekanslar daha büyük SNR değerine sahipken bas frekanslarda bu değer daha azdır. Gürültü seviyesi, her frekans değerindeki regresyon analizi için gereken elverişli düşüş uzunluklarını sınırlamaktadır. Genlik değerlerinin referans alındığı zaman parametre hesaplarında bas frekanslar için daha küçük referans seviyeleri tercih edilir çünkü, daha küçük genlik azalmaları için geçen süre hesaplanabilir bir durumdadır. Bu sebeple, akustik ölçümlerdeki en önemli belirsizlik gürültü seviyelerindeki farklılıklardır. Literatürde, bu belirsizliklerin aşılması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden en etkili olanı Lundeby tarafından geliştirilen, yinelemeli algoritmaya dayanan hesaplama yöntemidir. Sinyal, 10-50 ms uzunluktaki bölütlere ayrılır; son yüzde 10'luk sinyal kuyruğundaki gürültü seviyesi öğrenilir; gürültü seviyesindeki ve sürekli yenilenen düşüş eğrilerindeki regresyon çizgilerinde kesişim yakalanana kadar bu işlemler devam eder. Fonksiyonun işlem aşamaları Lundeby vd tarafından verilmektedir (Lundeby, vd, 1995:354).

2.2.4 Zaman Parametrelerinin Analizi

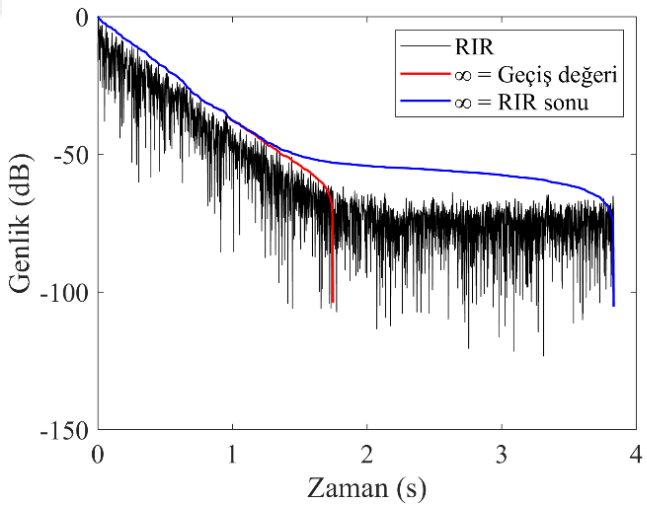
Farklı odalardaki akustik özelliklerin birbiriyle karşılaştırabilmesi için çeşitli genlik seviye düşüş değerleri referans olarak alınır. Bu referans değerlerle yapılan analizler sonucunda ulaşılan sönümlenme süreleri zaman parametreleri olarak isimlendirilir. Dürtü tepkisi, zaman parametreleri analizi için ileri yumuşatma teknikleri ve regresyon hesapları aşamalarından geçer.

Akustik ölçümdeki uyarı sinyalleri geniş spektrumda rastgele sinyaller oldukları için farklı zamanlarda farklı sonuçlara sebep olmaktadır. Bu durum tek bir değere ulaşmak için çoklu ölçümlerden alınan değerlerin ortalamalarını hesaplamayı gerektirmiştir. Schroeder belirli bir zaman aralığındaki enerjiyi toplam enerjiden çıkartarak yumuşatılmış düşüş eğrilerini elde etmiştir. İntegrasyon yöntemiyle elde edilen değer geleneksel yöntemdeki çoklu değerlerin ortalamasına eşittir. Ters integrasyon ilişkisi Denklem 18'de gösterilmiştir (aktaran Rossing, 2014:314). İntegrasyon işleminin

tersten yapılmasının nedeni sonsuz olarak tanımlanan üst integral limit değerinin ölçüm başında bilinemiyor olmasıdır. Ancak günümüzdeki modern bilgisayarlar kullanılarak bu durum kolaylıkla aşılabilir.

$$RIR = \int_{t}^{\infty} r(t)^2\,dt = \int_{0}^{\infty} r(t)^2\,dt - \int_{0}^{t} r(t)^2\,dt \qquad \text{r(t): Ölçüm sonucu} \qquad (18)$$

Zaman parametrelerinin analizindeki bir sonraki aşama olan doğrusal regresyon, integral alınacak bölgenin üst limit değeri arka plan gürültüsünü kapsadığı durumda yüksek hata değerleriyle gerçekleşmektedir. Bu sebeple, üst limit olarak önerilen değer çınlama bölgesiyle gürültü seviyesi arasındaki geçiş değeridir. Geçiş değeri, Denklem 18'deki sonsuz üst limit değerine eşitlenir. Farklı üst limitlerin integrasyona etkileri Şekil 7'de gösterilmiştir. Mavi çizgi, zaman parametre hesaplarındaki referans alınan genlik değeri olan -60 dB seviyesindeki düşüş için farklı ve gerçek dışı bir değer sunarken kırmızı çizgi üzerindeki regresyon daha düşük bir hata değeriyle gerçekleşecektir.

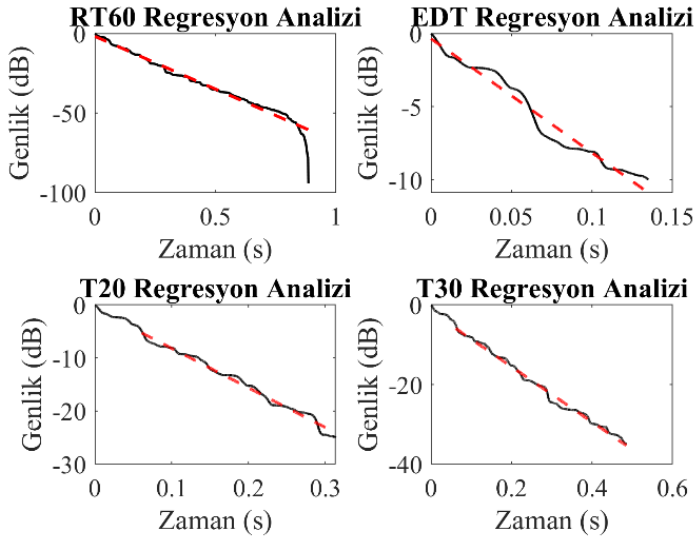


Şekil 7- Farklı üst limitlerin integrasyona etkileri

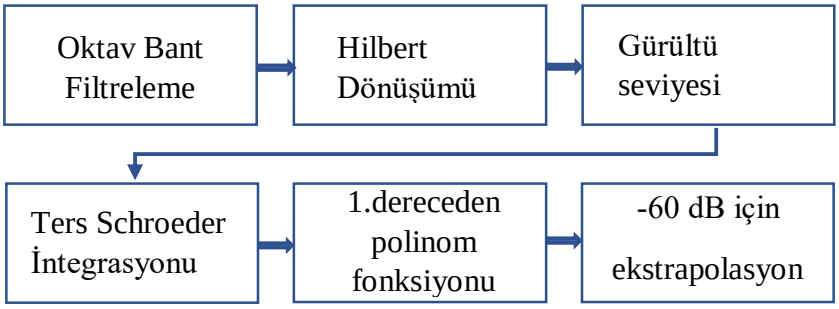
Geleneksel Sabine çınlama süresi hesaplarında 60 dB düşüş hesabı için zaman içinde alternatif denklemler, parametreler önerilmiştir. Bu parametreler, RIR verisinde ses seviyesinde farklı bölgelerden elde edilen düşüş eğimlerinin -60 dB seviyesine kadar hiç değişmeden devam ettiği varsayımına dayandırılır. Böylece farklı RIR bölgelerindeki düşüş hızları ortak bir paydada ifade edilebilir, birbirleri ile karşılaştırılabilir. Bunlar aynı

zamanda ses kaynağı ve gürültü seviyesi arasındaki dinamik alanın yeterli olmadığı durumlarda, odanın RT60 değeriyle ilgili bir değer sunabilir. Farklı düşüş bölgelerinden elde edilirler ve EDT, T20 ve T30 olarak adlandırılırlar.

Erken düşüş süresi (EDT), ses düşüşündeki 0 ve -10 dB; T20, ses düşüşündeki -5 ve -25 dB; T30, ses düşüşündeki -5 ve -35 dB arasındaki en doğrusal polinom eğrisi üzerinde, -60 dB değeri için yapılan regresyon analizleri ile hesaplanmaktadır (ISO3382-1, 2010:2). Bu parametreler, frekans değerlerindeki değişken gürültü seviyesi en az 45 dB dinamik alan sunduğunda -60 dB düşüş seviyesindeki zaman ekseni tahmin değerini yansıtır. Bu sebeple, düzensiz dağılım gösteren düşüş bölgeleri için tek bir fonksiyon ifadesine gereksinim vardır. Bu amaçla, her bir parametre bölgesinde 1.dereceden polinom fonksiyonları belirlenir. 1.dereceden polinom fonksiyonlarının -60 dB düşüş seviyesine doğru devam ettiği durumdaki geçen zamanın kestirimi için ekstrapolasyon analizleri yapılır. Düşüş bölgelerindeki örnek regresyon vektörleri Şekil 8'te zaman parametreleri analizi aşamaları Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 8- Düşüş bölgelerindeki örnek regresyon vektörleri (kırmızı kesikli).



Şekil 9- Zaman parametreleri analiz aşamaları

2.2.5 Enerji Parametrelerinin Analizi

Yumuşatılmış RIR verisinde farklı bölgelerdeki enerjilerin birbirleriyle oranları hesaplanarak farklı işlevlere yönelik akustik açıdan uygunluklarla ilgili kanılara varılabilir. Bu bölgelerdeki enerji, alt ve üst zaman limitleri arasındaki birim zaman alanların kümülatif bir toplamı olarak düşünülebilir. Bu işlem, integral hesabı ile gerçekleştirilir. Burada enerjiyi etkileyen etmenlerden biri, bölgesel düşüş eğimidir. Eğim azaldıkça bu bölgedeki alan artar, bu da zaman ve enerji parametreleri arasındaki ters orantılı ilişkileri açıklamakta önemli bir rol oynar. Müzik veya konuşma olması fark etmeksizin sinyaldeki birbiri ardına gelen notaların veya hecelerin birbiriyle daha bağlı bir formda olma durumu erken yansıma bölgesindeki enerjiden etkilenir. Ayrıca oda içerisindeki direkt sinyal, erken yansımalar bölgesindeki enerjiyle daha güçlü algılanabilir. Buradaki daha uzun bir sönümlenme; daha düşük bir düşüş eğimi, sinyalin berraklık özelliğinde azalmaya neden olur.

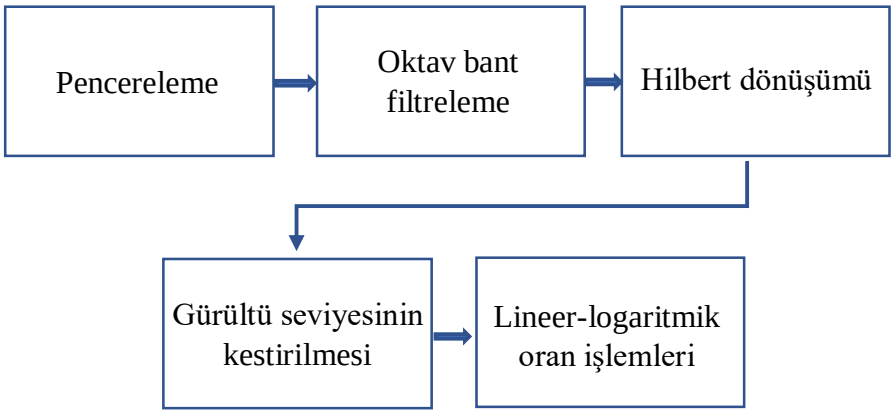
Zaman parametrelerinden farklı olarak enerji parametreleri analizi erken ve geç yansıma bölgelerinin pencerelenmesi işlemiyle başlar. Bunun sebebi, filtrelenmiş sinyalin orijinal sinyale göre zaman ekseninde gecikmiş bir formda olmasıdır. Birbiriyle oranlanacak iki bölge arasındaki limit değeri, filtrelenmiş sinyallerde hatalı ve gerçeğinden daha geri bir örnek noktasında değerlendirilir. ISO 3382-1'de önerilen yönteme göre, önce geniş spektrumdaki sinyal iki bölgeye ayrılır; ardından iki bölge oktav bantlarda filtrelenerek her bir frekansa özgü bölgesel enerji oranları hesaplanır (ISO3382-1, 2010:16). Bu limit değeri, müzik sinyallerindeki berraklık için 80 ms iken konuşma sinyalleri için 50 ms'dir. Parametreler sırasıyla C80 ve D50 olarak

isimlendirilir. Thiele, D50 için iki farklı zaman bölgelerinin birbirlerine olan oranlarını, anlık ses basıncı değerlerinin karesinin integralleriyle ilişkilendirmiş ve Denklem 19'daki gibi sunmuştur (aktaran Maekawa, Rindel ve Lord, 2010: 88).

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50\ ms} p(t)^2 dt}{\int_0^{\infty} p(t)^2 dt} \qquad \text{p(t): Anlık ses basıncı değerleri} \qquad (19)$$

Reichardt, müzik sinyallerindeki berraklık değerlendirmeleri için limit değerini 80 ms olarak belirlemiştir ve dürtü tepkisi üzerinden hesaplama yöntemi Denklem 20'de sunulmuştur (aktaran Maekawa, Rindel ve Lord, 2010: 88). D50 parametresi, erken yansımanın tüm dürtü tepkisindeki alanını 0 ve 1 arasındaki oranlarla ifade ederken C80 parametresi iki farklı bölge alanının logaritmik oran yani fark değerini verir. Her iki formülde de sonsuz limit değerleri, dürtü tepkisinin gürültü seviyesine indiği andır. C80 ve D50 parametre analizi akış diyagramı Şekil 10'da gösterilmiştir.

$$C_{80} = 10 \log 10 \ \frac{\int_0^{80\ ms} p(t)^2 dt}{\int_{80\ ms}^{\infty} p(t)^2 dt} \qquad \text{p(t): Anlık ses basıncı değerleri} \qquad (20)$$



Şekil 10- C80 ve D50 parametre analizi akış diyagramı

Odaya özgü G değeri, dürtü tepkisi analizlerinde hesaplanması mümkün olan bir başka enerji parametresidir. Kaynak noktasındaki enerji ve 10 m ötedeki RIR verisinin direkt ses bileşeni arasındaki enerji farkı G değerini verir. Dürtü tepkisi üzerinden yürütülen integral hesabı Denklem 21'de verilmiştir (ISO3382-1, 2010:10).

$$G = 10 \log 10 \frac{\int_0^{\infty} p(t)^2 dt}{\int_0^{t\infty} p(t)^2_{10\,m} dt} \qquad p(t): \text{Anlık ses basıncı değerleri} \qquad (21)$$

2.3 Güncel Akustik Parametreler

Zaman parametreleri, odadaki akustik için müzik ve konuşma gibi işlevlere yönelik farklı çıkarımlar sağlar. EDT, ilk 10 dB düşüşten elde edilen eğim üzerinden hesaplanan çınlama süresi olduğu için, devam etmekte olan müzik veya konuşma performansındaki ardından gelen notaları ve heceleri maskeleme özelliği hakkında bilgiler sunar (Rossing, 2014: 307). Örneğin; RT60 değerinden daha uzun bir EDT değeri, ilk 10 dB düşüşün 60 dB düşüşten daha az bir eğimle ve yavaş gerçekleştiğini açıklar. Böyle ortamlarda maskeleme etkilerinin varlığından söz edilebilir. Bu durum, özellikle konuşma işlevli hacimler için tercih edilmez. Müzikte durum daha farklıdır ve müziğin türüne göre daha düşük düzeyde bir berraklık istenebilir. Bu da daha yüksek RT60 değeri demektir. Farklı işlevlere yönelik mekânlarda istenen RT değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3- Farklı işlevlere yönelik mekânlarda istenen RT değerleri

Oda türü	Optimum RT aralığı
Konser salonları	1.8 – 2.2
Konferans salonları	0.6 – 1.1
Müzik stüdyoları	0.5 – 0.8
Müzik prova odaları	İhtiyaç duyulan G'ye göre değişken

Konser salonları, büyük hacim değerli oldukları için güçlü modal enerjiler, bas frekanslarda aşırı uzun yankı süreleri şeklinde kendisini göstermez. Ancak, stüdyo ve müzik prova odaları gibi küçük hacimli odalarda gerçeğe en yakın duyum istenir. Müzik stüdyoları, kaydedilmiş sesin efektlerle işlenmeye hazır bir biçimde, kuru ve yankısız olmasına yönelik düşük çınlama değerleriyle tasarlanır. Müzik prova odaları, seslendiricinin teknik açıdan daha doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için yeterli gürlük değerine imkân verebilecek şekilde ve küçük yankı süreleriyle tasarlanmaktadır. Bu sebeple özellikle küçük hacimli bu odalarda bas frekans çınlama kontrolünü sağlamak çok önemlidir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MODAL AKUSTİK

3.1 Modal Frekanslar

Bir cismin boyutlarından kaynaklanan doğal frekansları, modal frekans olarak isimlendirilir. Cisimler, dışarıdan bir sinyalle uyarıldığında öz titreşimleri, diğer tüm bileşenlere göre daha fazla tetiklenir, bu frekans bölgelerindeki genlik diğerlerine göre daha çok artar.

Hacim akustiği açısından bir oda esnek bir cisim olarak ele alındığında, bu doğal frekanslar sadece bir titreşim etkisi olmaktan uzaklaşıp insan kulağının duyabildiği frekans aralıklarına doğru kayar. Özellikle müzik üretilen küçük odalarda, müzikle birlikte çeşitli frekanslarda uğultu halinde kendisini gösterir.

Genişlik değeri (Q) yüksek bir modal frekans, kendisine yakın bir bas frekans ile tetiklenebilir. Bu durum müziği olumsuz etkiler. Bir odada en önemli iki fiziksel faktör, bas frekanslar üzerinde önemli bir etkisi de bulunan odanın şekli ve büyüklüğüdür. Büyük hacimli odalarda, dinleyici – alıcı ve duvar konumlarının uzaklığından başka akustik açıdan bir avantaj bulunur. Bu, odadaki modal frekans dağılımlarının küçük hacimlerdekinin aksine birbirine daha yakın olmasıdır (Winer, 2012: 469). Küçük odalarda daha lokal görünüm çizen ve bileşenlerin birbiriyle oranlarını dengesizleştiren modal frekans etkileri, büyük odalarda kaybolur.

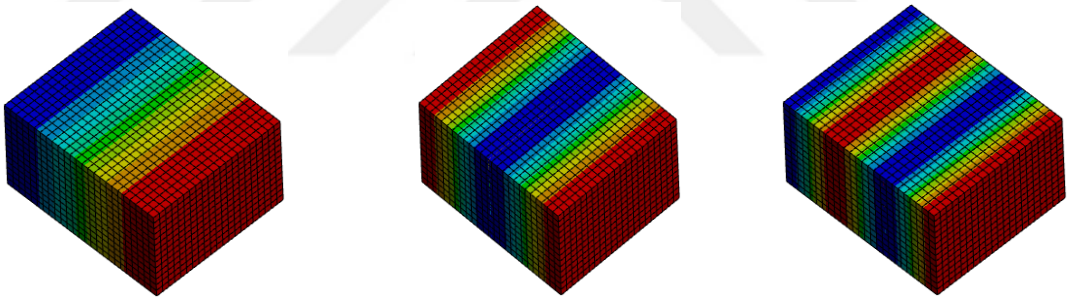
Modal frekanslar ya da oda modları, iki yansıtıcı yüzeyin salınım halindeki sinyalde durağan dalga oluşumuna yol açacak şekilde geri yansıma sağladığı koşulda oluşur. İki ardışık modal frekans arasındaki fark, matematiksel olarak yüzeylerin birbirine olan uzaklığı, dolayısıyla odanın hacmiyle ilişkilidir. İki yüzey arasında oluşan temel modal frekans değeri, Denklem 22 ile bulunabilir.

$$f_0 = \frac{c}{2L} \tag{22}$$

f_0: Temel modal frekans (Hz)
c: Ses hızı (344 m/s)
L: Eksen uzunluğu (m)

3.1.1 Eksenel Modal Frekanslar

İki eksen arasında gözlemlenen modal frekans oluşumları eksenel (*axial*) modlardır. Yüksek basınç bölgelerindeki parçacıkların hız değerleri ve yer değiştirme miktarları 0 değerine eşittir. Moleküller bu bölgelerde hızlıca toplanıp geri gelme hareketlerini yaparak anlık bölgesel kümelenmeler oluşturur. Düşük basınç bölgelerindeki parçacıklar daha çok yer değiştirerek yüksek basınç bölgelerini sıklaştırdığı için buralardaki kısmi yoğunluklar nedeniyle basınç değerleri sabit kalır. Duvara yakın bölgelerde yüksek basınç gözlenirken, oda merkezine doğru düşük basınç bölgeleri oluşur. Modal frekansların harmonik derecelerine göre yüksek ve sıfır basınç bölgelerinin sayısı değişmektedir (Ballou, 2008: 127). Oda içerisindeki basınç bölgelerinin modal frekans derecesine göre değişimi Şekil 11'de gösterilmektedir: Burada yeşil bölgeler sıfır, mavi ve kırmızı bölgeler maksimum basınç bölgelerini tanımlar.



(a) (b) (c)

Şekil 11- Oda içerisindeki basınç bölgelerinin modal frekans derecesine göre değişimi, temel frekans (a), ikinci harmonik (b), üçüncü harmonik (c)

Şekil 11-a'daki temel modal frekans oluşumunda (f_0) görülebileceği üzere basınç değerleri oda merkezine doğru azalma göstermiştir. İkinci harmonik frekans ($2f_0$) ise iki kez sıfır noktasına uğrayarak tam oda merkezinde ikinci bir maksimum basınç bölgesi oluşturur. Üçüncü harmonik frekansta ($3f_0$) ise oda içerisinde iki tepe bölgesi ve üç çukur bölgesi mevcuttur.

Şekil 11'de uzunluk eksenindeki iki paralel duvar arasında oluşan boyuna modal basınç bölgeleri gösterilmiştir. Bu oluşumlar, odanın genişlik ve yükseklik eksenlerinde de aynı şekilde ortaya çıkar. Denklem 22'de de görüleceği üzere modal frekansların

büyüklükleri arasında genel geçer bir ilişki bulunmaktadır. Uzunluk ekseni daha büyük bir L değeri sağlayacağı için bu eksendeki temel frekans, diğerlerine göre daha bas bir değerdedir ve dolayısıyla harmonik katları arasındaki modal frekans aralığı daha dardır.

3.1.2 Eksenel Olmayan Modal Frekanslar

İki eksenel olmayan mod tipi bulunur: Birbirini takip edip 4 yüzeye teğet geçmesiyle oluşan teğetsel *(tangential*), ses dalgasının oda içerisinde 6 yüzeye de çarparak yol aldığı eğik (*oblique*) oda modları. Eksenel olmayan bu iki grupta ses daha fazla yüzeye çarparak ilerler, yüksek basınç bölgelerinde atmosferik basınca göre daha düşük bir değişim yaşanır. Oda içerisindeki eksenel olmayan mod oluşumları Şekil 12'de gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 12- Oda içerisindeki eksenel olmayan mod oluşumları, teğetsel (a), eğik (b)

3.2 Dikdörtgen Odalarda Modal Spektrum Analizi

Lord Rayleigh, dikdörtgen bir modelde farklı eksen gruplarının bir kısmının veya tamamının farklı katsayılarla etkin olarak oluşturduğu modal frekans değerlerini Denklem 23 aracılığıyla sunmuştur (aktaran Everest, 2001 :327).

$$f_{p,q,r} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{q}{W}\right)^2 + \left(\frac{r}{H}\right)^2} \qquad (23)$$

$f_{p,q,r}$: Modal frekans
c: Ses hızı, 344 m/s
L: Odanın uzunluğu (m.)
W: Odanın genişliği (m.)
H: Odanın yüksekliği (m.)

Burada (p, q, r) üçlüleri farklı özel bir modal frekans değerini verir. Bu üçlüler (1,0,0), (1,1,0), (1,1,1), (2,1,0) vb. değerler alabilir. Denklem 23'te de görüleceği üzere

p uzunluk ekseni, q genişlik ekseni, r ise yükseklik ekseniyle ilişkilendirilmiştir. Denklem 22, Rayleigh denkleminin (1,0,0) üçlüsü ile düzenlenmiş ve tek eksen bazında sadeleştirilmiş bir formudur. Uzunluk eksenindeki temel axial frekansı (1,0,0) üçlüsüyle hesaplanırken, (2,0,0) ikinci harmoniği verir. Bu üçlüden ikisi sayısal değer aldığında bu sefer ikinci bir eksenin de eklenmesiyle ilgili dört yüzeyin oluşturduğu modal frekans değerine ulaşılır. Üç eksenin de katsayı alması halinde eğik mod değerleri hesaplanır. Tüm bu frekans değerleri küçükten büyüğe doğru sıralandığında, odanın modal spektrumuna ulaşılır.

Odanın modal spektrumundaki bazı öznitelikler odadaki bas frekans kontrolünün gereklilikleri ile ilgili bilgiler verir. Literatürde modal spektrumun değerlendirilmesiyle ilgili çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bonello, spektrumu 1/3 oktav bantlar halinde değerlendirerek her bir bandın içerdiği modal frekans sayılarının giderek arttığı veya ardışık olarak aynı kalabildiği sıralanmaları içeren oda modellerini önerir. Literatürde sunulan diğer önerilerde ardışık frekans aralıklarında % 5'lik farkların gözlenmesidir (aktaran Everest, 2001:343). Matematiksel olarak modal frekanslarda en fazla çakışmanın yaşanacağı modeller kuşkusuz küp formundaki odalardır. Üç eksendeki duvarlar arası mesafelerin aynı olması, Denklem 23'te üç temel eksenel frekansın ve dolayısıyla üst harmoniklerinin aynı olmasıyla sonuçlanır.

Modal dağılımlara bakıldığında, ardışık axial frekanslardaki 5 Hz veya daha az olan farklar oda modlarını daha belirgin hale getirir. Bu frekanslarda daha uzun sönümlenme süreleri gözlemlenebilir. Uygun oda boyutlarına sahip odalarda, 20 Hz aralıklı modlar birbirlerinde ses artışına sebep olmaz. (Ballou, 2008: 129)

3.2.1 Optimum Oda Oranları

Literatürde oda boyutlarının birbiriyle ilişkilendirildiği, bu boyutlarla ilgili çeşitli seçim koşullarının sunulduğu ve oda oranları koordinat haritasında farklı bölgeleri işaret eden çalışmalar mevcuttur. Tüm bu çalışmalardaki ortak optimum özellik, en az değişkenlik gösteren bas frekans tepkisidir. Bas frekans tepkisinin yumuşak değişkenlik

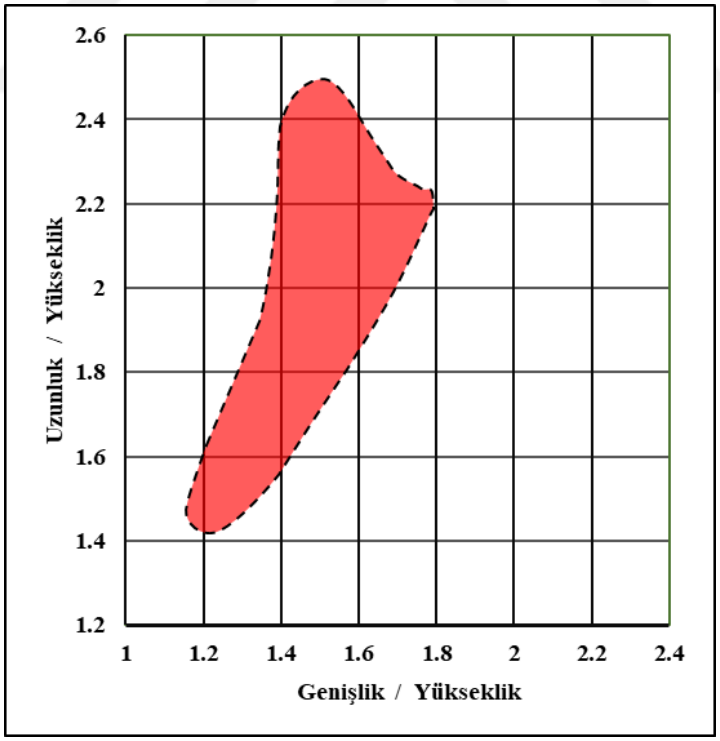
göstermesi; modal aralıkların olabildiğince geniş olması, frekanslarda çakışmaların yaşanmaması gibi özelliklerle sağlanabilir.

Bu çalışmalardan en çok referans alınanı Richard H. Bolt tarafından yürütülen, optimum modların listelendiği ve sonuçların oda oranları koordinat haritasında ayak izi şeklindeki bir bölgeyle sınırlandırıldığı çalışmadır (aktaran Everest, 2001:276). Bolt tarafından sunulan optimum oda oranları bölgesi Şekil 13'te gösterilmiştir. Bir oda oranının Bolt Alanı'ndaki varlığı, Denklem 24'teki koşullarla sorgulanabilir.

- $\frac{3}{2}(S_W - 1) < S_L - 1 < 3(S_W - 1)$
- $2 < S_W + S_L \leq 4$
- $S_W < 1.18,\ S_L < 1.41$

S_w: Genişlik yükseklik oranı
S_L: Uzunluk yükseklik oranı
W: Genişlik (m)
L: Uzunluk (m)

(24)



Şekil 13- Bolt tarafından sunulan optimum oda oranları bölgesi (kırmızı bölge)

Richard Walker, European Broadcasting Union (EBU) için yürüttüğü çalışmada Denklem 25'te sunulan şartların sağlanması halinde optimum bir modal karakteristiğe ulaşılabileceğini öne sürmüştür (aktaran Cox, D'Antonio ve Avis, 2004:641).

- $1.1\ S_W \leq S_L \leq (4.5\ S_W) - 4$
- $W < 3H,\ L < 3H$
- $S_{W,L} < 1.9,\ S_{W,L} > 2.1$
- $S_L < 2.85$

S_w: Genişlik yükseklik oranı
S_L: Uzunluk yükseklik oranı
W: Genişlik (m)
L: Uzunluk (m)

(25)

Denklem 25'teki şartların ikinci maddesinde uzunluk ve genişliğin yüksekliğe oranlarının 3 ile sınırlandırıldığı görülmektedir. Son iki madde, çalışmada "yüzde 5 koruma değeri" kuralı olarak isimlendirilir. Bu şarta göre oranlardan biri, diğerinin tam katındaki ± % 5'lik dilim içinde yer alamaz. Örnek olarak yüksekliğin 1 olarak kabul edilmesi, 2 sayısını tam katı haline getirir ve diğer oranlar 2 ± 0.1'lik aralığında olamaz. Bu durum aynı şekilde uzunluk eksenindeki 3 ± 0.15 aralığı için de geçerlidir.

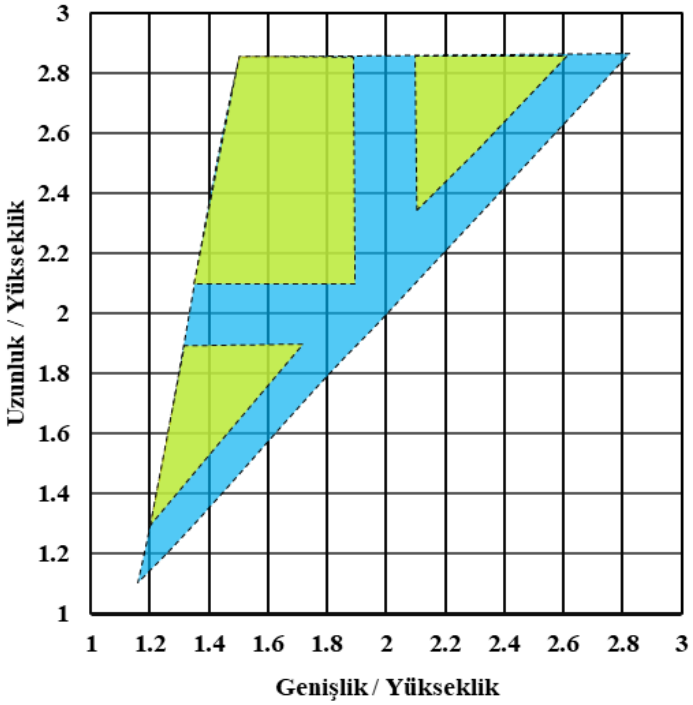
Oda oranları arasındaki ilişkilerle ilgili şartları içeren bir başka çalışma; dinleme, kontrol odaları, ses sistemleri ve haberleşme ile ilgili önerilerin sunulduğu IEC 60268 standardıdır. Bu standart kapsamında sunulan şartlar Denklem 26'da listelenmiştir (aktaran Cox, D'Antonio ve Avis, 2004:642).

- $S_W \leq S_L \leq (4.5\ S_W - 4)$
- $W < 3H,\ L < 3H$

S_w: Genişlik yükseklik oranı
S_L: Uzunluk yükseklik oranı
W: Genişlik (m)
L: Uzunluk (m)

(26)

IEC standardı ve EBU önerileri, yüzde 5 koruma şartı ve sınırlayıcılığı en fazla olan ilk maddelerdeki belirli katsayılar haricinde birbirine yakın optimum bölgeleri işaret eder. EBU ve IEC optimum oda oranları bölgeleri Şekil 14'te sunulmuştur.



Şekil 14- EBU (sarı) ve IEC (mavi) optimum oda oranları bölgeleri

3.2.2 Modal Frekansların Değerlendirilmesi

Hacim akustiği, genel olarak belirli frekanslardaki enerji varlığının arttırılması veya enerjinin kontrolü ile ilgili işlemleri içerir. Dalga boylarının kısa olması sebebiyle tiz frekansların kontrolü kolaydır. Bas frekanslar, yüksek dalga boyları sebebiyle yüksek enerji içerirler ve kontrolü zor büyüklüklerle karşılaşılır. Optimum oda oranları, hacim akustiği süreçleri öncesinde kontrolü sağlanacak parametrelerin daha az büyüklüklerle var olmasını, paralel duvarlardan ötürü dezavantajlı bir form olan dikdörtgen kesitli modellerdeki akustik bozulma etkilerini en aza indirgemeyi sağlar. Tüm bu yapılan çalışmalarda bazı oda oranları, bas frekans bölgesindeki sağladığı az değişkenlik özelliğiyle en işlevsel olarak belirlenmiştir.

Üç metre yüksekliğinde 1:1.4:1.9 oda oranındaki bir model, 4.2 m genişliğinde ve 5.7 m uzunluğundadır. Denklem 23, bu model uzunlukları için uygulandığında Tablo 4'teki sonuçlara ulaşılır.

Tablo 4- Örnek bir modeldeki eksenel modal frekans spektrumu

Eksen katsayıları	Eksenel Frekanslar (Hz)
1-0-0	30.09 Hz
0-1-0	40.83 Hz
0-0-1	57.17 Hz
2-0-0	60.18 Hz
0-2-0	81.67 Hz
3-0-0	90.26 Hz
0-0-2	114.33 Hz
4-0-0	120.35 Hz
0-3-0	122.50 Hz

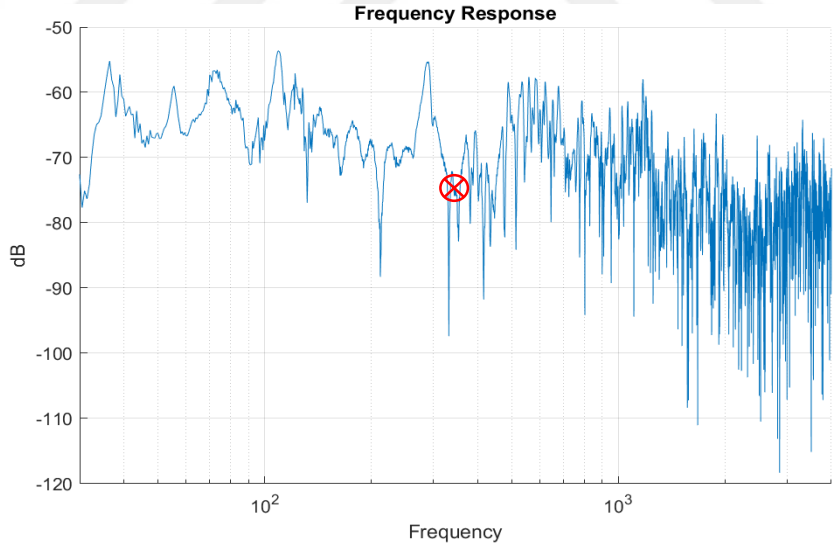
Tablo 4 incelendiğinde uzunluk ve genişlik eksenlerindeki temel eksenel frekanslar (1-0-0 ve 0-1-0) arasında büyük olanın % 26'sı kadar bir fark mevcuttur. Bas frekans bölgesindeki bu özellik, bir oda oranını optimum kılan ilk özelliklerden biri olarak sunulabilir. Spektrumun geri kalanı incelendiğinde iki eksenel frekansın istenmeyecek ölçüde birbirine yakın oluştuğu değerler, 120.35 ve 122.5 Hz frekanslarıdır. Uzunluk ve genişlik eksenlerindeki iki farklı temel frekans değeri, farklı harmonik katsayılarda birbirine yakın değerler almıştır. Tüm oda oranları değerlendirmelerinde bu şekilde bir yakınlık istenmezken, kümelenmelerin daha fazla yaşandığı olumsuz oda oranları mevcuttur. Hacim akustiği aşamalarında yüksek enerji varlığı yaşanan bölgelerin az olması, tasarım açısından panel tasarımlarını tek bir sayısal hedefe yönlendireceği için tasarım kolaylığı sağlar. Bu sebeple optimum oda oranlarının seçilmesi çok büyük bir önem taşır.

Bir odanın genel spektrumu incelendiğinde büyük enerji bölgelerinin ve lokal olmayan düze yakın enerji görünümlerinin art arda dizildiği iki farklı alan göze çarpar. Odadaki çınlama, bu iki farklı bölge arasındaki geçiş frekans değerinin konumunu daha tiz bir seviyeye yükseltir. Bu değeri belirleyen en önemli etken oda hacmi olsa da aynı hacimdeki toplam yansıtıcılık değerleri modal frekans kontrolünün etkin olması gerektiği aralığı değiştirir. Bu geçiş değeri, Alman fizikçi Manfred R. Schroeder tarafından keşfedilmiş olup *Schroeder* frekansı olarak isimlendirilmiştir (aktaran Howard, Angus, 2013:317). Bir oda için Schroeder frekansı değeri, Denklem 27 ile hesaplanabilir.

$$f_s = 2102 \times \sqrt{RT60/V} \qquad (27)$$

f_s: Schroeder Frekansı (Hz)
RT60: Çınlama süresi (s)
V: Oda hacmi (m^3)

Denklem 27'de de görüleceği gibi Schroeder frekansı, odadaki genel ses sönümlenebilirliğini ifade eden çınlama süresiyle doğru orantılı, oda hacmiyle ise ters orantılıdır. Buradan yola çıkılarak aynı hacim ve boyutlardaki iki modelde çınlama süresi fazla olanın daha etkin bir bas frekans kontrolü gerektirdiği sonucuna ulaşılabilir. Örnek bir modeldeki frekans tepkisi üzerinde Schroeder frekansı konumu Şekil 15'te frekans tepkisi üzerinden gösterilmiştir. Frekans tepkisi, 2:5.3:3 m boyutlarındaki (W:L:H) bir müzik prova odasından gerçek ölçümlemeyle elde edilmiştir (Durmaz, Işıkhan ve Karaman, 2021). Burada yaklaşık 32 m^3 oda hacmi ve 0.9 s çınlama süresi ile yaklaşık 330 Hz değerlerinde Schroeder geçişi gözlemlenmiştir. Geçiş frekansından önceki ses basıncı seviyeleri daha fazladır; daha tiz frekans gruplarındaki ses basıncı seviyeleri azalma göstermiştir.



Şekil 15- Örnek bir modeldeki frekans tepkisi üzerinde Schroeder frekansı konumu (kırmızı işaret ile)

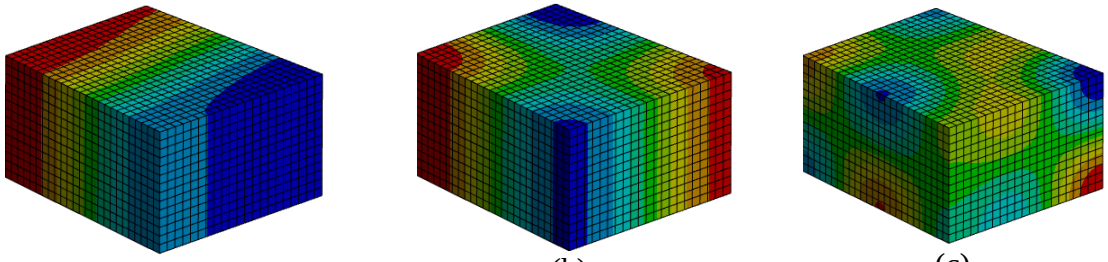
3.3 Dikdörtgen Olmayan Odalarda Modal Spektrum Analizi

Dikdörtgen olmayan odalar, paralel duvarlardan kaynaklanan bazı akustik kusurların önlenmesi için tasarlanmaktadır. Bu odalarda yüzeye gelen ses dalgalarının aynı doğrultuda dönmemesi ve oda içerisinde tek bir noktada odaklanma yaratmaması

için duvarlarda açısallık sağlanır. Böylece, oda içerisinde sesin daha homojen yayılması mümkün olabilir. Dikdörtgen odalardaki duvarlar arasındaki kısa mesafelerden kaynaklanan bu oluşumlara *flutter echo* denir. Yankıların daha uzun sönümlenme sürelerine sahip olmasının aksine, flutter echo sorununun gözlemlendiği frekans değerlerinde sönümlenme süreleri daha kısadır, ancak ses üretimleri ardışık olarak tekrarlanır. Yüzeylerde saçıcı malzemelerin kullanımı, duvarlardaki açısallıkla aynı işlevi görebilir. Emici malzemeler etkin olacağı frekansta odaya tekrar gönderilecek enerjiyi azaltabilir (Everest, 2001:304).

Açısallık, küçük odalardaki flutter echo sorununu önlemek için geliştirilen bir mimari uygulama olduğu için modal frekans analizinde de çeşitli yaklaşımlar gelişmiştir. Şekil 15'teki gibi bir gerçek ölçümleme, mimari form fark etmeksizin her türlü modelde gerçek akustik durumu yansıtabilir. Ancak, çoğu durumda oda inşa edilmeden farklı mimari form ve malzemeleri içeren yapılandırmaların denenmesi ve bu yapılardan birinin seçilmesi istenir. Literatürde bununla ilgili çeşitli benzetim çalışmaları denenmiş ve programlaştırılmış; dikdörtgen odalar için Rayleigh denklemi gibi araçlar oda akustiğinin tahmini ile ilgili önemli rol oynamıştır.

Dikdörtgen olmayan odalardaki akustiğin analizi için literatürdeki en önemli çalışmalardan biri Van Nieuwland ve Weber tarafından çınlama odalarında gerçekleştirilmiştir. Aynı yüzey alanlı dikdörtgen ve dikdörtgen olmayan odalardaki modal frekanslar listelenmiş ve oda içerisindeki basınç bölgeleri görselleştirilmiştir (aktaran Ballou, 2008:133). Dikey basınç bölgelerinin açılandırılmış odalarda daha düzensiz ve asimetrik bir görünümde oluştuğu sonucuna ulaşılmıştır. Modal spektrum karşılaştırmalarında temel eksenel frekanslarda azalmalar gözlenirken harmoniklerde bazı frekans değerlerin 1 - 4 Hz aralığında artabileceği örnekler izlenmiştir. Buradaki en genel sonuç, modal bileşen aralıklarının değişmediği ancak oda içerisinde daha düzensiz bir basınç dağılımı elde edildiği yönündedir. Açılandırılmış odalardaki ses basıncı görünümleri Şekil 16'da gösterilmiştir.



(a) (b) (c)

Şekil 16- Açılandırılmış odalardaki ses basıncı görünümleri, eksenel mod (a), teğetsel mod (b), eğik mod (c)

Jens Holger Rindel, açısallığın 1° – 20° aralığında değiştiği, oda formundaki modal frekanslara ait çınlama sürelerini izlediği çalışmada, açılandırmayla birlikte eksenel frekanslardaki enerjinin teğetsel ve eğik modlara aktarıldığı sonucuna ulaşmıştır. Burada bas frekanslardaki enerji kontrolünün zorluğu yine etkisini gösterir çünkü daha tiz eksenel frekanslardaki çınlama süreleri daha çok azalma gösterir. En az 5° açılandırmalar, 300 Hz ve üstündeki frekanslardaki çınlama sürelerini dikdörtgen modele göre yarı yarıya azaltır bu da *flutter echo* probleminin giderilmesinde etkilidir. Temel frekansın en düşük ve bas frekans bölgesinde olduğu eksen, uzunluk ekseni olduğu için bu eksendeki paralelliğin kırılması önerilmektedir (Rindel, 2015:1220).

Dikdörtgen olmayan odalarda modal spektrum analizi için kenar ortalamalarının alınması, eksen uzunluklarının tek değere indirgenmesi önerilmektedir (Winer, 2012: 473). Böylece Rayleigh Denklemi, yamuk formlar için de kullanılabilir hale gelmiştir. Eşit hacim ve kenar ortalama değerli dikdörtgen ve yamuk modellerdeki modal spektrum yakınlığı, her iki model için de uygulanan FEM analizleri üzerinden incelenebilir (Durmaz, Zerafet, 2022:59).

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

MÜZİK PROVA ODALARI

4.1 Müzik Prova Odaları Genel Özellikleri

Bir eğitim kurumunda müzik eğitimi alan öğrencilerin tek başına veya eğitmenleri ile çalıştıkları, bir kültür kompleksinde orkestra üyelerinin çalgılarıyla, tek ya da küçük gruplar halinde müzik eserlerini etüt edip performans öncesi ısınıp hazırlandıkları mekânlar prova odalarıdır. Eğitmen, müzisyenin artikülasyon, ritim yapısı, eser türü, estetik konsepti vb. müzikal dinamikleri ne ölçüde gerçekleştirdiğine yönelik izlenimlerini ve değerlendirmelerini akustik bir ortamda işitsel ve algısal bir yolla yapar. Akustik tasarım uygulanmamış bir müzik prova odası; küçük hacimli, dikdörtgen, içinde müzisyenin postürünü izleyebileceği bir ayna, değişken akustik olanaklar sağlamak üzere bir perde içeren, genellikle beton malzeme ağırlıklı bir mekân olarak tanımlanabilir (Cox, D'Antonio, 2016: 39). Böyle bir odada sadece öğrencinin performansı ve çalgısının ton dengesinden öte odanın akustik bozulma etkileri de duyulur. Duyumda iki farklı etken mevcuttur. Bunlardan biri oda şekli, boyutları, hacmi gibi ses üzerinde büyük etkisi bulunan, odadaki sesin orijin niteliğini belirleyen yapı özellikleridir. Bir diğer etken akustik düzenlemedir ve bir dizi analiz sonucu konulan teşhise göre sesin nasıl manipüle edileceğine ilişkin aşamaları kapsar.

Müzik eğitim kurumları konsept gereği dikdörtgen ve küçük hacimli odaların bir bütünü olarak özel tasarlanmış veya mevcut olan hacimlere uyarlanmış yapılardır. Sanat merkezleri, büyük hacimli konser salonlarının aksine daha küçük prova odalarına sahiptir. Öncelikli çalışmaların büyük konser salonlarının akustik koşullarında gerçekleşecek performanslara yönelik olduğu unutulmamalıdır. Büyük konser salonlarında daha uzun çınlama süreli, psikoakustik açıdan daha dolgun bir duyum elde edilecektir. Müzisyen prova esnasında küçük hacmin getirisi olan kuru ve zayıf duyumu istemez, eğitmen ise performanstaki detayları belirginleştirecek ölçüde bir kuruluk bekler. Bu sebeple optimum çınlama süresi bu iki beklentiyi karşılayacak derecede ortalama bir değerde olmalıdır. Bu yaklaşım, konser salonlarındaki 1.6 ve 2.2 s arasında değişen çınlama sürelerinin bu odalarda gerçekleştirilemeyeceği sonucunu destekler.

Müzik prova odalarındaki sınıflandırmalar genel olarak hacim ve müzisyen sayısı üzerinden yürütülür. Bireysel ve grup prova odaları arasındaki ilişki doğru

orantılıdır; orkestra büyüklüğü arttıkça hacim değerleri de artmalıdır. Daha güncel çalışmaların sonuçlarını içeren NS8178 (son şekliyle ISO-23591) standardı bu temel yaklaşımı da koruyarak müzik türlerini *düşük, yüksek ses seviyeli* ve *elektronik olarak güçlendirilmiş* şeklinde üçe ayırmıştır.

4.2 Hacim ve Akustik Parametre İlişkileri

Küçük hacimli odalar akustik bozulma risklerini de beraberinde getirir. Örneğin, bireysel piyano çalışma işlevli bir oda olabildiğince küçük hacimde tasarlanmalıdır. Bunun sebebi sınırlı bir yerleşim alanında daha fazla öğrencinin aynı anda ve birbirinden izole olarak çalışmalarını yürütebilmesine olanak sağlamaktır. Böyle bir yaklaşım, mimari tasarım aşamasında zorluklar getirecektir. 30 - 50 m^3 hacim içerisinde seste istenmeyen değişimler kaçınılmazdır. Küçük odalardaki akustik bozulma etkileri ikinci bölümde aktarıldığı gibi *coloration* (renklendirme) ve *flutter echo* (çarpıntılı/tekrarlı eko) olarak gruplandırılmıştır. Bu akustik bozulmalar, farklı frekans gruplarındaki çınlama sürelerinin kontrolleriyle en aza indirgenebilir.

1955 yılında Lane ve Mikeska tarafından yürütülen çalışmalar ortalama 0.4 – 0.5 s çınlama değerlerini önerir. Literatürde, müzik prova odaları frekans spektrumu için en genel kabul, bas frekanslardaki kontrollü artıştır. Bu çalışma aynı yaklaşım doğrultusunda 100 Hz değerinde 0.6 – 0.7 s değerlerine varan enerji artışlarını kabul eder (aktaran Osman, 2010:3).

Department for Education – DfE çınlama süreleriyle ilgili sınırlandırılmaları *Acoustic Design of Schools: performance standards – Building Bulletin 93* ismiyle ilk olarak 2003 yılında düzenlemiş ve müzik prova odalarını da bu kapsamda standarda dâhil etmiştir. Değerler 1/3 oktav bant filtrelenmiş analizler için 400 – 2,5 kHz, 1/1 oktav bant filtreler için 500 ve 2k Hz değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. 2015 yılında tekrar güncellenen bu çalışma, prova grup odalarını 30 m^3 geçiş değeriyle sınıflandırır; daha küçük hacimlerde 0.6 – 0.8 s aralığı, büyük hacimlerde 0.8 - 1 s aralığını önerir (Bodkin, Daniels, 2015:33).

14-30 m^3 hacim değerli odalar için ANSI S12.60 0.6'dan küçük değerleri, AS2107 standardı 0.7 – 0.9 aralığını, OCPS standardı ise 0.5'ten az değerleri önerir (aktaran Osman, 2010:3).

Her bir çalgı veya çalgı grubu, kendilerine özgü ve en önemli değişkenlerden olan zarf tepkilerindeki farklılıklardan dolayı farklı bir RT aralığında çalışılmaya elverişlidir. Çalgı gruplarındaki optimum RT aralıkları Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5- Çalgı gruplarındaki optimum RT aralıkları (aktaran Osman, 2010:4)

Çalgı Grubu	**Optimum RT Aralığı (10 m^3 – 100 m^3)**
Perküsyon Grubu	0.3 – 0.5
Yaylı Çalgılar	0.6 – 0.9
Üflemeli Çalgılar	0.4 – 0.7

4.3 Ses Yüksekliği ve Akustik Parametre İlişkileri

Aynı ses kaynağı farklı odalarda farklı ses yüksekliklerinde duyulabilir. Bu gözlem, her bir odanın ses seviyesindeki etkisinin farklı, ölçülebilir ve kıyaslanabilir olduğuna işaret eder. Müzik prova odaları ve büyük konser salonlarındaki çınlama duyumunun aynı olması mümkün değildir.

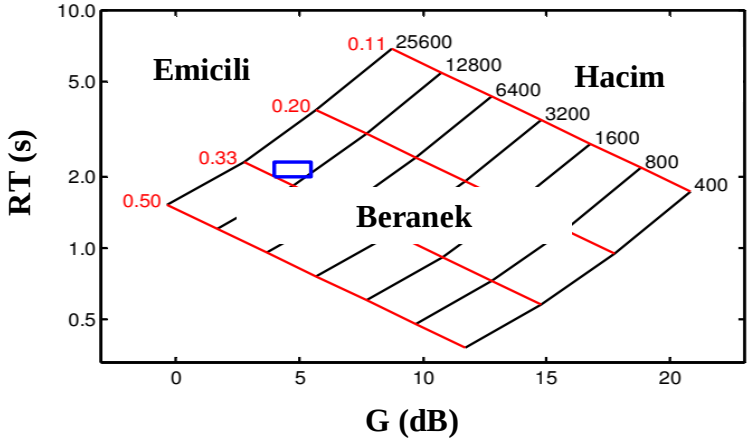
Hacim akustiğinde çınlama süresi ve oda hacmi ses yüksekliğini etkileyen en önemli iki faktördür. Ses yüksekliklerindeki farklılıklar bu kapsamda yürütülen çalışmaları da önemli kılmıştır. Örneğin, *Musikvereinsaal Wien* salonu, *Berlin Phillharmonie* salonundan 3 dB daha fazla emilim sağlar. Bu durumda, aynı ses seviyesinin sağlanabilmesi için çalgıların güç seviyesinin 2 katına çıkması gerekir (Meyer, 2009:350). Bu, prova sürecindeki verimliliği olumsuz yönde etkiler. Çınlama süresi ve odanın hacmi, ses kaynağı gücünü Denklem 28'deki gibi etkileyerek oda içerisindeki her noktada aynı varsayılan tek ses yüksekliği değerini verir (Meyer, 2009:191).

$$L_P = L_W - 10\log\left(V/V_0\right) + 10\log\left(T/T_0\right) + 14 \text{ dB} \quad (28)$$

Lp: Odadaki ses yüksekliği
Lw: Kaynağın ses gücü (s)
V: Oda hacmi (m^3)
T: Çınlama süresi
V_0: 1 m^3
T_0: 1 s

Denklem 28'deki L_w parametresinden sonraki işlem grubu "oda sönümleme indeksi" parametresini verir. Bu durumda her bir oda artan hacim değeriyle azalan, çınlama süresi arttıkça artan bir oda sönümleme indeksine sahiptir (Meyer, 2009:192). Bu değer, mekânları birbiriyle kıyaslarken kullanılabilir ancak aynı oda içerisindeki farklı konumlar için ikinci bölümde aktarılan G parametresi daha büyük bir işlevsellik sağlar. G parametresinin, kaynak ve 10 m ötedeki alıcı konumlarındaki direkt ses etkilerini yok ederek çınlama bölgesindeki (oda etkilerinin gözüktüğü dürtü tepkisi bölgesindeki) kazanç faktörünü verdiği göz önüne alındığında, oda sönümleme indeksi gibi kaynak ve direkt sesten bağımsız, odaya özgü bir parametre olduğu anlaşılır.

Beranek, uygun RT - G ilişkisini 2 – 2.3 s ve 4 – 5.5 dB olarak tanımlamıştır (aktaran Nijs, Vries, 2005:230). Bu değerler hacim parametresinde yaklaşık olarak 16.000 m^3 bölgesine karşılık gelir. RT-G-V-α grafiğinde Beranek dikdörtgeni konumu Şekil 17'deki çok boyutlu grafik üzerinden incelenebilir.



Şekil 17- RT-G-V-α grafiğinde Beranek dikdörtgeni (aktaran Nijs, Vries, 2005:230)

Barron, RT-G ilişkisi için tüm hacim değerlerini kapsayıcı bir ilişki önermiştir. Bu matematiksel ilişki, RT-V eksenlerinde kurulmuş olup, Cremer-Müller çalışması

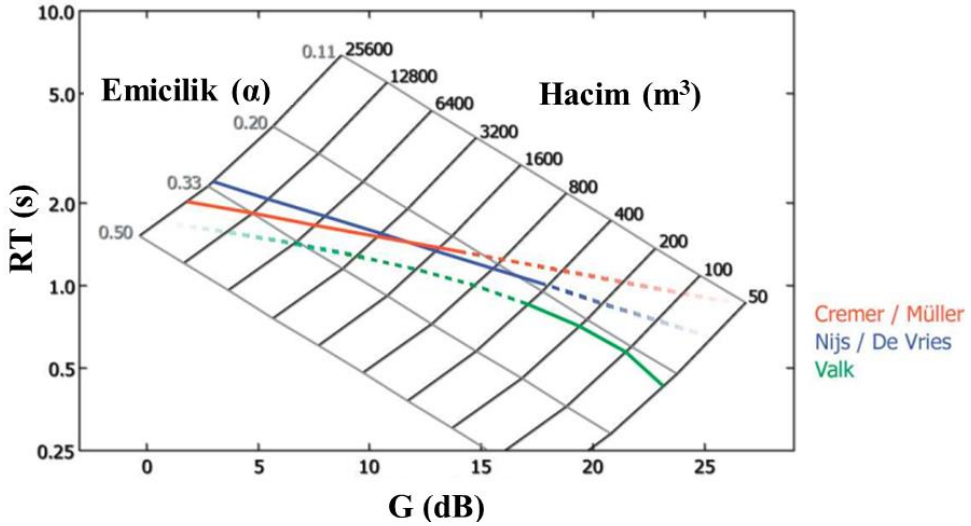
temel alınarak, dünyaca ünlü ve akustik açıdan uygun salon örneklerine yakınsamıştır (aktaran Nijs, Vries, 2005:230). Bu matematiksel ilişkinin Beranek dikdörtgenini optimum nokta olarak göstermemesi ve daha düşük hacim değerlerinde yapılan değer kestirimlerinde çok az emicilik gerektiriyor olmasından ötürü Nijs ve De Vries farklı katsayılarla denklemi yeniden düzenlemiştir. Barron'un kurduğu ilişki Denklem 29a'da; Nijs ve De Vries'in düzenlemesi Denklem 29b'de gösterilmiştir (Nijs, Vries, 2005:230).

$$\log RT = 0.138 \times \log V - 0.306 \quad \text{(a)}$$

$$\log RT = 0.21 \times \log V - 0.55 \quad \text{(b)}$$

RT: Çınlama süresi (s)
V: Oda hacmi (m^3) (29)

Nijs, Heringa ve Valk tarafından yürütülen bir diğer çalışmada RT-V ilişkisi bir başka formda düzenlenmiş olup güncel standartlardaki küçük prova odalarına yönelik G sınırlamalarının temelini oluşturmuştur (aktaran Rindel, 2014:11). Şekil 18 incelendiğinde kesiksiz çizgiler yapılan çalışmaların hacim aralıklarını; kesikli çizgiler ise bu sonuçların diğer bölgelerdeki ekstrapolasyon analizlerini göstermektedir. Farklı çalışmalardaki sonuçların düşük ve büyük hacimlerdeki ekstrapolasyonları Şekil 18'de gösterilmiştir.

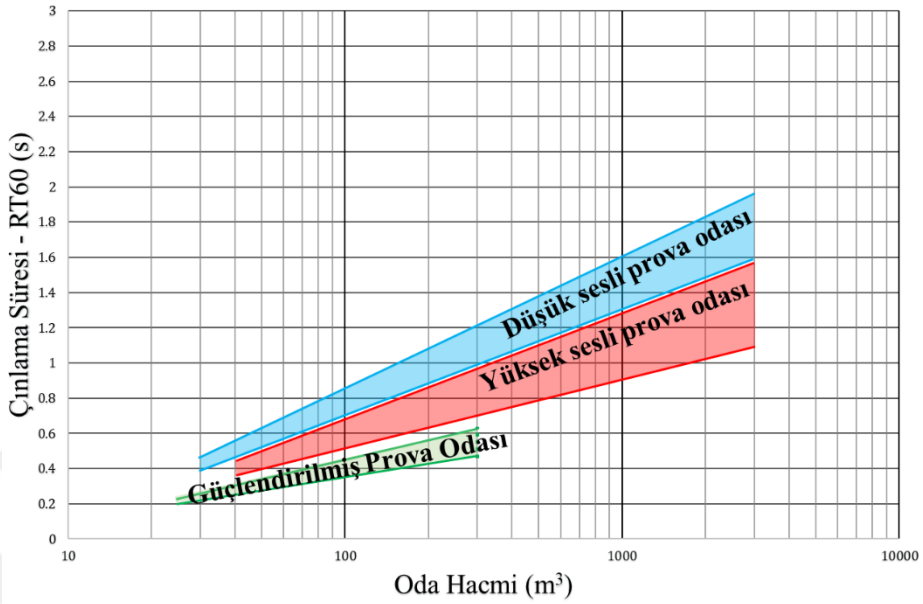


Şekil 18- Farklı çalışmalardaki sonuçların düşük ve büyük hacimlerdeki ekstrapolasyonları (Heringa, Isbrücker ve Valk, 2009:4)

4.3.1 NS8178 Kapsamındaki İlk Yaklaşımlar

Rindel, *Norwegian Standard 8178* (NS8178) kapsamında yürüttüğü çalışmalarda çalgıları bireysel olarak veya grup senaryoları ile bir araya getirerek her oda için daha planlı ve kapsamlı tasarım yöntemleri sunmuştur. Bu yöntemler literatürdeki çeşitli çalışmalarda son halini alarak ISO 23591 standardına kaynak olmuştur. Standardın temel amacı; her bir oda için özelleştirilen çalgı gruplarının (oturtum) ihtiyaç duyduğu G değerlerini sunan diğer tüm akustik parametre ve koşulları hazırlamaktır. Zaman parametreleri, odadaki o frekansa ait enerjinin uzunluğu hakkında değerler sunar. Bu sebeple zaman ve enerji parametreleri birbirinden bağımsız olarak değerlendirilemez. Denklem 7 ve 14 birlikte değerlendirildiğinde, bir hacimdeki ortalama emicilik katsayısı, çınlama süresi ve G enerji parametresi arasındaki ilişki bulunabilir. Emicilik katsayısındaki artış, odadaki RT ve G değerlerinde azalmaya sebep olmaktadır. Bu durum, çınlamanın sesin daha gür algılanmasına sebep olduğu gerçeğini teorik olarak destekler.

NS8178, ses kaynağının forte performanstaki güç değerleri için birinci bölümde aktarılan ses gücü faktörü hesaplama yöntemlerini kullanır. Mimari tasarım aşamasında odaların bireysel veya kaçar kişilik grup odası olacağı, hangi çalgılara yönelik hizmet vereceği ve içinde prova edilecek müzik türü için önerilerin ne olduğu belirlenmelidir. Müzik tipleri bu standart kapsamında düşük, yüksek ses seviyeli ve elektronik olarak güçlendirilmiş şeklinde üç başlıkta sınıflandırılmıştır (NS8178, 2014:3). Denklem 29'daki a ve b katsayıları her bir müzik türü için belirlenmiştir. NS8178 RT-V ilişkisi Şekil 19'da gösterilmiştir.



Şekil 19- NS8178 RT-V ilişkisi (NS8178, 2014:14)

RT–V ilişkisi yorumlandığında yüksek ses seviyelerinin düşük RT gerektirdiği görülür. RT ekseninde değerler arttıkça ses yüksekliği azalmaktadır. Bu durum aynı zamanda ihtiyaç duyulan kazanç (G) değerinin azalmasından kaynaklanır. Aynı durum, bir orkestranın aynı eseri daha küçük hacimli bir salonda icra ettikleri durumda RT ve G parametrelerinin azalması gerektiği gerçeğiyle de örtüşür (Njis, Vries, 2005:230).

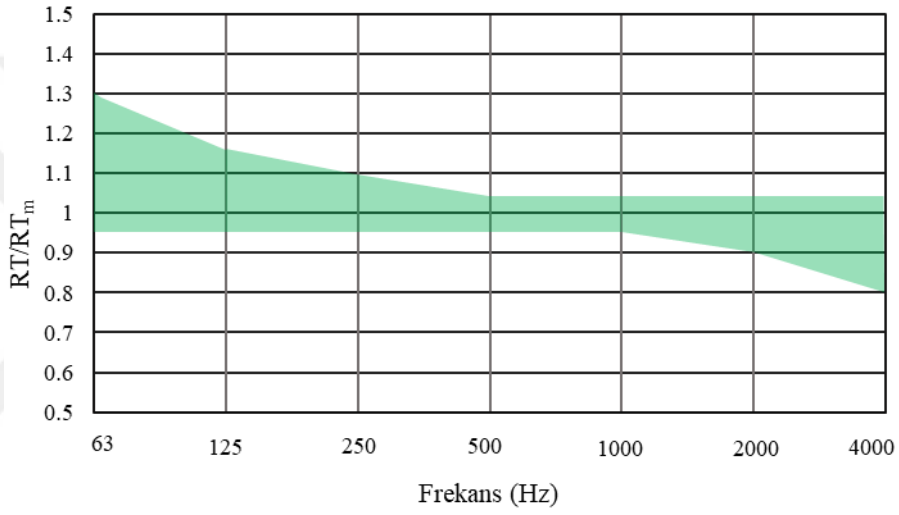
Müzisyen, ses seviyelerinde odanın aşırı azaltıcı etkilerini yaşamak istemez. Bu zaman zaman müzisyenin çalgısına gereğinden fazla güç uygulamasına sebep olabilir. Bu yüzden 85-90 dB olması gereken forte performans, oda etkisinden sonra da bu aralıkta kendisini göstermelidir. NS8178, her konfigürasyonun ihtiyaç duyduğu alt ve üst G değerlerini; 85-90 dB aralığını ve orkestranın toplam güç değerini birlikte değerlendirerek aritmetik işlemlerle hesaplar. Bu ilişki Denklem 30'da gösterilmiştir. Orkestranın toplam güç değeri, Denklem 5'in ilgili çalgı seçimlerindeki çıktısıdır.

$$G_{min} = 85 - L_{w,total} + 31$$

$$G_{max} = 90 - L_{w,total} + 31$$

G: Kazanç parametresi
$L_{w,total}$: Kaynağın ses gücü (s) (30)

NS8178, artan müzisyen sayısıyla birlikte daha büyük hacim değerlerini önerir. Küçük odalardaki akustik bozulma risklerinden ötürü paralel duvarlarda en az 7° açılandırma ve ideal oda oranlarından birinin seçilmesi önerilmektedir (NS8178, 2014:11). Bas ve tiz frekanslardaki RT dengesizliği belirli oranlar (RT/RT_m) dahilinde ortadan kaldırılır. Düşük ve yüksek ses seviyeli odalarda optimum RT oran bölgesi Şekil 20'de gösterilmiştir.



Şekil 20- Düşük ve yüksek ses seviyeli odalarda optimum RT oran bölgesi (yeşil alan), (NS8178, 2014:15)

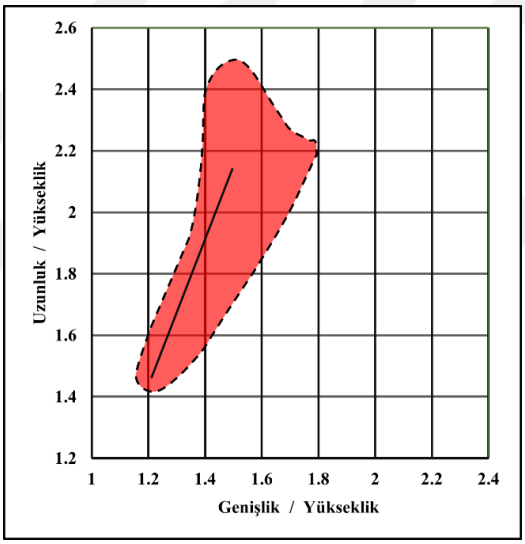
Grafikteki yeşil bölge, 500 ve 1000 Hz değerlerinin ortalamasına (RT_m) göre korunması gereken oran aralığını gösterir. Spektrum psikoakustik açıdan incelendiğinde sıcak bir duyum hedeflendiği anlaşılmaktadır. Özellikle orta frekanslarda dengeli ve az sapmalı bir frekans spektrumu önerilmektedir. Tiz frekanslardaki azalmalar, sesteki aşırı parlaklıkların önlendiğini gösterir.

4.3.2 ISO 23591 Standardındaki Güncel Yaklaşımlar

NS8178'in kolektif katkı ve değerlendirmelerle güncellendiği ilk versiyonu olan ISO 23591, 2021 yılında yürürlüğe girerek farklı yaklaşım ve formülleri müzik prova odası tasarım önerilerine dâhil eder. NS8178'den en önemli farkı Valk ve Njis tarafından ortaya atılan alogV+b şeklindeki optimum RT-G denklemlerindeki a ve b katsayılarının

her bir ses yüksekliği grubuna göre tekrar üretilmiş olmasıdır (Rindel, 2021:16). Bu katsayılar düşük ve yüksek seviyeli müzik prova odalarını Şekil 19'da olduğu gibi kesişimsiz bir sınırla ayırmamakta, iç içe geçerek hacimle birlikte artan bir kesişim bölgesi oluşturmaktadır. Standarttaki bir diğer fark ise Şekil 20'de sunulan RT_m oran grafiğinin özellikle 63 Hz, 125 Hz, 4 kHz ve 8 kHz'deki sınır değerlerinde alt ve üst bölgede kısmen genişlemesidir.

ISO 23591 standardı küçük oda oranlarını 1. derece polinom ifadesi olarak sunar. Optimum oda oranları çizgisinin Bolt alanındaki konumu Şekil 21'de gösterilmiştir.



Şekil 21- Optimum oda oranları çizgisinin Bolt alanındaki konumu (kırmızı)

4.4 Müzik Prova Odalarındaki Akustik Düzenleme

Müzik prova odalarındaki yapı elemanları, beton veya ahşap bir zemin, yığma veya alçıpan bir duvar, alçıpan veya beton *soffit* yapıda bir tavan olabilir (Osman, 2010: 6). Müzik prova odalarındaki akustik nitelikler kapsamında kontrol altına alınması gereken problemler gürlük, modal frekanslardaki renklendirme ve *flutter echo* olarak sıralanabilir. Müzisyen sayısı arttıkça gürlük sorunu daha çok işlem gerektiren bir hal alabilir ve grup içi birbirini duymaya zorlaştıran maskeleme etkileri daha çok artabilir. Grup çalışmalarında gürlük kontrolündeki ilk avantaj hacimdeki artışlardır. Bireysel çalışmaların gerçekleştiği odalar ise modal frekans ve *flutter echo* sorununun kontrolünü daha önemli kılar.

4.4.1 Müzisyen Değerlendirmeleri

Müzik prova odalarındaki beklentiyi farklı çalgı grupları için sıralamak adına *Alman Federal Eğitim ve Araştırma Bakanlığı* tarafından finanse edilen bir çalışmada değişken akustik elemanların da yer aldığı mekânlarda anket çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çınlama değerlendirmelerinde bireysel müzisyenlerin daha kuru; solist gibi grup üyelerinin de daha çınlamalı odaları benimsediği sonucuna ulaşılmıştır. Grup değerlendirmelerinde yaylı çalgılar ve piyanonun zor duyulan, üflemeli çalgıların sesi bastıran nitelikte olduğu çoğunluk tarafından kabul edilmiştir. İdeal ve gerçek arasındaki karşılaştırmalardaki en belirgin beklentiler müzik prova odalarının daha sessiz, parlak, belirgin, sıcak, odaklanmış, doğal, arka plan sesi olmadan ses üretim becerisidir. Üflemeli çalgılar daha az oda sönümlemesi isterken birden fazla çalgıda eğitim alanlar ± 0.3 s aralığında değişken akustik ortamın yaratılmasını ideal bir seçenek olarak tanımlamıştır. Yürütülen anket değerlendirmelerinde tutarlı olmayan bazı sonuçlar değişken akustiği daha gerekli kılmıştır (Knöfel, Weisheit and Troge, 2018:2187).

Wenzke ve Agren tarafından yürütülen çalışmalarda aynı üç eser, üç farklı akustik özellikteki odada çalınmıştır. Bu çalışmada trampete yerleştirilmiş bir ivme ölçerdeki voltaj verileri analiz edilerek farklı çınlama özelliklerinin dinamikler ve tempo takibindeki etkileri analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda katılımcıların çınlamasız odalarda daha büyük ortalama güç değerleri ürettiği, çınlamalı odalardaki temponun azaldığı gibi sonuçlar okunmuştur (Ågren, Wenzke, 2017:39). Yapılan görüşmeler katılımcıların özellikle yankısız odayı iyi bir duyumdan ziyade daha yüksek seviyede duymak adına işlevsel bulduklarını göstermektedir. Anket ve parametre değerleri arasındaki ilişki incelendiğinde standart dışında bir oda olan 31 m^3 hacminde yapılan değerlendirmelerde 4 müzisyenin yarısı odayı uygun bulmuştur (Ågren, Wenzke, 2017:35).

Trevor Cox ve Peter D'Antonio akustik tasarım öncesi ve sonrası frekans tepki grafiklerinin ölçüldüğü küçük hacimli bir odada aynı zamanda müzisyenlerin de görüşlerini almıştır. Bu yöntemle akustik tasarım elemanı ve müzisyenin algısı arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmanın gerçekleştiği odada akustik tasarım öncesi

cüruf blok duvarları, beton bir zemin, alçıpana yapıştırılmış akustik tavanı ve değişken akustik sağlayan bir perde bulunmaktadır. Akustik tasarım sürecinde ise odaya yarım küre saçıcı difüzörü, duvara monte hibrit bir yüzey ile akustik beton duvar bloğu (*masonry*) elemanları eklenmiştir. Akustik duvar bloğu modal frekanslarda daha düz bir frekans tepkisi sağlarken, tavan difüzörü daha dağınık bir ses ortamı üreterek ton algısını geliştirmiştir. Hibrit yüzey ise orta frekansta emicilik sağlarken müzisyenlerin ihtiyaç duyduğu artikülasyon kontrolünde destek sağlamıştır (Cox, D'Antonio, 2016: 39).

4.4.2 Farklı Frekans Bölgelerine Yönelik Uygulamalar

Bas frekans kontrolünde akustik paneller, oda boyutlarına özgü temel eksenel frekansa yönelik tasarlanabilir; Helmholtz rezonatörleri odadaki bas titreşimleri kısmi olarak kendi üzerinden azaltabilir; çok katmanlı derin paneller yan ve arka duvarlara yerleştirilebilir (Long, 2015:747). Bir akustik panelin bas bölgede de kontrol sağlayabilmesi için cam elyafı levhalar panel emicilerin üzerine yerleştirilebilir. Hava ile cam elyafı arasındaki geçişi azaltmak için sıralı üçgen piramit dizisi şeklindeki emiciler kullanılabilir. Kama şeklindeki bu dizi katman kalınlığının, iletilen sesin çeyrek dalga boyuna eşit olduğu bir frekansta çok yüksek bir oranda emicilik sağlanmaktadır (Long, 2015:748).

Helmholtz rezonatörleri, küçük bir odadaki en sorunlu modal frekans değeri hedef alınarak tasarlandığında etkilidir. Parçacık hızının sıfır olduğu yansıtıcı yüzeylerde maksimum basınç değerine sahip olduğundan, içi boş açıklıklar bu yerlere veya bir yüzeyin kenar ve köşelerine yerleştirildiğinde en iyi sonucu verir (Long, 2015:748).

Membran tipi emiciler, Helmholtz rezonatörlerine göre daha yüksek bir bant genişliğinde daha düşük seviyede bir soğurma etkisi gösterir. Helmholtz rezonatörleri, tasarlandıkları rezonans frekansında daha lokal bir soğurma sağlar (Maekawa, Rindel ve Lord, 2010: 101). İkinci bölümde sözü edilen optimum oda oranları, daha az sayıda sorunlu frekans üreteceğinden rezonatörler bu frekanslarda etkin olabilir. Ancak, optimum olmayan oda boyutlarında iki tür emicinin ortak kullanımı daha etkin bir iyileştirme sağlar.

Tiz frekanslardaki emilim için üretilen delikli paneller, kalınlık değerlerinde veya hava katmanındaki artışla 125 ve 250 Hz değerlerinde daha etkin bir hale gelebilir (Maekawa, Rindel ve Lord, 2010: Ekler – Tablo A.2). Delikli panellerin çalışma prensibi, çok sayıda düşük dalga boylu ses dalgalarını soğurabilecek küçük çaplı rezonatörlerin bir araya gelerek tiz frekanslarda yüksek emilim sağlamasıdır.

Bir emici panelin alçıpan veya beton bir yüzey üzerine yerleştirilmesi, saçıcılık ve emiciliği birlikte sağlar. Sadece aynasal yansımanın önlenmesi gerektiği durumlarda QRD (*Quadratic Residue Diffusers*) tipi Schroeder panellerin kullanımı tercih edilebilir (Osman, 2010:7). Oda akustiğinde zaman parametreleri oda içerisinde farklı bölgeler arasında değişkenlik gösterebilir. Kaynağa yakın yüzeylerin içbükey veya dış bükey oluşu belirli noktalarda odaklanmalar yaratabilir; bu noktalarda emicilik gerekirken bazı noktalar için parametre değerleri yetersiz olabilir. Bu sebeple özellikle tavan yüzeylerine yansıtıcı ve açılandırılmış panel yerleşimleri yapılabilir.

4.4.3 Değişken Akustik Yöntemleri

Farklı çalgıların birlikte çalışıldığı odalarda güncel prova odası standartları akustik değerleri uygun bir spektrum üzerinden değerlendirir. Bu özellikle asma panellerin saçıcı-emici olacak şekilde birlikte tasarlanması ve panel sayısı değişiminin mümkün olduğu tasarımlar kullanılarak sağlanır. Daha güncel bir yöntem olan şekil hafızalı alaşımlar (*shape memory alloys*) içeren akıllı materyaller paneldeki hızlı dönüşüm yeteneğiyle değişken akustik ortam yaratır (Knöfel, Weisheit and Troge, 2018:2187). Bu yöntemler tipik değişken akustik özelliği sağlar. Değişken akustiğe sahip odaların bir diğer avantajı müzisyenin farklı koşulları deneyimlemesine imkân sağlamasıdır.

BEŞİNCİ BÖLÜM

ÇALIŞMANIN YÖNTEMİ

Bu çalışmada düşük ses seviyeli klasik müzik amaçlı küçük müzik prova odaları için optimum koşullar araştırılmaktadır. Seçilen modeller, Dokuz Eylül Üniversitesi tarafından sübvanse edilen 2020-KB-FEN-025 numaralı bilimsel araştırma projesi kapsamında incelenen eğitim kurumları örneklerinden sadece Güzel Sanatlar Fakültesi ve Devlet Konservatuvarındaki küçük hacimli etüt ve prova odalarından seçilmiştir (Durmaz, Işıkhan ve Karaman, 2021). Bu mekanlarda yapılan gerçek ölçümlerle, 3D modelleri ODEON simülasyon programına aktarılmıştır. ISO 23591 standardı, hacimlerle ilgili olarak boyutlara, oda geometrisine ve odadaki müzik türüne ilişkin çeşitli sınırlamalar içermektedir. Modellerin standarda göre optimizasyonu, boyut değişiklikleri ve farklı akustik malzemelerin odaya dâhil edilmesiyle gerçekleştirilmiştir.

5.1 Akustik Ölçüm Koşulları

Akustik ölçümler, TS ISO 1996-2, TS EN ISO 3382-1, 2 ve 16283-1 standartları ile ilgili gürültü yönetmeliklerini karşılar. Ölçümlerde *Brüel & Kjaer Type 4292-L, Type 2734, Type 2250, Type 7841 (DIRAC V 6.0), Earthworks M23, Focusrite 2i2 USB ön yükseltici, Dawe* akustik kalibratör, *MacBookPro, iPadAir (5 set)* kullanılmıştır. Ölçümlerden alınan sonuçlar *DIRAC* (V6.0), *MATLAB* 2019a ile analiz edilmiştir. Uyarı sinyali olarak pembe gürültü ve küresel nokta kaynak kullanılmıştır. Ölçüm öncesi ve sonrası ortam ısısı 17-20 derece bağıl nem %37-41 olarak saptanmıştır.

Akustik ölçümlerin yapıldığı MEB ve DEU eğitim kurumlarına bağlı mesleki müzik eğitim bölümlerindeki odalardan tipik dört örnek hacim seçilmiş, bilimsel araştırma projesi kapsamında (Durmaz, Işıkhan ve Karaman, 2021) elde edilmiş ellinin üzerindeki akustik dürtü tepkilerinden (RIR) ilgili ses örnekleri seçilerek bu çalışmaya gereç oluşturulmuştur.

5.2 Dürtü Yanıtı Analizleri

RIR, oda dürtü yanıtları standartlar çerçevesinde analiz edilir, kabul edilebilir değer aralıklarının sağlanmasına özen gösterilir. Oda akustik değerlerinin her bir frekans bandı ve her parametre grubu için tanımlanan fark edilebilir aralıkta (*JND, Just Noticable Difference*) yer alması büyük önem taşır. Çünkü bu aralık haricindeki değerler, insan

kulağı tarafından rahatlıkla fark edilebilir; başka akustik özellikler için yanlış karar ve önlemler alınmasına sebep olabilir. ISO 3382 parametreleri için JND değerleri Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6- ISO 3382 parametreleri için JND değerleri (ISO3382-1, 2010:10)

ISO 3382 Parametresi	Sembol	Fark edilebilir aralık (JND)
Erken düşüş süresi	EDT (s)	5%
Çınlama süresi - 20 dB	T20 (s)	5%
Çınlama Süresi - 30 dB	T30 (s)	5%
Berraklık	C80 (dB)	1 dB
Açıklık	D50	0.05
Ses gücü	G (dB)	1 dB

ISO 3382 standardının filtrelenmemiş ölçüm sinyali üzerinden yapılmasını belirttiği başlangıç zamanı analizi için önerdiği aralık, maksimum değer olan direkt ses bileşeninden en az 20 dB altında son bulur (ISO3382-1, 2010:16). Odeon, örnek noktasını ilk etapta -40 dB olarak varsayar. Öncelikle 10 ms zaman bölütlerini kullanarak gürültü değeri kestirimi gerçekleştirir. Ardından bu değer üzerinden -40 dB başlangıç değerini günceller. Ancak çoğu zaman -40 dB işlevsel bir ilk değer sunar (Christensen, Koutsouris ve Rindel, 2013:10). Ayrıca, Odeon dürtü tepkisi zaman ekseni grafiği üzerinden kullanıcıya yönelik başlangıç noktasını seçtirebilir; böylece istatistiki farklılıklardan kaynaklanabilecek genelleme hataları özel durumlar için engellenmiş olur.

Akustik ölçümlerdeki bir diğer belirsizlik olan gürültü kestirimi yöntemi, Odeon'un ikinci bölümde aktarılan Lundeby yönteminin modifiye edilmiş bir başka versiyonudur ve ISO 3382 standardında belirtildiği gibi her bir frekans bandı özelinde gerçekleşir (Christensen, Koutsouris ve Rindel, 2013:11).

5.3 Simülasyon ve Genetik Optimizasyon

Genetik optimizasyon (GO), ölçülmüş bir modelin parametre sonuçlarını simülasyon sonuçlarına yaklaştırmak amacıyla geliştirilen bir Odeon aracıdır. Ölçüm sonucundaki referans olarak alınması istenen akustik parametre gruplarına ait değerler sisteme girilir. Odeonun simülasyon işlemleri için malzeme seçimleri gerçeğe en yakın örneklerden yapılır. Seçilen tüm malzemelere ait 1/1 oktav bantlardaki α değerleri,

simülasyon ve gerçek ölçüm sonuçları arasındaki fark tamamen azaltılana kadar yazılım aracıyla güncellenir. Bu, farkın referans alınan parametre gruplarındaki JND aralığında olması, akustik tasarımın tüm frekans bantlarda gerçek "Sabine" değerleriyle başlamasına olanak sağlar.

5.4 Boyut Uygunlaştırma

Dördüncü bölümde aktarılan optimum oda oranları polinomu, standartta sunulan hacim sınırlandırmalarıyla ilişkili olarak belirlenmiştir. Polinom denklemine göre, oda oranı ve hacmi bilinen bir odanın yükseklik değeri Denklem 31 ile hesaplanabilir.

$$S_l = 2.36\ S_W - 1.38 \qquad (31)$$

S_l: Uzunluk yükseklik oranı
S_W: Genişlik yükseklik oranı
V: Oda hacmi (m^3)
h: Oda yüksekliği (m)

$$h = \sqrt[3]{V/(S_I * S_W)}$$

$$h = \sqrt[3]{V/((2.36\ S_w - 1.38) * S_w)}$$

Bu çalışmada düşük hacim ve yükseklik değerlerindeki en verimli oda tasarımlarının araştırılması amaçlandığından, denklemin sonucunu ilgili etüt odasının amacı doğrultusundaki en düşük yükseklik limitine eşitlemek doğru bir yol olacaktır. Örnek olarak standarttaki en düşük limit değerleri olan 35 m^3 hacim ve 2.70 m yükseklik için gereken w/h değeri Denklem 32'deki gibi bulunabilir.

$$2.70 = \sqrt[3]{35/((2.36\ S_W^2 - 1.38\ S_W))} \qquad (32)$$

S_W: Genişlik yükseklik oranı

Denklem 32 çözümlendiğinde, kökleri S_{W1} ve S_{W2} olan Denklem 33'te sunulan çift dereceden polinom fonksiyonuna ulaşılmış olunur.

$$2.36\ S_W^2 - 1.38\ S_W - 1.78 = 0 \qquad (33)$$

S_W: Genişlik yükseklik oranı

Bu denklemin köklerini bulmak için Denklem 34'teki matematiksel ilişkilerden faydalanılabilir.

$$a\,x^2+b\,x+c=0 \qquad (34)$$

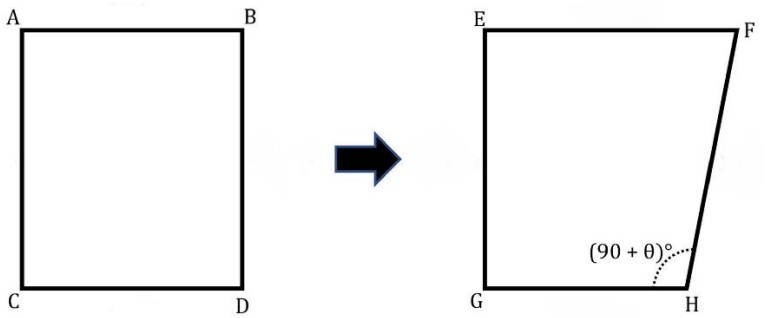
x: Bilinmeyen
x_1: Denklemin 1.kökü
x_2: Denklemin 2.kökü
a, b, c: Denklem katsayıları

$$x_1=\frac{-b+\sqrt{b^2-4ac}}{2a} \qquad x_2=\frac{-b-\sqrt{b^2-4ac}}{2a}$$

Buradan denklem kökleri 1.21 ve -0.62 olarak hesaplanır ve pozitif olan 1.21 değeri 35 m^3 için w/h olarak değerlendirilebilir. Denklem 31'deki polinom ifadesinde S_w değerinin 1.21 olduğu durumdaki S_I 1.48 olarak hesaplanır. Böylece optimum çizgi üzerindeki tüm koordinat değerlerine kesin değerleriyle birlikte ulaşılabilir. Standart bu denklem çizgisini katı bir kural olarak sunmamış olmakla birlikte denkleme yakınsayan koordinat noktalarını standartla uyumlu olarak değerlendirmiştir.

5.4.1 Yatay Açılandırma

ISO 23591 standardı, *flutter echo* etkilerini azaltmak için uzunluk ekseninde en az 5 derecelik bir açılandırma önerir. Bu açılandırma, kenar uzunluk ortalamalarının belirlenen oda oranına denk düşeceği şekilde olmalıdır. Bu da her bir oda oranının farklı açı derecelerinde farklı boyutlar gerektireceği anlamına gelmektedir. Bir oda boyutlarının açı derecesine bağlı olarak değişimleri Denklem 35'te sunulmuştur (Durmaz, Zerafet, 2022:59). Aynı oda oranlı açılandırmadaki kenar isimlendirmeleri Şekil 22'de gösterilmiştir.



Şekil 22- Aynı oda oranlı açılandırmadaki kenar isimlendirmeleri

$$|GH| \approx \frac{2 \times |AB|^2}{2\times|AB| + |AC| \times \tan(\theta)}$$

$$|EG| \approx \frac{2 \times |AC|}{1+ \sqrt{1+ \tan^2(\theta)}}$$

$$|EF| \approx |GH| + |EG| \times \tan(\theta)$$

$$|FH| \approx |EG| \times \sqrt{1 + \tan^2(\theta)}$$

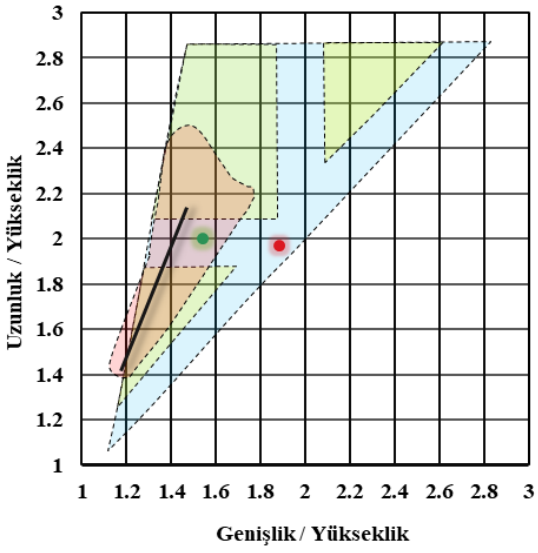
AB, CD: Dikdörtgendeki kısa kenarlar
AC, BD: Dikdörtgendeki uzun kenarlar
EG, FH: Yamuktaki uzunluk kenarları
GH, EF: Yamuktaki genişlik kenarları (35)

Oda oranı aynı olan açılandırmalarda boyutlar dikdörtgen formların direkt olarak açılandırıldığı modellere eşit değildir. Bu ortalamalı modelleri tasarlamak için farklı oda oranlarına sahip modellerin içeri doğru kırılması gereklidir. Aksi halde direkt açılandırılmış modellerde üçüncü bölümde aktarılan Bolt, EBU ve IEC uyumlulukları ortadan kalkabilir. Özellikle ISO 23591 standardı Denklem 31'deki polinom doğrusu etrafındaki oda oranlarından uzaklaşmayı önermez. Çalışmalar kapsamında analizi daha iyi gözlemlemek ve açılandırılmış ideal oda boyutlarını daha hızlı hesaplayabilmek adına MATLAB ortamında mimari bir oda dönüştürücü aracı üretilmiştir. Bu oda dönüştürücüsü, Denklem 35'teki fonksiyonlarını "oda oranını koru" seçeneğiyle birlikte kullanır. Bir diğer özellik olan optimum açı değerleri hesaplayıcısı, var olan bir odanın Bolt, EBU, IEC standartlarından en az biriyle uyumlu sonuç veren açı değerlerini listeler. Aynı oda oranlı açılandırma ise tüm oda oranlarında istenen açı değerini optimize ederek mimari tasarım aşamasının avantajlarından faydalanır. Örnek olarak standartla uyumlu en düşük hacme (35 m^3) sahip 1:1.21:1.48 oranı için optimum açılandırma derecelerinin listesi Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7- 1:1.21:1.48 oranı için optimum açılandırma derecelerinin listesi

Açı (°)	H	W	L	Uyumluluk	Azalma (m^3)
1	1	1.197	1.480	Bolt	-0.38
2	1	1.184	1.480	Bolt	-0.75
3	1	1.171	1.481	Bolt	-1.13
4	1	1.160	1.480	-	-1.51

Tablo 7'deki sonuçlar 4 derece ve daha fazla açılandırılmış sonuçlar için optimum bölgelerden ve ISO 23591 tarafından sunulan polinom çizgisinden uzaklaşmaktadır. Mimari tasarım aşamasında, açılandırılmış versiyonu hedef modele eşit olan ve odayı çevreleyen dikdörtgen formundaki dış hacim ve boyutlar seçilerek içe doğru bir kırılma yürütülür. Dış hacim oranları özellikle Bolt, EBU ve IEC bölgelerinin üst limitlerine yakın bölgelerde konumlanabilir; bu da Denklem 35'teki açı değerinin artmasıyla bu bölgeden uzak noktaların da optimize edilebileceği ve bölgelerin etrafındaki aslında uyumsuz olan oda oranlarının da açılandırılmış versiyonlarının seçilebileceği sonucunu doğurur. Uzunluk eksenindeki açılandırmanın oda oranındaki etkisi Şekil 23'te gösterilmiştir.



Şekil 23- Uzunluk eksenindeki açılandırmanın oda oranındaki etkisi, IEC (mavi), EBU (sarı), Bolt (kırmızı), ISO23591 (siyah çizgi), dikdörtgen model (kırmızı daire), açılandırılmış oran (yeşil daire)

Uzunluk eksenindeki açılandırma, Şekil 23'teki gibi sol yönde bir oda oranı değişimi sağlar. Bu sebeple ISO 23591 polinomunun sağ tarafındaki dikdörtgen modeller,

içe doğru kırılmalar sayesinde modeli optimize eder. 3*5.55*6.3 m boyutlarındaki 1:1.85:2.1 oda oranındaki oda IEC standardına uyum gösterse de Bolt alanına dâhil değildir. 1:1.85:2.1 oda oranının açılandırma sonrası değişim listesi Tablo 8'de listelenmiştir.

Tablo 8- 1:1.85:2.1 oda oranının açılandırma sonrası değişim listesi

Açı (°)	H	W	L	Uyumluluklar	Azalma (m^3)
1	1	1.832	2.100	EBU-IEC	-1.04
2	1	1.813	2.101	EBU-IEC	-2.08
3	1	1.795	2.101	EBU-IEC	-3.12
4	1	1.777	2.103	EBU-IEC	-4.16
5	1	1.758	2.104	EBU-IEC	-5.21
6	1	1.740	2.106	EBU-IEC	-6.26
7	1	1.721	2.108	Bolt-EBU-IEC	-7.31
8	1	1.702	2.110	Bolt-EBU-IEC	-8.37
9	1	1.684	2.113	Bolt-EBU-IEC	-9.43
10	1	1.665	2.116	Bolt-EBU-IEC	-10.50
11	1	1.646	2.120	Bolt-EBU-IEC	-11.57
12	1	1.627	2.123	Bolt-EBU-IEC	-12.65
13	1	1.608	2.128	Bolt-EBU-IEC	-13.74
14	1	1.588	2.132	Bolt-EBU-IEC	-14.84
15	1	1.569	2.137	Bolt-EBU-IEC	-15.95

> 10° açılandırmalar oda oranını polinom üzerindeki (1.5, 2.2) ikilisine çok yaklaştırır. Böylece yaklaşık 114 m^3 olan ilk model, 100 m^3 hacmindeki açılandırılmış ve modal basınç dağılımlarının düzensizleştiği bir iç küçük hacimde standartla uyum göstermeye başlar. Tam polinom üzerine konumlanmış modellerdeki aynı oda oranlı açılandırma ise modelin sağ tarafa doğru yönelmesini ve optimum bölgeden uzaklaşmasını önler.

5.4.2 Eksen Değişimi

Kontrolü zor bir modal spektrum sunan oda oranlarında üç boyuttan birisini kısaltmak veya mümkünse uzatmak bir çözüm olabilir. Yüzey açılandırmaları ve boyut kısaltmalarındaki en elverişli durum, oda oranının optimum bölgelere yakın bir konumda olmasıdır. Örnek olarak bu oranların Şekil 23'teki haritadan da incelenebileceği üzere

uzunluk ve genişlik boyutlarında 1.2 – 1.4 değerlerinden az olması hacmin tek boyutta azaltılmasıyla bir çözüm sağlamaz.

Hacim değerlerinin büyüklüğü ve küçüklüğü fark etmeksizin uzunluk ve genişlik gibi iki boyutun aynı olduğu kare modeller istenmez. Bu odalarda ses dalgalarının iki eksendeki aldıkları yollar aynı davranışı ve açısallıkları gösterir. Bu durum, bazı noktalarda odaklanma yaratarak ses alanının yüzey boyunca homojen dağılması prensibiyle uyuşmaz. Bu sebeple eksenlerden birine ek bir duvar tabakası eklemek ve oda oranlarını iyileştirmek yamuk formu kadar olmasa da şaşırtmacalı bir ses alanı sağlayacaktır. Örnek olarak 2.5:4.3:4.3 m boyutlarındaki bir oda 1:1.72:1.72 oda oranına sahiptir. Kare form, genişlik ekseni 3.5 m'ye indirilerek önlenebilir. Böylece Bolt alanında var olan yeni bir oda oranı (1:1.4:1.72) elde edilir.

5.5 Akustik İyileştirme

Akustik ölçüm mevcut durumun hedef çınlama sürelerine olan uzaklıklar hakkında bilgiler sunar. Müzik prova odaları spektrum boyunca dengeli çınlama süreleri gerektirdiği için RT_{ort} değerine göre değişen frekans özelindeki alt ve üst limitler belirlenmelidir.

Ölçüm sonuçları incelendiğinde akustik tasarım aşamasında fazla işlemleri önleyebilecek mevcut durum güncellemeleri yapılabilir. Odanın mevcut durumundaki geniş pencere yüzeyleri tiz frekanslarda aşırı sürelere sebep olabilir. Geniş dinleyici alanları özellikle orta ve tiz frekanslarda çok fazla bir emici alan sunar. Bu sebeple Sabine ihtiyacına bağlı panel yerleşimlerinden önce mevcut durumdaki malzemelerin tanınması ve etkilerinin iyi teşhis edilmesi gerekir.

Hedef spektruma ulaşmak açısından yansıtıcı ve emici olması gereken frekans değerlerini olabildiğince tek bir formda sunan panel tasarım parametreleri seçilebilir veya panel hesaplama araçlarında oluşturulabilir. Böylece her bir hacim için farklı değerlerde olan duvar – panel yüzde oranları en etkili bir biçimde kullanılmış olur.

Her hacim boş haliyle bir çınlama süresi potansiyeli taşır. İkinci bölümde aktarılan Sabine denklemlerinde yüzey alanı ve hacim değerleri herhangi bir boş model için kesin değerlerle belirlenmiştir ancak tüm yüzeylerdeki ortalama emicilik katsayısı için 0.05 ve 0.1 arasında değişen bir değer tanımlandığında özellikle 500 Hz ve 1 kHz için ortalama çınlama süresi belirlenmiş olur. Bir akustik tasarım için ideal olan panel kaplama yüzdesi yanal duvarlar ve tavan için % 15 – 25 arasında değişir. Uygun çınlama süreleri, standartlar ve literatürdeki kaynaklar tarafından belirtildiğinden hedef ve potansiyel çınlama üzerinden ihtiyaç duyulan Sabine değeri hacim özelinde belirlenmiş olur. Burada göz önüne alınması gereken bir diğer değişken panel boyutlarıdır. Sabine ihtiyacı ve bir akustik panelin ortalama çınlama süresi arasındaki oran uygun panel sayısını verirken toplam emici alan ve oda yüzey alanı arasındaki orana göre yüzdelik panel kaplama değerleri belirlenebilir.

Odeon programında kaynak ve alıcı noktaları duvarlardan en az 1.5 m mesafe uzaklıklara yerleştirilir. İlk etaptaki malzeme seçimleri gerçeğe yakın olarak Odeon kütüphanesi veya ticari ürün modelleri üzerinden yapılır. İlk simülasyon sonuçları, gerçek ölçümlerden farklı olacaktır. GO aracı, her bir yüzeydeki malzeme için gerçeğe yakın değişimleri iteratif bir yöntemle sorgular. Gerçek değerler ve ölçülen değerler arasındaki farkın en fazla JND kadar olduğu mevcut durum konfigürasyonu, panel yerleşimleri öncesi en uygun başlangıç noktası olarak düşünülebilir.

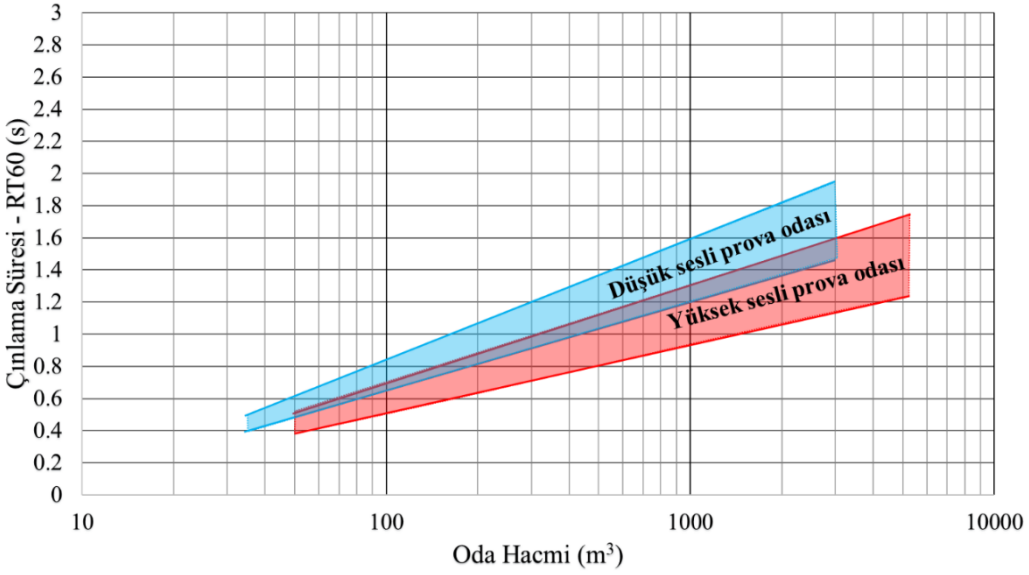
Müzik prova odalarındaki en temel parametre G olduğu için, ikinci bölümde aktarılan formüllere ek olarak Odeon sonuçları incelenebilir. G, Odeon 16 ve sonraki versiyonlarda parametre ve simülasyon sonucu olarak sunulmaktadır. Odeon 13 ve önceki versiyonlarda kaynak noktasındaki birtakım kalibrasyonlar ile SPL parametresi G yerine geçebilir. G parametresi, serbest bir alandaki 10 metrede yaşanacak 31 dB azalmanın ne kadarının oda tarafından önlendiğini gösteren bir parametredir. Örnek olarak odadaki azalma değeri orta frekanslarda -8 dB ise 10 m referans alınan bir azalmaya göre 23 dB kazanç etkisi ve G parametresine karşılık gelir (Rindel, 2022:2). Bu kazanç değeri ise tamamen yüzey alanı ve emicilik katsayıları dolayısıyla odanın kendisine bağlıdır. Odeondaki kaynak kazancının 0 dB olduğu durumlarda SPL parametresi negatiftir ve

alıcı noktasındaki oda azaltma etkisini gösterir. Odeondaki çok yönlü bir kaynak gücünün 31 dB olarak seçilmesi bu referans etkisini kaynak noktasına dâhil ederek ters bir işlemle 1/1 oktav bant frekans değerlerinde G değerlerini okumamıza olanak tanır.

Yanal duvarlardaki panel yerleşimleri oturma konumundaki kulak mesafesi üzerinden gerçekleştirilir. Yerden yüksekliğin az olması, ses dalgalarının emici malzemelere ulaşımını daha kolay bir hale getirecektir. Panellerin birbiriyle bitişik konumlandırılması etkin olan panel çevre uzunluğunu kısaltacağından tercih edilmez; küçük odalar için panel genişliğinin yarısı ve kendisi aralığında eş mesafeler önerilir. İki paralel duvar arasındaki tekrarlayan yankıların önlenmesi adına yüzeylerden birine panel yerleşimleri mutlaka yapılmalıdır.

Müzik prova odalarında net değerlendirmeler için daha kuru bir duyum gerekliyken yayılmış ses alanının kattığı canlılık özellikleri aranır. Bu eksiklik, saçıcı panellerin yüzeylere dâhil edilmesiyle giderilebilir. Saçıcı paneller, yansıttığı enerjiyi aynasal bir yansıma doğrultusunda dağıtmaz; tüm yönlere saçar. Bu özellik, ses dalgalarının oda içerisinde daha iyi karışmasına olanak sağlar. Odada saçıcılığı sağlayacak diğer yüzeyler, boş dinleyici alanları, duvar yüzeyleri ve odadaki diğer tüm malzemeler olabilir. Odeon, çizim programlarında modellenmiş duvar yüzeylerinin mükemmel düzlüğünü en az 0.05 değerindeki saçıcılık faktörünün seçilmesiyle gerçeğe yakınlaştırmayı önerir. Saçıcılık ihtiyacı, dürtü tepkilerindeki doğrusallıkla ters orantılı sonuç veren “eğrilik dereceleri” (ξ - C) parametreleriyle belirlenebilir. Genel C ve T20, T30 için ayrıca hesaplanmış ξ değerlerinin %10 değerini aşmaması gerekir (ISO3382-2, 2009:12). Bu değerin aşılması, dürtü tepkisinde doğrusallığın az olduğunu; dolayısıyla saçılmamış ve aynasal yansıma yolunu izlemiş fazla enerjinin zaman düzlemine daha geç ulaştığı sonucunu doğurur. Bu gibi durumlarda odadaki saçıcı yüzeyler arttırılabilir.

Akustik iyileştirmelerin yürütüldüğü modellerde hedef G değerleri iki müzik tipinin kesişim bölgesindeki çınlama değerleri referans alınarak belirlenmiştir. Örnek olarak k değeri 1'den küçük olan yaylı çalgılar düşük seviyeli olarak tanımlanırken üflemeli çalgılar, piyano ve vokal grupları yüksek seviyeli olarak değerlendirilebilir. ISO 23591 aynı zamanda değişken akustik sistemini de önermektedir. Bu çalışmada her bir modelde öncelikli olarak piyano çalgısının uyumluluğu korunmuştur. Dolayısıyla yüksek seviyeli bölgeden bir çınlama değeri seçilmiştir. Kesişim bölgesindeki tasarımların seçilmesi, yaylı çalgı uyumlulukları için mevcut durumun daha az Sabine değişimiyle ikinci bir noktaya gidişini ve kurulacak olan değişken akustik sisteminin daha basit olmasını sağlar. Düşük seviyeli müzik yönünde çınlama değeri ve G değerleri artar; dolayısıyla odadaki ses daha gür duyulur. Zayıf duyulmaya eğilimli yaylı çalgılarının daha güçlü duyulması için değişken akustik sisteminin ikinci noktası burası olarak belirlenebilir. Yüksek seviyeli müzik yönünde ise bu değerler azalma gösterir; dolayısıyla azalan G değeri yüksek seviyeli çalgı kontrolleri için daha uyumlu olur. ISO23591 standardında düşük ve yüksek sesli prova odası bölgeleri Şekil 24 üzerinden incelenebilir.



Şekil 24- ISO23591 standardında düşük ve yüksek sesli prova odası bölgeleri (Rindel, 2021:22)

ALTINCI BÖLÜM

MODELLEME

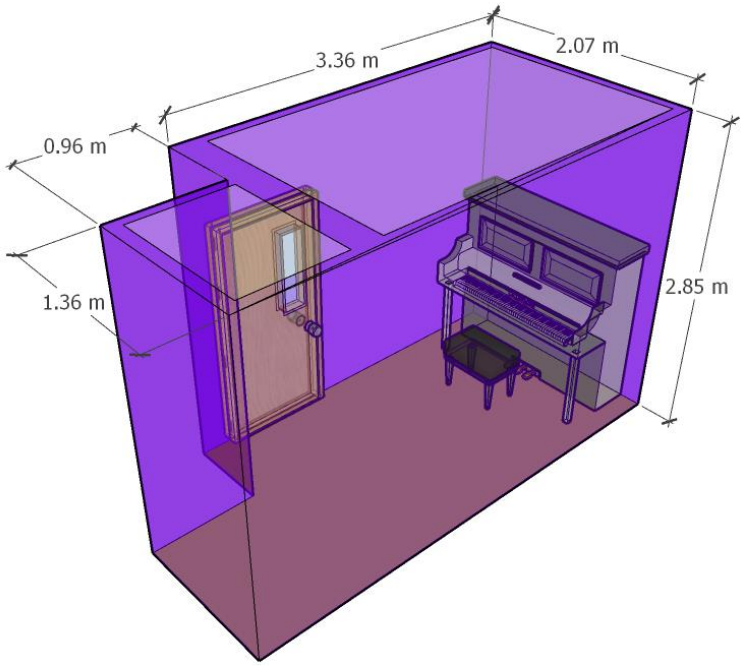
Tezin bu kısmında Dokuz Eylül Üniversitesi Devlet Konservatuvarı ve Güzel Sanatlar Fakültesi'nde öğrencilerin prova ve bireysel ders amaçlı kullandığı dört farklı oda için ISO23591 standardına bağlı kalınarak Odeon 13 yazılımında yürütülen akustik simülasyon aşamaları ve sonuçları artan hacim sırasıyla sunulacaktır. Modellerde birtakım ortak özellikler mevcuttur. İncelenen mekânların tamamında 50-85 cm boşluk bırakılarak montajı yapılmış 60x60 akustik asma tavan panelleri, 2-6 arası değişen tavan ışıklandırma armatürleri, alüminyum çerçeveli 150x150 çift camlı pencere sistemleri ve 90'lık eşik ve çerçeve koruması bulunmayan panel oda kapıları bulunmaktadır. Boş odalarda ortak bitiş malzemelerine rağmen yüzey emicilik değerleri modellere göre küçük farklılıklar gösterebilir. Bu farklılıklar kullanılan yapı malzemelerinin standart dışı veya tutarsız oluşu ile ilgili değildir. Bunun nedenlerinden biri odalarda standart olmayan asma tavan montaj detayları nedeniyle farklı tavan arası hacimlere sahip olunması, aktüel hacimler ile tavan arası hacimlerin komşuluk ilişkileri kapsamında akustik değerler üzerinde oluşturduğu etkileşimler/farklılıklardır. Uygulamalarda optimizasyon işlemi öncelikli olarak çınlama sürelerini gözettiği için yüzey emiciliklerinde bu farklılıklar dikkati çeker. Asıl amaç simülasyonların gerçek ölçüm verilerine göre kalibrasyonunu sağlamak, karar aşamasında yazılım tabanlı iyileştirme önerilerinin güvenilirliğini artırmak olduğundan, bu tür farklılıklar olağan karşılanmıştır. Optimizasyon öncesi yapı elemanlarına atanan ortak malzeme emicilik değerleri Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 9- Optimizasyon öncesi yapı elemanlarına atanan genel emicilik değerleri

Yüzey (α)	**Frekans (Hz)**							
	63	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
Duvar	0.15	0.18	0.18	0.13	0.09	0.09	0.08	0.08
Tavan panel	0.15	0.20	0.18	0.16	0.15	0.12	0.09	0.09
Zemin	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08	0.08	0.10
Kapı	0.08	0.12	0.08	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02
Pencere	0.10	0.12	0.08	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02

6.1 101 Modeli

101 modeli, bir piyano içeren ve diğer çalgı gruplarının bireysel prova amaçlı kullandığı bir odadır. Oda hacmi 23.54 m^3 toplam yüzey alanı 52.94 m^2 büyüklüğündedir. 101 numaralı sınıfta akustik simülasyon öncesi model Şekil 25'te gösterilmiştir.



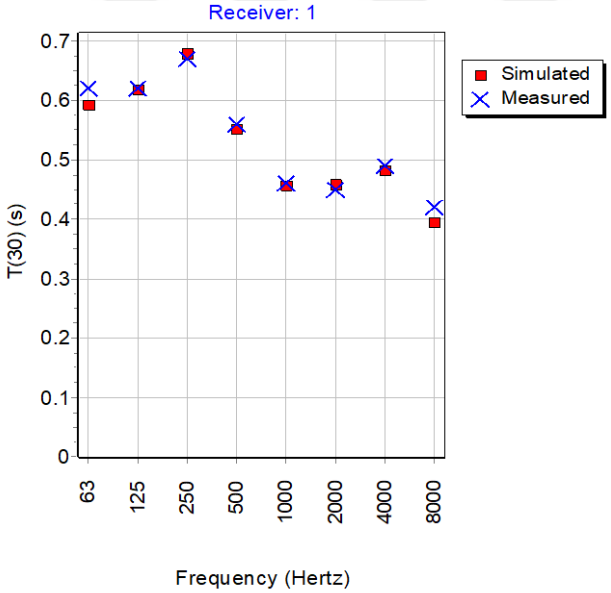
Şekil 25- 101 sınıfı akustik simülasyon öncesi model

6.1.1 Genetik Optimizasyon

Gerçeğe yakın bir GO için akustik ölçümde alınan RIR verisinin yanında ortamdaki yüzey değişikliklerinin takibi de önemlidir. Bu modelde, kapı tarafındaki duvar yüzeyi ve 1.36 m × 0.96 m küçük hacmin bulunduğu bölümdeki tavan yüzeyinin farklılık gösterdiği saptanmıştır. Bu sebeple bu kısımlar, α katsayılarının farklı bir şekilde değişmesi adına farklı yüzeyler olarak tanımlanmıştır. RIR verisinden alınan T30 ölçüm sonuçlarının Odeon yazılımına yüklenmesiyle GO işlemleri yürütülmüştür. Mevcut durum α değerleri ve ölçüm sonuçları Tablo 10'da sunulmuştur. 101 modeli GO ve ölçüm sonuçları karşılaştırması Şekil 26'da sunulmuştur. Ölçülen ve simüle edilen değerler birbirine çok yakındır.

Tablo 10- Mevcut durum α değerleri ve ölçüm sonuçları

	Frekans (Hz)							
	63	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
Duvar (α)	0.13	0.10	0.11	0.13	0.16	0.16	0.15	0.13
Tavan (α)	0.08	0.14	0.10	0.16	0.13	0.11	0.09	0.14
Kapı (α)	0.22	0.21	0.25	0.05	0.12	0.09	0.08	0.22
Arka tavan (α)	0.08	0.05	0.04	0.11	0.12	0.12	0.13	0.07
Kapılı duvar (α)	0.06	0.11	0.04	0.07	0.11	0.11	0.09	0.11
T30 (s)	0.62	0.62	0.67	0.56	0.46	0.45	0.49	0.42
G (dB)				28.5	27.4			
STI	0.74							



Şekil 26- 101 modelinde GO ve ölçüm sonuçları karşılaştırması

6.1.2 Akustik Simülasyon

101 modeli, ISO 23591 ile uyumlu alt hacim limit değerinin altında bir model olsa da ülkemizdeki müzik eğitim kurumlarında oldukça sık rastlanan bir hacim grubundadır. Modal spektrum açısından incelendiğinde Bolt, EBU ve IEC ile uyumlu bir oda oranı sunar. Yüzey alanı L formunda olduğu için dikdörtgen odalarda kullanılan Rayleigh denkleminden sonuç alabilmek adına en yakın hacim ve yüzey alanı değerini veren dikdörtgen bir odanın modal spektrumu değerlendirilmiştir. L formunu oluşturan eksenlerin kısaltıldığı yakın yüzey alanlı odanın boyutları küçükten büyüğe 1.96 m (W) :

2.85 m (H) : 4.21 m (L) olarak sıralanır. 101 modeli frekans spektrumu Tablo 11'de gösterilmiştir.

Tablo 11- 101 modeli modal frekans spektrumu

Modal Frekans	**1.96 m : 2.85 m : 4.21 m**
1-0-0	40.74 Hz
0-0-1	60.18 Hz
2-0-0	81.47 Hz
0-1-0	87.5 Hz
0-0-2	120.35 Hz
3-0-0	122.21 Hz
4-0-0	162.95 Hz
0-2-0	175 Hz

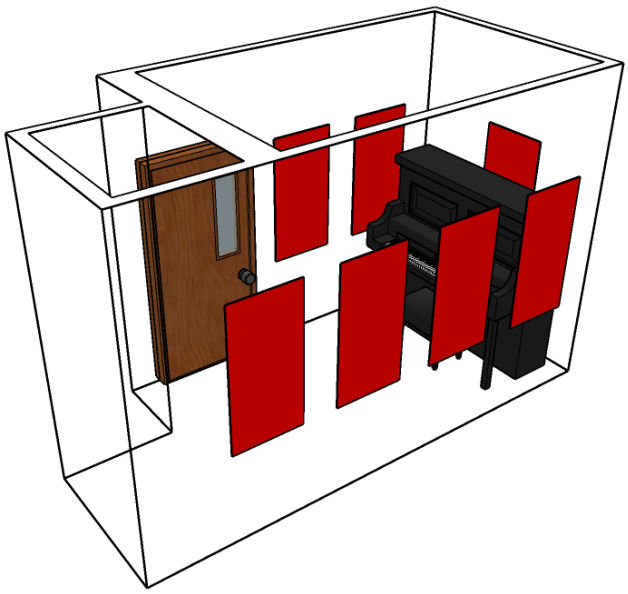
Tablo 11 incelendiğinde özellikle birinci eksenel frekansların birbirilerine olan uzaklıkları oldukça idealdir. Aynı modal spektrumu sunan oda oranı 1:1.45:2.15 olarak belirlenmiştir; bu da optimum çizgi üzerindeki 1:1.45:2.04 oranına çok yakındır.

Standart, düşük ses seviyeli müzik tiplerinde 26 dB G değerini aşmamayı önermektedir (Rindel, 2022:2). Bu model için orta frekanslardaki G değeri 27 – 28 dB aralığındadır. Sınıfın çalgı tipleri açısından işlevsel bir biçimde kullanılabilmesi adına düşük ve yüksek sesli çalgılar için önerilen iki farklı çınlama aralığının kesişim bölgesine yönelik bir akustik tasarım uygulanmıştır. Bu hacimdeki kesişim bölgesi 0.3-0.32 s aralığıdır. Küçük hacim bireysel çalışmalara olanak sağlayacağı için bu modelde yüksek sesli piyano, flüt, klarnet, basklarnet, vokal grupları; düşük sesli keman, viyola, çello, gitar ses kaynaklarının bireysel çalışma senaryoları üzerinde durulmuştur.

Panel boyutları tasarımlarda sıklıkla kullanılan 60 cm ve 120 cm olarak belirlenmiştir. Mevcut ortalama çınlama değerinin hedef çınlamaya yakın olması işlevsel panel sayısı veya panel birim başına Sabine değerinin az olmasını mümkün kılar. Alçak frekanslardaki problemi de duvar panel tipleri üzerinden çözebilmek adına spektrum boyunca daha düz yayılmış α değerleri araştırılmıştır. Panel yerleşimleri, arka yüzeyleri

hava boşluklu veya gözenekli malzeme yerleştirilmiş olarak seçilebilir. Böylece bas emilimi artacaktır. 500 Hz çınlama değerinin 1 kHz değerinden daha fazla olması sebebiyle 500 Hz ağırlıklı bir orta frekans yaklaşımı istenmiştir. Yapılan model araştırmaları ve ilk etapta 7 panel üzerinden yürütülen akustik simülasyon işlemlerinde panel denemeleri, ağırlıklı alfa değerleri kademeli olarak arttırılarak yapılmıştır; sonuç olarak aşağıda detayları sunulan A panelinin bu oda için en işlevsel olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Emicilik değerleri uygun görülen panelin açıklıkları küresel boşluklar şeklinde olmayıp şeritler ve aralarındaki boşluk mesafesinden doğan bir tiptir. Şeritler, 29 mm aralıklı, 31 mm × 35 mm büyüklüğünde tasarlanmıştır. Bu boyutlar panel yüzeyinde % 44 değerinde bir açıklık sağlarken, etkin frekans değerinde doğru orantılı bir etki sunar. MDF panel ve arkasına yerleştirilen gözenekli malzemenin (70 kg/m^3) kalınlıkları sırasıyla 58 mm ve 200 mm değerlerindedir. Gözenekli malzemenin yüksek yoğunlukta olması ve yüksek kalınlık değerleri α_w değerinin 0.85L (B sınıfı) olmasında etkilidir. 101 modeli simülasyon panel yerleşimleri Şekil 27'de gösterilmiştir.



Şekil 27- 101 modeli simülasyon panel yerleşimleri (A paneli-kırmızı)

Modellemeye ait bilgi ve simülasyon sonuçları Tablo 12'de sunulmuştur. 63 Hz ve 8 kHz değerleri, üretici tarafından sunulmadığı için Odeondaki ekstrapolasyon tekniği ile belirlenen α değerleriyle simülasyona dâhil edilmiştir. Çınlama süresi ve hacim değişkenlerine göre Schroeder frekansı 234 Hz olduğu için 250 Hz sonrası sonuçlar doğru kabul edilmelidir.

Tablo 12- 101 modelinde Panel A emicilik katsayıları ve simülasyon sonuçları

	Frekans (Hz)							
	63	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
Panel A (α)	0.70	0.70	0.94	0.93	0.78	0.84	0.77	0.77
T30 (s)	0.39	0.37	0.36	0.32	0.32	0.31	0.33	0.29
EDT (s)	0.35	0.34	0.33	0.29	0.28	0.27	0.29	0.25
G (dB)	26.7	26.7	26.6	26.2	25.9	25.7	25.9	25.1
ξ (T30)	1.2	0.6	2.4	2.2	0.9	1.0	0.6	0.7
C	0.9	-0.9	-4.7	-1.8	0.7	1.4	-0.4	0.8
STI	0.83							

T30 değerleri incelendiğinde her bir frekans değerlerindeki çınlama süreleri ile RT_{ort} arasındaki oranlar olması gerektiği aralıktadır. Bunun yanında frekans artışındaki çınlama değişim trendi olması gerektiği gibidir. ξ ve C değerlerinin filtrelenmiş sinyallerde %10'dan az olması dürtü tepkilerinde aşırı bir eğrilik olmadığını göstermektedir.

Çınlama, yüzey alanı ve tüm yüzeylerdeki ortalama emiciliğin değerlendirildiği teorik G değeriyle Odeon G sonuçları arasında farklar mevcuttur. ISO 23591 standardı, hacim ve çınlama değerleri için optimum G değerlerini sunarken teorik Sabine denkleminden gelen ortalama emicilik değerini kullanır. Sabine denkleminin kullanımıyla 23.54 m^3 hacim değerinde 0.32 s çınlama süresini sağlayan ortalama emicilik değeri 0.223'tür. Denklem 14'ye göre bu emicilik değeri ve yüzey alanındaki G değeri 25.20 dB'dir. Bu G değeri, odadaki tüm ses kaynaklarında -5.80 dB değerinde bir azalma olacağını ifade eder. ISO23591 standardı bu azalma değerinin uyumlu olacağı çalgıları listelerken *forte* ses seviyesini referans alır. Uygun çalgılar *forte* performansta odanın azaltma etkisiyle 85 - 90 dB aralığında duyulmalıdır. -5.8 dB ses gücü değeri,

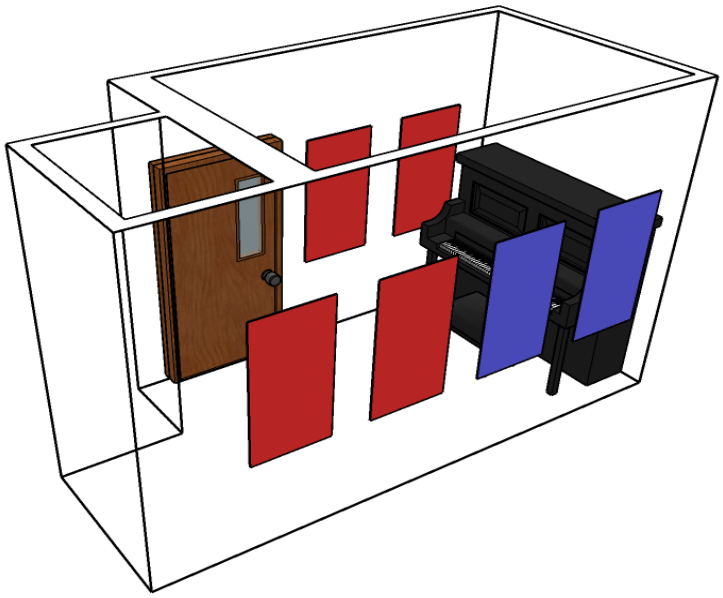
forte seviye ses yüksekliği en az 90.8 dB ve en fazla 95.8 dB olan çalgı gruplarını kabul eder. 101 modelindeki çalgılara ait uyumluluklar Tablo 13'te gösterilmiştir.

Tablo 13- 101 modelindeki çalgılara ait uyumluluklar (dB)

Çalgılar	Ses seviyesi (dB)	G (dB) ihtiyacı	Duyum seviyesi (dB)
Piyano	93	23-28	87.2 (uygun)
Keman	89	27-32	83.2 (zayıf)
Viyola	87	29-34	81.2 (çok zayıf)
Çello	90	26-31	84.2 (zayıf)
Gitar	86	30-35	80.2 (çok zayıf)
Flüt	91	25-30	85.2 (uygun)
Klarnet	93	23-28	87.2 (uygun)
Bas klarnet	92	24-29	86.2 (uygun)

Keman, viyola ve gitar gibi düşük sesli, k değeri 0 ile 1 arasında olan çalgıların ihtiyaç duyduğu G değeri, standarttaki küçük odalarda 26 dB değerinin aşılmaması gerektiği prensibiyle örtüşmez. 101 modelinde piyano gibi yüksek sesli çalgıların da çalışabileceği bir aralık düşük sesli çalgılar için zayıf kalmaktadır. 0.32 s değeri özellikle bu kadar küçük bir hacimde güvenli bir çınlama değeri sunmaktadır. Bu sebeple sadece yaylı çalgıların bireysel çalışmaları için birtakım panellerin azaltılmasıyla değişken akustik sisteminin dâhil edilebileceği ikinci bir seçenek araştırılmıştır.

İkinci seçenek A panel tipinin sayısını azaltmayı ve buradan doğacak alçak frekans kayıplarının tek bir bas panel tipiyle kompanse edilmesini önerir. 23.54 m^3 hacmindeki düşük ses seviyeli bir çalgı için önerilen en büyük çınlama süresi değeri 0.38 s'dir. Dolayısıyla çınlamadaki üst limit değeri bu hacim için yaylıları besleyen en büyük G değerini sunacaktır. 4 tane A panelinin korunduğu ve 2 tane B panelinin odaya dâhil edildiği simülasyonlar yaylı çalgı uyumluluklarını arttırmıştır. 101 modeli yaylı çalgılar için kurulan panel yerleşimleri Şekil 28'de gösterilmiştir.



Şekil 28- 101 modeli yaylı çalgılar için kurulan panel yerleşimleri (A paneli-kırmızı, B paneli-mavi)

Bu yerleşimdeki B panelleri orta frekanslarda yüzeyle aynı emicilik katsayısında olduğundan genel Sabine değeri azalır; ancak A paneline benzer bir bas emiciliği sunarak çınlama spektrum dengesini korur. B paneli, 5 mm delik çapı ve 32 mm delik aralıklı bir MDF panel tipidir. Bu yüzey tasarımından gelen açıklık oranı % 1.9'tur. Panelin arka boşluğu 40 mm kalınlığında 30 kg/m^3 yoğunluğundaki bir mineral yünle doldurulmuştur. 101 modelinde yaylılar için panel emicilikleri ve simülasyon sonuçları Tablo 14'te gösterilmiştir.

Tablo 14- 101 modelinde yaylılar için panel emicilikleri ve simülasyon sonuçları

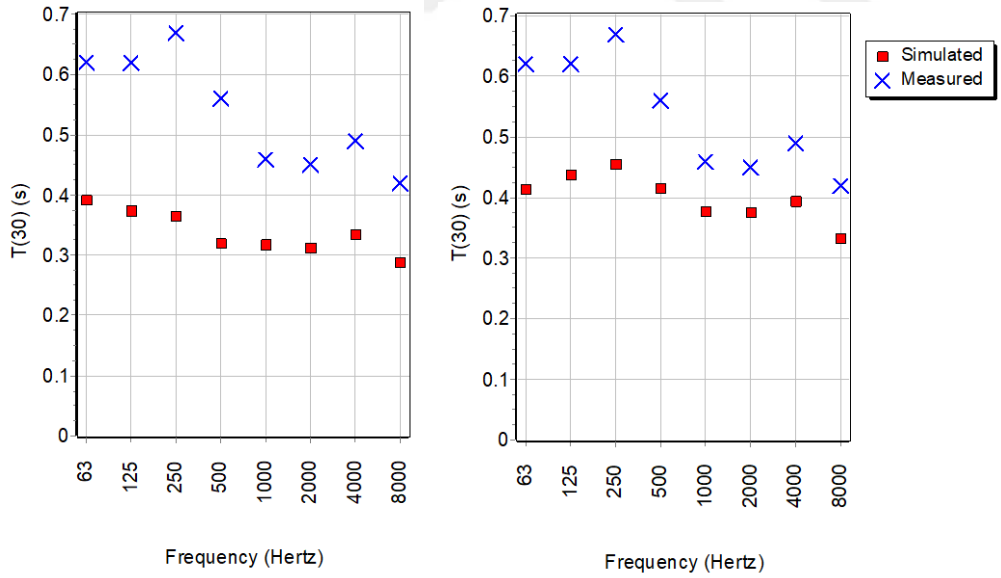
	Frekans (Hz)							
	63	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
Panel A (α)	0.70	0.70	0.94	0.93	0.78	0.84	0.77	0.77
Panel B (α)	0.71	0.71	0.33	0.16	0.11	0.05	0.02	0.02
T30 (s)	0.41	0.44	0.46	0.42	0.38	0.38	0.39	0.33
EDT (s)	0.39	0. 39	0.42	0. 38	0. 36	0. 36	0. 38	0. 32
G (dB)	26.9	26.9	27.1	26.7	26.3	26.2	26.4	25.4
ξ (T30)	1.3	2.9	1.2	1.4	0.9	0.9	0.6	0.8
C	3.9	7.30	3	2.6	2.50	2.4	1.4	2.7
STI	0.80							

İkinci kurulum özellikle hedef ortalama çınlama süresini EDT parametresinde sunarken teorik G hesaplarında +1.22 dB bir değişime işaret eder. Yeni G değeri 26.43 dB olup, algılanabilir en düşük G değerinden (1 dB) büyük bir artış yaşanmıştır. Bu çınlama değeri, piyano ve üflemeli çalgılar için uygun değildir. 101 modelinde düşük sesli kurulumuna göre yaylı çalgı uyumlulukları Tablo 15'te sunulmuştur.

Tablo 15- 101 modelinde düşük sesli kurulumuna göre yaylı çalgı uyumlulukları

Çalgılar	Ses seviyesi (dB)	G (dB) ihtiyacı	Duyum seviyesi (dB)	Fark (dB)
Keman	89	27-32	84.45 (ideale yakın)	-4.50
Viyola	87	29-34	82.41 (çok zayıf)	-4.60
Çello	90	26-31	85.42 (uygun)	-4.58
Gitar	86	30-35	81.53 (çok zayıf)	-4.50

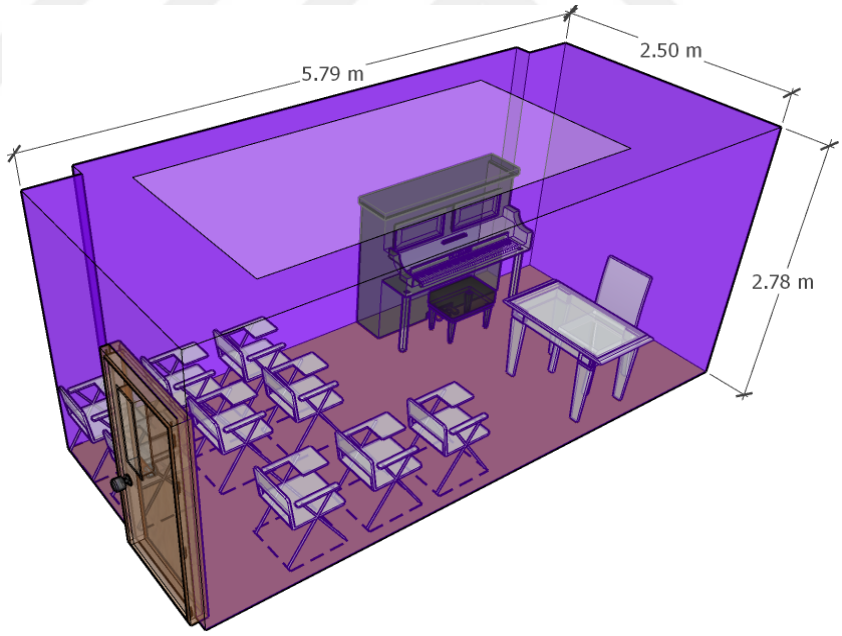
G değeri, 26 dB üst limitinin üzerinde kabul edilebilir bir artış göstermektedir. Çınlama süresi sınırlarına bağlı kalınarak gerçekleştirilen en işlevsel tasarımda keman gibi k değeri yüksek yaylılarda 85 dB alt sınır değerine yaklaşılmaktadır. 101 modeli piyano ve yaylı simülasyonları sonrası karşılaştırma Şekil 29'da gösterilmiştir.



Şekil 29- 101 modeli sırasıyla piyano ve yaylı simülasyonları sonrası karşılaştırma

6.2 104 Modeli

104 modeli, 40.17 m^3 hacminde ve 77.71 m^2 yüzey alanı büyüklüğünde olup oda oranı bakımından uyumsuz bir prova odası örneğidir. Bu bakımdan modal spektrumdaki dengesizliklerin kontrol edilmesi adına daha güçlü uygulamalar gereklidir. İşlev olarak standart kapsamında iki müzisyenin birlikte çalışabileceği senaryolar değerlendirilebilir. Belirlenen oran 1:1.11:2.31 olup herhangi bir uyumluluk bölgesinde yer almamaktadır. Eksen değişimiyle boyut optimizasyonu yapılırken genişliğin yükseklikten küçük olmasından dolayı genişlik ve uzunluk kenarları kısaltılmalıdır. Böylece 1.11 oranı artarken 2.31 oranı ise azalır. Yapılan hesaplarda genişliğin 2.3 m, uzunluğun 3.7 m değerlerine azaltılması sınıfı 1.21:1.61 oranıyla standartla uyumlu bir hale getirir ancak bu işlem yüksek hacim kayıplarına sebep olur. Bu sebeple boyut değişimi tercih edilmemiştir. 104 sınıfında akustik simülasyon öncesi model Şekil 30'da gösterilmiştir.



Şekil 30- 104 sınıfı akustik simülasyon öncesi model

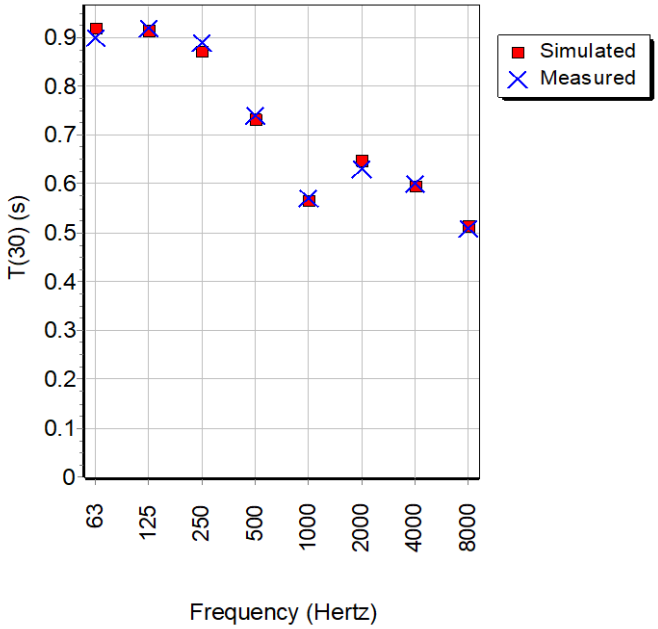
6.2.1 Genetik Optimizasyon

GO, zemin dâhil tüm yanal yüzeylerin boyalı bir beton duvar; tavanın ise asma panel olarak seçildiği bir durumda gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonucunda tavanda açığa çıkan yüksek emici alfa değerlerinin zemindeki malzemelerin etkisi olduğu

düşünülebilir. Optimizasyon sonuçlarındaki yüksek uyum, odanın başlangıç Sabine değerinin projeye dâhil edilebildiğini ve emiciliklerin dikey doğrultuda paylaşılmasının sorun doğurmayacağını düşündürmektedir. 104 modelinde GO ve ölçüm sonuçları karşılaştırması Şekil 31 üzerinden incelenebilir. 104 modeli mevcut durum emicilik ve parametre değerleri Tablo 16'da gösterilmiştir.

Tablo 16- 104 modeli mevcut durum emicilik ve parametre değerleri

	Frekans (Hz)							
	63	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
Duvar (α)	0.08	0.09	0.09	0.11	0.13	0.12	0.13	0.11
Tavan (α)	0.24	0.06	0.22	0.17	0.31	0.15	0.15	0.10
Kapı (α)	0.04	0.19	0.03	0.09	0.04	0.08	0.05	0.06
T30 (s)	0.90	0.92	0.89	0.74	0.57	0.63	0.60	0.51
G (dB)				27.2	25.9			
STI	0.68							



Şekil 31- 104 modelinde GO ve ölçüm sonuçları karşılaştırması

6.2.2 Akustik Simülasyon

40 m^3 hacminin kesişim bölgesi 0.43 ve 0.46 s aralığıdır. Bu hedef çınlama değeri; piyano, flüt, klarnet, bas klarnet, vokal grupları, keman, viyola, çello, gitar çalgılarının bireysel ve ikili çalışma senaryoları için değerlendirilebilir.

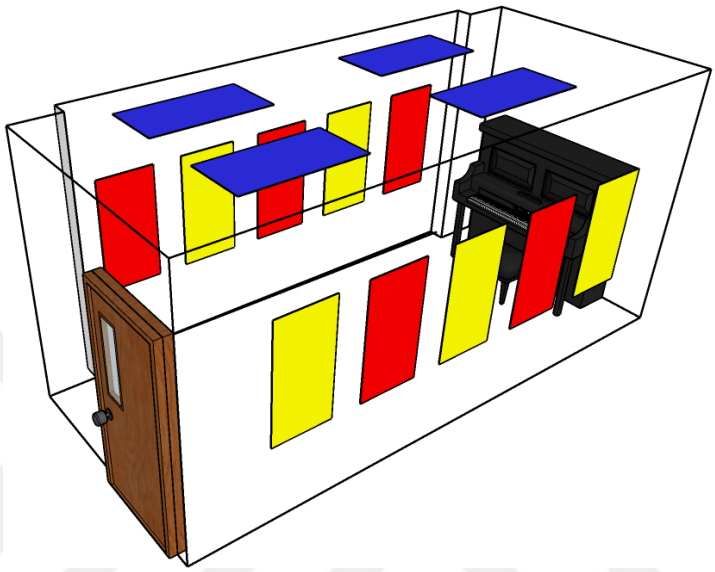
Bu kapsamda 0.45 s çınlama değerine ulaşabilmek için mevcut T30 değerlerinde birtakım değerlendirmelere ihtiyaç vardır. T30 değerleri, 101 modelinde olduğu gibi orta frekanslarda 500 Hz ağırlıklı bir panel ihtiyacı gerektirmektedir. RT ve hacim karakteristiklerinin benzemesinden ötürü öncelikli olarak 101 modelinde kullanılan A panelinin işlevsel olacağı öngörülmüştür. Frekans çınlama spektrumu dağınık bir dağılım gösterdiği için standart kapsamında sunulan alt ve üst limit değerlerin hedef ortalama çınlama süresine göre belirlenmesi gereklidir. Hedef ortalama çınlamaya göre alt-üst limit değerleri Tablo 17'de gösterilmiştir. 500 Hz ve 1 kHz'de 0.43 ortalamasını sunan temsili bir ikili girilerek belirli oranlar dâhilindeki alt ve üst limit sonuçları alınabilir.

Tablo 17- 104 modelinde hedef ortalama çınlamaya göre alt-üst limit değerleri

Frekans (Hz)	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**RT_{ort}**
RT (s)				0.43	0.43			0.43
Alt limit (s)	0.34	0.37	0.39	0.41	0.41	0.37	0.32	
Üst limit (s)	0.60	0.52	0.47	0.45	0.45	0.46	0.45	

Bu değerlere bakıldığında 63 ve 125 Hz bölgesinde en az 0.3-0.4 s kadar bir bas frekans kontrolü gerekmektedir. Bunun için tavan yüzeyinde 80-120 Hz bölgesinde etkili olan duvar bas panel tipleri tercih edilmiştir. Yan duvarlarda ise gözenekli malzemenin panel arkasına dâhil edilmesiyle bas frekans kontrolü sağlanmıştır. Yan duvarlarda karşılıklı olarak yerleştirilen 10 akustik panelin yarısı 101 modelindeki düz spektrumlu tüm bölgelerde çok etkili şeritli A paneli, diğer yarısı ise sadece orta frekans bölgesinde etkin delikli bir C paneli olarak seçilmiştir. C paneli, 5 mm delik çapı ve 16 mm delik uzaklıklı bir MDF panelidir. Bu yüzey tasarımı %7.6 değerinde bir açıklık yüzdesi sağlar. Panelin arka boşluğu, 40 mm kalınlığında 30 kg/m^3 yoğunluklu bir mineral yünle doldurulmuştur. C paneli orta frekans bölgesinde A panelinden daha az emicidir. Karşılıklı yüzeylerin farklı emiciliklere sahip olması adına aynı tipte çapraz yerleşim prensibi tercih edilmiştir. Bunun tercih edilmediği panel yerleşimleri, simülasyon denemelerinde C (Eğrilik) parametresinde yüksek değerlere sebep olmuştur. Tavan yüzeyindeki 8 birim kare panel tipi (60 cm×60 cm), 4 tane 60 cm×120 cm'lik panelle değiştirilmiştir. Tavanda 101 modelindeki bas ağırlıklı B paneli tercih edilerek bas frekans kontrolünde artış istenmiştir. 104 modeli akustik panel yerleşimleri Şekil 32'de

gösterilmiştir. 104 modeli panel emicilikleri ve simülasyon sonuçları Tablo 18'de sunulmuştur.



Şekil 32- 104 modeli akustik simülasyon panel yerleşimleri
(A paneli-kırmızı, C paneli-sarı, B paneli-mavi)

Tablo 18- 104 modeli panel emicilikleri ve simülasyon sonuçları

	Frekans (Hz)							
	63	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
Panel A (α)	0.70	0.70	0.94	0.93	0.78	0.84	0.77	0.77
Panel B (α)	0.71	0.71	0.33	0.16	0.11	0.05	0.02	0.02
Panel C (α)	0.09	0.09	0.96	0.68	0.51	0.27	0.10	0.10
T30 (s)	0.55	0.53	0.44	0.47	0.44	0.50	0.51	0.45
EDT (s)	0.58	0.54	0.42	0.43	0.41	0.47	0.48	0.40
G (dB)	26	25.8	24.50	24.7	24.50	25.2	25.30	24.6
ξ (T30)	1.0	1.2	1.2	0.6	0.2	0.9	0.7	0.1
C (%)	-3.0	-3. 5	-3.9	-1.8	-1.3	-3.0	-2.9	-1.1
STI	0.76							

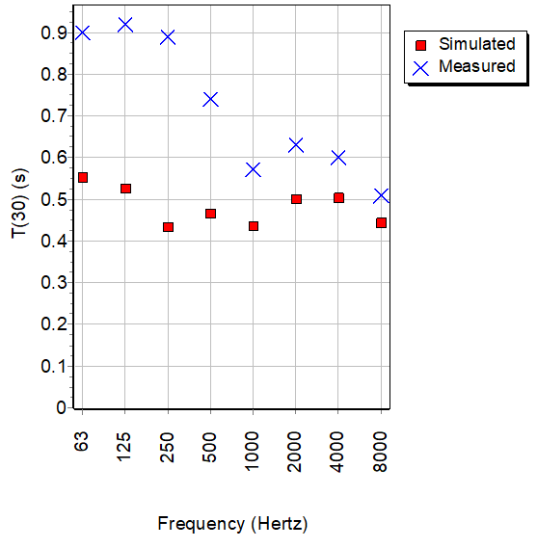
Tizlerdeki çınlamalar, orta frekanslara göre fark edilebilir derecede büyüktür ancak Tablo 17'deki limit değerlerine göre olması gerektiği aralıklar dâhilindedir. Tavandaki emicilik ve çapraz panel yerleşimlerinin etkisiyle eğrilik parametreleri ideal aralıklardadır. İlk etapta 0.68 olan STI değeri, azalan çınlamanın etkisiyle 0.74 değerine yükselmiştir. Bu hacimdeki teorik G değeri 24.57 dB olmakla birlikte ilk durumdaki

aşırılık (> 26 dB) artan emicilikle azalmıştır. G değeri, bu modelde -6.47 dB seviyesinde bir azalma olduğunu gösterir. 104 modelindeki çalgı uyumlulukları Tablo 19'da gösterilmiştir.

Tablo 19- 104 modelindeki çalgı uyumlulukları (dB)

Çalgılar	**Ses seviyesi (dB)**	**G (dB) ihtiyacı**	**Duyum seviyesi (dB)**
Piyano	93	23-28	86.58 (uygun)
Keman	89	27-32	82.6 (zayıf)
Viyola	87	29-34	80.55 (çok zayıf)
Çello	90	26-31	83.57 (zayıf)
Gitar	86	30-35	79.59 (çok zayıf)
Flüt	91	25-30	84.7 (ideale yakın)
Klarnet	93	23-28	86.58 (uygun)
Bas klarnet	92	24-29	85.6 (uygun)
Piyano + keman	94.5	21.5-26.5	88.04 (uygun)
Piyano + gitar	93.8	22.2-27.2	87.32 (uygun)
Keman + viyola	91.13	24.8-29.8	84.71 (uygun)
Keman + keman	92.04	24-29	85.61 (uygun)
Viyola + viyola	90	26-31	83.57 (zayıf)
Alto	93	23-28	86.6 (uygun)
Tenor	95.05	21-26	88.6 (uygun)
Bas	96	20-25	89.59 (uygun)
Soprano	97	19-24	90.56 (ideale yakın)

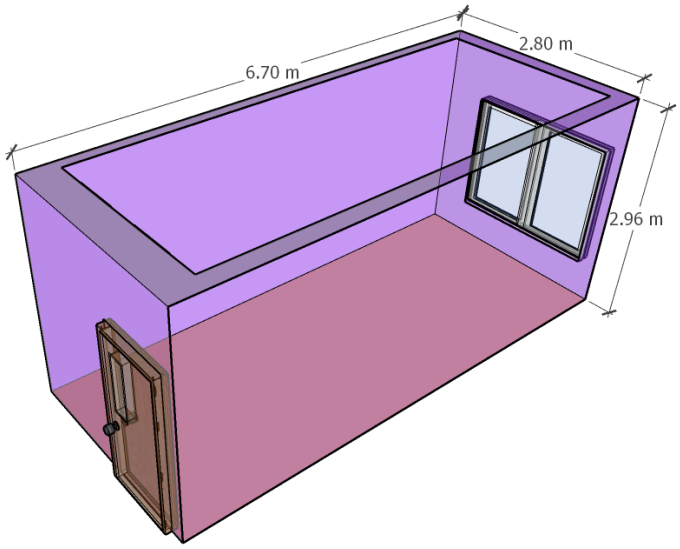
Bu sınıfta yaylı grubunda özellikle bireysel olarak çalışabilecek en ideal çalgı çellodur. Bunun sebebi, diğer yaylılara göre daha gür bir çalgı olmasıdır. Piyano özelinde düşünürsek forte çalışta ses seviyesinin 85 dB alt limit değerine yakın olması, odanın daha gür *fortisimmo* çalışlarda bile güvenli bir ses azaltma değeri sunabileceğini gösterir. Flüt ve soprano çalgıları 85-90 dB aralıklarına çok yakın bir değerde duyulmaktadırlar bu sebeple 104 modeli bu çalgı grupları için işlevsel ses aralığı sunan odalar arasında olacaktır. 104 modeli simülasyonlar sonrası karşılaştırma Şekil 33'te gösterilmiştir.



Şekil 33- 104 modeli simülasyonlar sonrası karşılaştırma

6.3 501 Modeli

501 modeli tüm modeller arasında boy ve genişlik farkının en büyük olduğu bir dikdörtgen form sunar. 55 m^3 hacim değeri ve 93.53 m^2 yüzey alanı ile bu çalışmanın en büyük üçüncü modelidir. Diğer modellerden farklı olarak genişlik ekseninde geniş bir pencere içerir ve tamamen boştur. Oda oranı 104 modeli ile çok yakındır ve hacimdeki fazla kayıplardan dolayı boyut optimizasyonu tercih edilmemiştir. 501 modeli akustik simülasyon öncesi model Şekil 34'te gösterilmiştir.



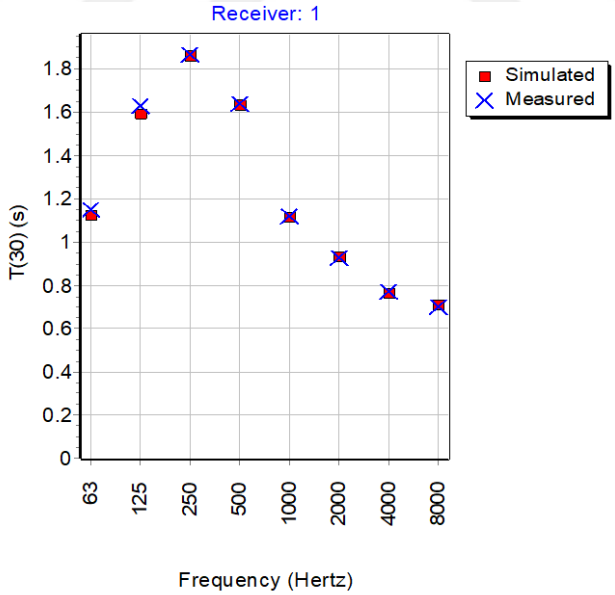
Şekil 34- 501 sınıfı akustik simülasyon öncesi model

6.3.1 Genetik Optimizasyon

501 modelindeki GO için diğer modellerden farklı olarak tamamen boş bir sınıfta ölçüm gerçekleşmiştir. 501 modeli mevcut durum ve emicilik değerleri Tablo 20'da gösterilmiştir. 501 modeli GO ve ölçüm sonuçları karşılaştırması Şekil 35'te gösterilmiştir.

Tablo 20- 501 modeli mevcut durum ve emicilik değerleri

	Frekans (Hz)							
	63	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
Duvar (α)	0.04	0.04	0.04	0.02	0.08	0.08	0.13	0.08
Tavan (α)	0.09	0.10	0.06	0.20	0.12	0.11	0.06	0.04
Kapı (α)	0.17	0.04	0.10	0.11	0.10	0.08	0.05	0.03
Zemin (α)	0.20	0.06	0.05	0.03	0.06	0.15	0.10	0.07
Pencere (α)	0.10	0.19	0.11	0.05	0.05	0.02	0.02	0.04
T30 (s)	1.15	1.63	1.87	1.64	1.12	0.93	0.77	0.70
G (dB)				30.6	28.9			
STI	0.58							



Şekil 35- 501 modelinde GO ve ölçüm sonuçları karşılaştırması

6.3.2 Akustik Simülasyon

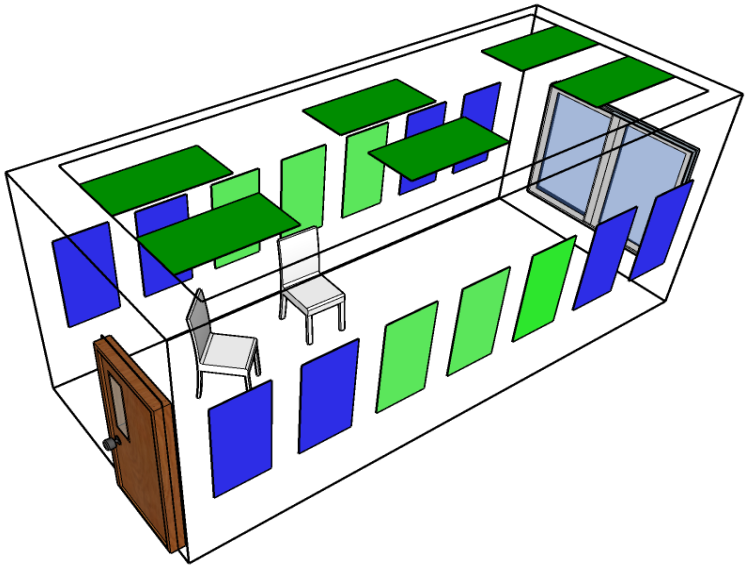
Bu hacimdeki düşük ve yüksek seviyeli müzik sınıfı için sunulan aralıkların ortak değerleri 0.51-0.54 s aralığıdır. Mevcut durumdaki 500 Hz ve 1 kHz çınlama

süreleri, bu aralığa çok uzak olduğu için güçlü emici paneller gerekmektedir. Yüksek çınlama değerleri, diğer tüm hacim gruplarında olduğu gibi bu modelde de kontrolsüz bir G değeriyle sonuçlanmıştır. G değerinin bu modelde 29-31 dB aralığında olması, bu modelin neredeyse bir serbest alan kadar zayıf olduğunun göstergesidir. STI, yüksek çınlama etkisiyle 1 değerinden uzaktır. Tüm bu detaylar güçlü panel gereksinimini arttırır. Ortalama çınlama değeri 1.4 s olan 501 modelindeki hacimden ileri gelen toplam Sabine değeri 6.325 Sα olarak hesaplanmıştır. Hedef çınlama değerinin en az 0.51 olduğu düşünüldüğünde oda içerisindeki olması gereken Sabine değerinin 17.36 Sα olması gerektiği sonucuna ulaşılır. Eklenmesi gereken Sabine değeri 11.03 Sα olduğuna göre birim alanı 1.2 m, α_W değeri 0.9 olan en az 10 panele ihtiyaç vardır. Bu panellerin 101 modelinde olduğu gibi düz ve güçlü bir spektrum etkisi sunanlardan seçilmesi kötü bir oda oranı için etkili bir kullanım olacaktır.

Yapılan simülasyonlarda gerekli akustik panellerin tamamı yan yüzeylere yerleştirilmemiş; tavan ve duvarlar üzerinden paylaştırılmıştır. Diğer iki modelde de kullanılan B bas paneli, bu modelde diğerlerinden farklı olarak köşelere yakın olan yüzeylerde ikişerli gruplar halinde tercih edilmiştir. Bu tercihin en önemli sebebi bas frekans kontrolünde köşelerin; orta frekans kontrollerinde de orta yüzeylerin etkili olmasıdır. Bu oda, 125 Hz'de 1.6 s çınlamaya sahiptir ve bu frekans özelindeki üst hedef değer 0.73 s'dir. Bu sebeple çok yüksek bir bas kontrolüne ihtiyaç duyulmaktadır. Odeon programının simülasyon yönteminin bu bölgede etkisiz olmasından dolayı, orta frekansları dengeleyen panel modellerindeki gözenekli arka katmanlar bu kadar yüksek bir ihtiyaçta güvenli bir ilk müdahale sunar.

Yapılan ürün araştırmaları ve simülasyon denemelerinden sonra α_W değeri tavan kullanımlarında 0.85; duvar kullanımlarında 0.80 olan D panelinin optimum çınlama değerini sunduğu sonucuna ulaşılmıştır. Duvar ve tavan panelleri arasındaki tek fark arkada bırakılması gereken hava boşluğu kalınlığının duvar yüzeyinde 30 mm, tavan yüzeyinde ise 200 mm olmasıdır.

Burada tavan yüzeyinde yüksek bir farkın tercih edilmesi 20 cm kadar uzun bir boşluğun yükseklik ekseninde kaybedilmesinin daha elverişli olduğudur. Arka yüzeydeki emici gözenekli tabaka ve panel kalınlıkları iki tip için de sırasıyla 45 ve 13 mm'dir. D paneli 8 mm delik çapı dolayısıyla yüzeyde %24'lük bir açıklık oranı sağlar. 501 modeli panel yerleşimleri Şekil 36'da gösterilmiştir. 501 modeli akustik simülasyon panel yerleşimleri Tablo 21'de sunulmuştur.



Şekil 36- 501 modeli akustik simülasyon panel yerleşimleri
(D panelleri-yeşil, B panelleri-mavi)

Tablo 21- 501 modeli panel emicilikleri ve simülasyon sonuçları

	Frekans (Hz)							
	63	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
Panel B (α)	0.71	0.71	0.33	0.16	0.11	0.05	0.02	0.02
Panel D - duvar (α)	0.30	0,30	0,80	1,00	0,95	0,75	0,65	0.65
Panel D - tavan (α)	0.30	0,65	1,00	0,95	0,90	0,80	0,70	0.70
T30 (s)	0.55	0.65	0.56	0.53	0.48	0.54	0.52	0.49
EDT (s)	0.55	0.65	0.57	0.59	0.51	0.54	0.51	0.47
G (dB)	25.4	26	25	24.9	24.3	24.5	24.4	23.9
ξ (T30)	0.5	0.5	0.4	2.8	1.4	0.3	0.3	0.3
C (%)	0	-0.7	-1.7	-5.5	-2.7	1.2	2.1	1.4
STI					0.73			

Simülasyon sonucunda T30 değerleri incelendiğinde RT_{ort} değeriyle optimum oranı aşan tek frekans 125 Hz olsa da standart kapsamında sunulan tolerans değerlerinin

sınırları içerisindedir. EDT ve T30 değerlerinin birbirine yakın olması dürtü tepkilerinin farklı bölgelerindeki düşüş eğrilerinin aynı olması; dolayısıyla lineerlik özelliğinin bir göstergesidir. Eğrilik parametresiyle arasındaki ilişkiler incelendiğinde EDT ve T30 farklarının fazla olduğu oktav bant değerlerinde ξ ve C parametreleri daha fazladır. Bu durum, farkın > 0.5 olduğu tek frekans değeri olan 500 Hz ve diğer frekanslardaki parametreler üzerinden incelenebilir.

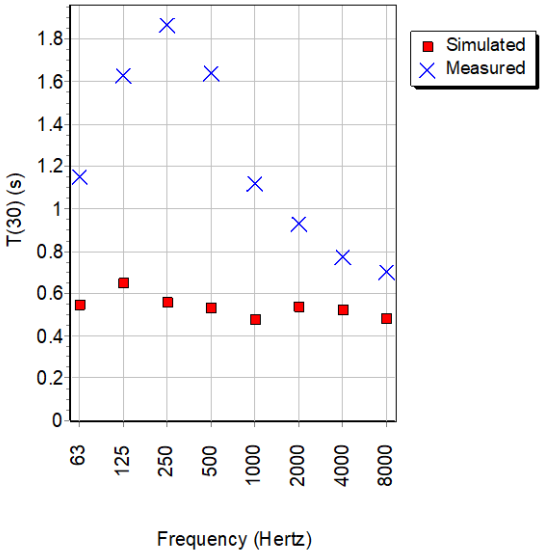
24.5 dB G ve 0.73 STI değerleri iletişim kalitesi ve müzik gürlüğünün esas alındığı bir ortam açısından uygun bir ortam hazırlar. Modeldeki çınlama süresi ve ortalama emicilikten gelen teorik G değeri ise 23.71 dB'dir. Bu model, -7.3 dB ses azaltma etkisine sahiptir. 501 modeli çalgı uyumluluk listesi Tablo 22'de sunulmuştur.

Tablo 22- 501 modeli çalgı uyumluluk listesi

Çalgılar	**Ses seviyesi (dB)**	**G (dB) ihtiyacı**	**Duyum seviyesi (dB)**
Piyano	93	23-28	85.71 (uygun)
Keman	89	27-32	81.73 (zayıf)
Viyola	87	29-34	79.69 (çok zayıf)
Çello	90	26-31	82.7 (zayıf)
Gitar	86	30-35	79.59 (çok zayıf)
Flüt	91	25-30	83.84 (zayıf)
Klarnet	93	23-28	85.71 (uygun)
Bas klarnet	92	24-29	84.71 (ideale yakın)
Piyano + keman	94.5	21.5-26.5	86.68 (uygun)
Piyano + gitar	93.8	22.2-27.2	86.5 (uygun)
Keman + viyola	91.13	24.8-29.8	83.85 (zayıf)
Keman + keman	92.04	24-29	84.75 (ideale yakın)
Viyola + viyola	90	26-31	82.70 (zayıf)
Alto	93	23-28	85.71 (uygun)
Tenor	95.05	21-26	87.75 (uygun)
Bas	96	20-25	88.72 (uygun)
Soprano	97	19-24	89.69 (uygun)
Alto + tenor	97	19-24	89.86 (uygun)

501 modeli, tüm yaylı çalgılarda bireysel çalışmalar için uygun değilken ikili çalışmalarda 84-85 dB değerlerinde bir ses duyumu sağlarlar. Piyano eşlikli tüm yaylı çalgılar ise bu modelle tam olarak uyum göstermektedir. Vokal gruplarının tümü bireysel çalışma için uygunken bu modelde diğer modellerden farklı olarak alto ve tenor ikilisinin

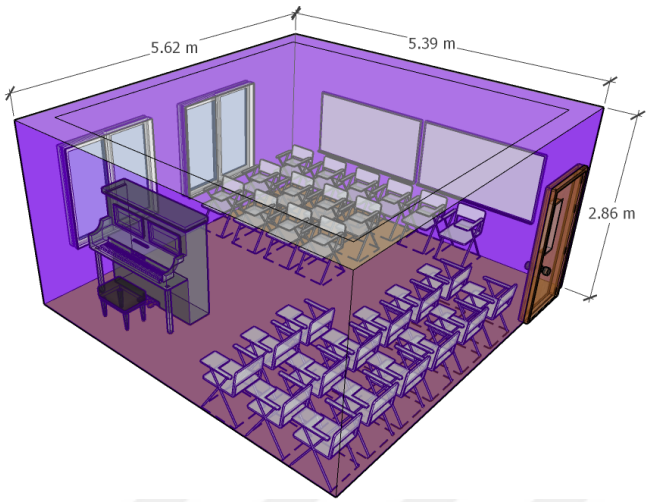
90 dB üst limitinin biraz altında kalarak uyum gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu model için farklı panel konfigürasyonlarıyla oluşturulan 0.58 s ortalama çınlama değerli bir başka simülasyon, 24.9 dB Odeon G ve 24.37 dB teorik G değerleriyle sonuçlanmıştır. Teorik G değerinde ortalama emiciliğin aşırı arttırıldığı; çınlama değerinin üst sınırda olduğu durumlarda bile yaylı çalgılar 83 dB duyum ile zayıf kalmaktadır. Bu sebeple değişken akustik için herhangi bir ikinci bir konfigürasyon noktası keşfedilememiştir. 501 modeli simülasyonlar sonrası karşılaştırma Şekil 37'de gösterilmiştir.



Şekil 37- 501 modeli simülasyonlar sonrası karşılaştırma

6.4 311 Modeli

311 modeli, incelenen modeller arasındaki en büyük hacim olup uygun bir oda oranı sunar. 86.63 m^3 hacim ve 123.56 m^2 yüzey alanı büyüklüğündedir. Genişlik ve uzunluk eksenlerinin birbirine yakın olması iki eksendeki ses yansımalarının ve ses alanlarının aynı olmasına sebep olur. 311 sınıfı akustik simülasyon öncesi model Şekil 38'te gösterilmiştir.



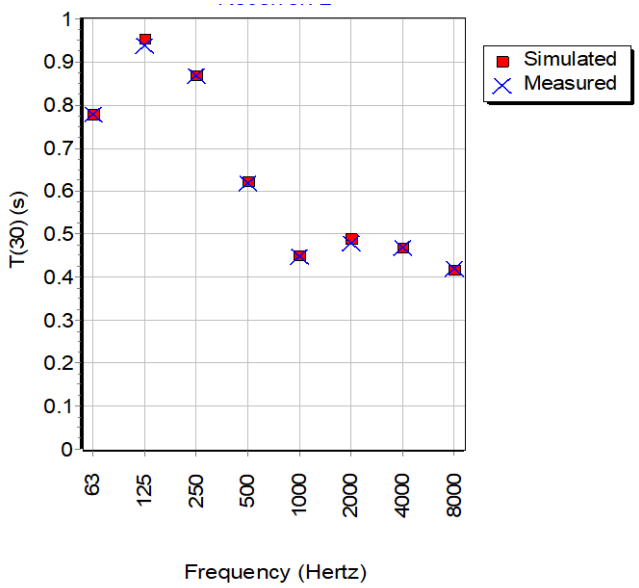
Şekil 38- 311 sınıfı akustik simülasyon öncesi model

6.4.1 Genetik Optimizasyon

311 modeli, aynı zamanda teorik derslerin de işlendiği bir sınıf olduğu için zemin yüzeyinde oldukça geniş bir sandalye alanı; yan duvarlarda ikişer beyaz tahta ve pencere içerir. Aynı zamanda sandalyelerin yarısında daha güçlü bir emici olan deri yüzey kaplanmıştır. Diğer yarısında ise kumaş tarzı daha gözenekli bir yüzey mevcuttur. Kare formun da etkisiyle incelenen modeller arasındaki sapma değeri en yüksek çınlama spektrumuna sahiptir. 311 modeli mevcut durum emicilik değerleri ve simülasyon sonuçları Tablo 23'te gösterilmiştir. 311 modelinde GO ve ölçüm sonuçları karşılaştırması Şekil 39'da gösterilmiştir.

Tablo 23- 311 modeli mevcut durum emicilik değerleri ve simülasyon sonuçları

	Frekans (Hz)							
	63	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
Duvar (α)	0.10	0.13	0.02	0.06	0.18	0.16	0.16	0.12
Tavan (α)	0.18	0.04	0.21	0.11	0.26	0.08	0.08	0.12
Kapı (α)	0.05	0.05	0.08	0.06	0.09	0.04	0.03	0.02
Sandalye alanı (α)	0.23	0.17	0.46	0.71	0.95	0.77	0.72	0.75
Pencere (α)	0.19	0.06	0.05	0.13	0.02	0.10	0.05	0.05
T30 (s)	0.78	0.96	0.87	0.62	0.45	0.49	0.47	0.42
G (dB)				24.3	22.6			
STI	0.77							



Şekil 39- 311 modelinde GO ve ölçüm sonuçları karşılaştırması

6.4.2 Akustik Simülasyon

Mevcut malzemeler, bir müzik prova odası açısından orta frekanslarda uygun bir G ikilisi sunar. Ancak bu kontrolsüz emicilik, bas ve tiz frekansların çınlama farklarını oldukça arttırmıştır. ISO23591 açısından sağlanması gereken çınlama düşünüldüğünde ortalama değer, yüksek ve düşük sesli tasarıma yönelik 0.62 ve 0.66 s aralığında olmalıdır. 1 kHz değeri bu aralığın çok altında olsa da 500 Hz değeri tam olarak sınırdadır. 1 kHz frekansında çınlamanın az olmasının bir diğer sebebi ise tavan ve duvar gibi geniş yüzeylere dağıtılan alfa değerlerinin aynı yüzeyler için 500 Hz'e göre iki veya üç kat büyük olmasıdır. Bu sebeple GO ve gerçek ölçüm sonuçlarına göre 1 kHz için kontrollü bir sabine ihtiyacı olduğu açıktır. Tiz frekanslar ise hedef çınlama ortalamasıyla olması gereken oranın altında değerlere sahiptir. Tüm bu etkilerle oluşturulacak en etkili panel konfigürasyonlarının daha kolay belirlenebilmesi adına mevcut durumda iyileştirme önerileri sunulmuştur.

Mevcut durumdaki ilk iyileştirme sandalye alanını iki eksende tek sıra kaplayacak şekilde azaltmadır. Böylece zemindeki deri ve kumaş sandalye yüzeylerden kaynaklanan emicilik değerleri azaltılmıştır. Tüm sandalyeler, test ortamında ölçülmüş piyasa araştırmalarıyla bulunan daha hafif malzemeli bir sandalye modeliyle

değiştirilmiştir. 311 modelinde alan ve emiciliği azaltılmış sandalye alanının etkisi Tablo 24'te gösterilmiştir.

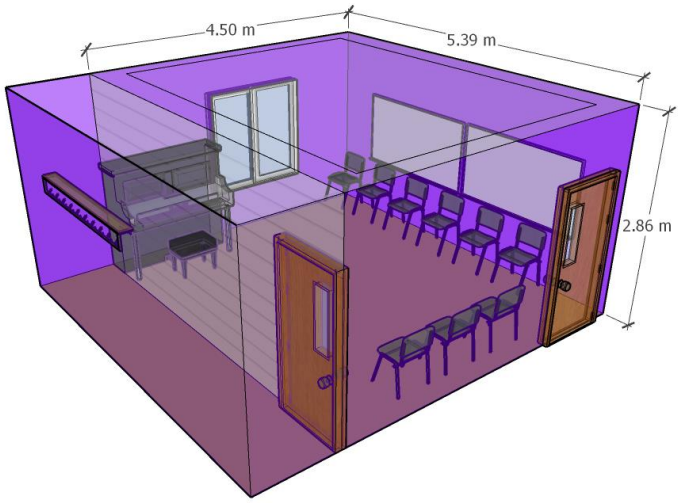
Tablo 24- 311 modelinde alanı ve emiciliği azaltılmış sandalye alanının etkisi

	Frekans (Hz)							
	63	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
Sandalye (α)	0.01	0.01	0.10	0.20	0.40	0.60	0.70	0.70
Eski T30 (s)	0.78	0.96	0.87	0.62	0.45	0.49	0.47	0.42
Yeni T30 (s)	1.18	1.57	1.79	1.39	0.61	0.62	0.59	0.48

Modeldeki bir diğer değişiklik bas frekans kontrolü sağlamak adına boyutlar üzerinden gerçekleştirilmiştir. 311 modeli, 5.62 m×5.39 m×2.86 m boyutlarının etkisiyle sadece IEC açısından ideal bir oda oranına (1:1.88:1.96) sahiptir. Oran konumunun ISO23591 standardında sunulan optimum çizginin sağında yer almasından ötürü yatayda açılandırma veya eksen kısaltma ile boyut optimizasyon yöntemlerinden birisi seçilebilir. Böylece sola doğru kayan oda oranı hem EBU hem IEC hem de Bolt alanına dâhil olacaktır. Bu işlem, optimum bir modal spektrum sunmasıyla birlikte kare formu önlemektedir. Oluşan küçük bölme çalgılar ve kişisel eşyalar için kullanılabilir.

Optimizasyon, azalmış bir hacimle sonuçlanacağı için değişimin daha az olması adına direkt olarak optimum çizgi hedef alınmamış daha kontrollü bir eksen kısaltma tercih edilmiştir. Hedef oran, Bolt alanının sağ sınırına yakın bir bölgeden seçilerek 1:1.57:1.88 olarak seçilmiştir. Bu oda oranı, eksen değişikliği seçilerek genişlikte 1.12 m kısaltmayla sağlanabilir. Öte yandan Bolt alanında aynı noktayı sağlayan bir diğer yol uzunluk ekseninde yapılan 12° açılandırmadır. Eksen kısaltmanın oda arkasında kullanıcıya yönelik ikinci bir küçük hacim yaratması avantajından ötürü öncelikli olarak

bu yöntem seçilmiştir. 311 sınıfı boyut optimizasyonu sonrası model Şekil 40'ta gösterilmiştir.



Şekil 40- 311 sınıfı boyut optimizasyonu sonrası model

Eski oda oranı incelendiğinde uzunluk ve genişlik eksenlerindeki temel eksenel frekanslar birbirine çok yakındır. İki eksenin birbirine çok yakın olması temel ve harmonik tüm eksenel frekanslarda çakışmaların ve istenmeyen aşırılıkların olacağını gösterir. Yeni oda oranı ise eksenel frekansların bir öncekinin en az yüzde 5'i kadar uzakta olması önerisiyle uyumlu bir sonuç verir. 311 modeli boyut optimizasyonun modal spektrumdaki etkisi Tablo 25'te gösterilmiştir.

Tablo 25- 311 modeli boyut optimizasyonun modal spektrumdaki etkisi

Modal Frekans	**1:1.88:1.96**	**1:1.57:1.88**
1-0-0	30.52 Hz	31.82 Hz
0-1-0	31.82 Hz	38.11 Hz
0-0-1	59.97 Hz	59.97 Hz
2-0-0	61.03 Hz	63.64 Hz
0-2-0	63.64 Hz	76.22 Hz
3-0-0	91.55 Hz	95.45 Hz
0-3-0	95.45 Hz	114.33 Hz
0-0-2	119.93 Hz	119.93 Hz

Panel yerleşimlerinden önce GO ile güncellenen materyallerin küçültülmüş hacimde tekrar analiz edilmesi gerekir. Hacim değeri 69 m^3 olarak değişmiş olup yeni uygun çınlama aralığı 0.56 – 0.60 s'dir. Küçültülmüş hacimdeki parametre sonuçları Tablo 26'da sunulmuştur.

Tablo 26- Küçültülmüş hacimdeki parametre sonuçları

	Frekans (Hz)							
	63	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
T30 (s)	1.10	1.37	1.71	1.28	0.56	0.61	0. 54	0.47
EDT (s)	1.13	1.41	1.73	1.33	0.51	0.56	0.48	0.41
G (dB)				27.30	24.00			

Zemindeki güncellemeler sonrası azalan dinleyici alanının orta frekanslardaki etkisi kesin olarak izlenebilir ancak gerçek ölçümlerdeki piyano kasasının zemin yüzeyindeki rezonatör etkisi yeni simülasyon sonuçlarında yok olmuştur. 1 kHz değeri, alt limit olan 0.56 saniyeye ulaşarak mevcut durumda kontrollü bir ek Sabine gereksinimi doğurmuştur. 500 Hz frekansını eski değerine döndürebilmek için ise lokal emicilik sağlayan bir panele ihtiyaç vardır. Bu sebeple homojen bir ses dağılımı için 1 kHz değerinin yerleştirildikleri yüzeyle aynı olduğu panel modelleri seçilmiştir. Tavan ve duvarlardaki 1 kHz emicilikleri sırasıyla 0.3 ve 0.2 olduğu için bu değerlere yönelik bir araştırma yürütülmüştür.

Mevcut ve gereken Sabine arasındaki fark hesaplanarak 500 ve 1000 Hz'de ortalama olarak 0.5 emicilik sağlayan akustik panellerden en az 14 tane yerleştirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Ortalama çınlama değerinin 0.5 olabilmesi için 1 kHz frekansının 0.15-0.3 arasında; 500 Hz frekansının ise 0.7-0.85 kadar yüksek olması gerekmektedir. Bunun sonucunda teorik formüllerle hesaplanan ortalama çınlama değerinin 0.56 s olması ve iki frekansın birbirleriyle olan oranlarının 0.95-1.05 aralığında olması sağlanacaktır.

500 Hz ve 1 kHz frekanslarında emiciliklerin farklı olduğu akustik paneller için piyasadaki modeller arasından bir araştırma yürütülmüştür. Ancak, 1 kHz değerinde 0.3'ten düşük emicilik sağlayan 500 Hz'de güçlü panellere rastlanılmamıştır. Böyle bir

emicilik, aynı alfa değeri sadece tavanda oluştuğu için tavan paneli olarak kullanılabilir. Panelleri tüm yüzeylere dağıtabilmek adına duvarlarda en fazla 0.2 emicilik sağlayan bir akustik panele daha ihtiyaç vardır. Bu sayede başarılı bir şekilde gerçekleştirilen GO; ilave Sabine ihtiyacı, eklenmiş emici alan ve homojen dağılım için elverişli bir şekilde kullanılmış olur.

İhtiyaca yönelik emicilikleri veren tasarım parametreleri ikinci bölümde aktarılan delikli panel rezonans frekansı formülü kullanılarak bulunmuştur. Açıklık yüzdesi arttıkça rezonans frekansı artar. Aynı açıklık yüzdesindeki delik çapı artışı ise rezonans frekansını azaltır. Bu bilgiler dâhilinde sonradan Zorba programında emicilik katsayılarını alabileceğimiz parametre değerleri hesaba alınarak hedefe yakın boyutlar ilk etapta belirlenmiştir. Yazılım, arkadaki gözenekli materyal dahil toplam panel kalınlığının 20-100 mm, delik aralığının 10-100 mm ve delik çapının 3-12 mm olduğu paneller için teorik ve test edilerek doğrulanmış sonuçları sunar. Piyasadan var olan ve akış direnci bilinen bir taş yünü seçmek ve bu boyutlar dâhilinde tasarımlar yapmak teorik denklemlerle birlikte etkin bir yol olacaktır. 500 Hz rezonans frekansı delikli panel teorik boyutları Tablo 27'de gösterilmiştir.

Tablo 27- 500 Hz rezonans frekansı için delikli panel teorik boyutları

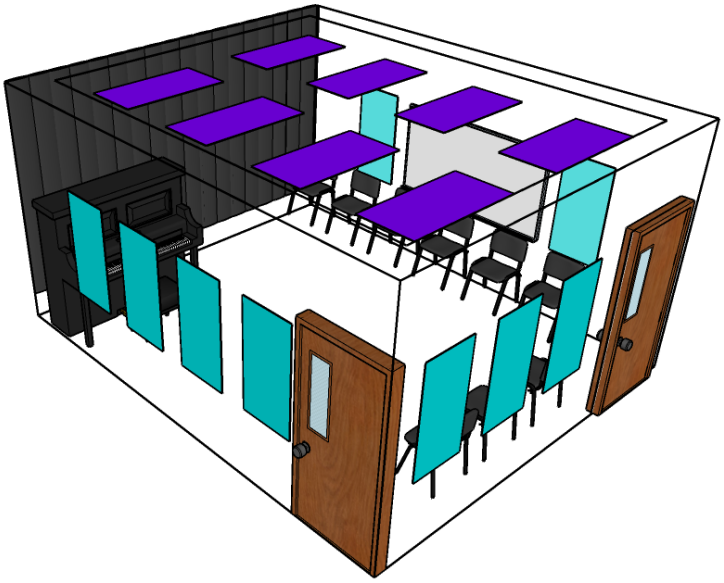
Açıklık Yüzdesi - p	6.8 %
Boşluk Kalınlığı - t	40 mm
Panel Kalınlığı – d mm	18 mm
Delik Çapı - D mm	3 mm
Rezonans Frekansı - f_r	503.22 Hz

Buradaki boyutlar Zorba programında akış direncinin 7000 rays/m olduğu bir taş yünü modeliyle 500 Hz için 0.95, 1 kHz için 0.3 değerini sunmaktadır. Akış direncinin düşük seçilmesinin sebebi daha yüksek değerlerin 1 kHz'deki emiciliği arttırmasıdır. Yazılımda rezonans bant genişliğinin 1 kHz'de daha düşük bir emiciliğe denk gelebilmesi için rezonans frekansı daha düşük bir değere kaydırılmıştır. E paneli 0.25 katsayısıyla tavan; F paneli ise 0.15 katsayısıyla yan duvarlara konmak üzere tasarlanmıştır. 311 modeli için E ve F delikli panellerine ait Zorba tasarım parametreleri Tablo 28'de

gösterilmiştir. 311 modeli akustik simülasyon panel yerleşimleri Şekil 41'de gösterilmiştir.

Tablo 28- 311 modeli için E - F delikli panellerine ait Zorba tasarım parametreleri

	Panel Bilgileri mm			**Boşluk Bilgileri**		**Frekans (Hz) (Delany-Bazley yöntemi ile)**							
				mm	**Rays/m**								
	p	D	d	t	σ	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
E	5.8	3	18	40	7000	0.01	0.25	0.90	0.90	0.25	0.10	0.05	0.20
F	4.2	3	18	40	7000	0.01	0.30	1.00	0.70	0.15	0.05	0.05	0.15



Şekil 41- 311 modeli akustik simülasyon panel yerleşimleri
(E paneli-mor, F paneli-turkuaz)

Panellere ek olarak Odeon kütüphanesinden seçilen "duvara direkt olarak asılmış hafif kadife perde" tanımla malzemenin pencere yüzeyini kapatması ve tiz frekans kontrolü sağlaması düşünülmüştür. Panellerin arka yüzeyinin gözenekli tabaka içermesi orta-bas bölgesinde bir kontrol sağlarken diğer tüm sınıflarda olduğu gibi alt-bas frekans bölgesine yönelik ek müdahaleler gerekecektir. 311 modelindeki emici malzemeler ve simülasyon sonuçları Tablo 29'da gösterilmiştir.

Tablo 29- 311 modelindeki emici malzemeler ve simülasyon sonuçları

	Frekans (Hz)							
	63	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
Panel E (α)	0.01	0.25	0.90	0.90	0.25	0.10	0.05	0.20
Panel F (α)	0.01	0.30	1.00	0.70	0.15	0.05	0.05	0.15
Perde (α)	0.03	0.03	0.04	0.11	0.17	0.24	0.35	0.35
T30 (s)	1.53	1.19	0.50	0.55	0.52	0.56	0.48	0.39
EDT (s)	1.54	1.19	0.56	0.57	0.54	0.59	0.49	0.37
C (%)	-0.2	-0.4	-10.7	-3	-2.4	-2.9	-4.2	-0.3
ξ (T30)	0.0	0.0	12.1	1.1	0.4	0.6	1.1	0.3
G (dB)	28.6	27.4	23.8	24.1	24.4	25.0	24.2	23.1
STI	0.71							

T30 değerleri özellikle orta frekanslarda hedef aralığın altında kalsa da EDT değerleri 0.56 ortalama değerini karşılamaktadır. Eğrilik parametrelerinde 250 Hz'deki aşırılıklar, EDT ve T30 değerleri arasındaki farkın bir diğer göstergesidir; ancak diğer tüm frekanslarda 0'a yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu modelde diğerlerinden farklı olarak tüm spektrumda güçlü olabilecek düz tepkili bir panel tercih edilememiştir. Bunun sebebi 1 kHz'deki kontrollü emicilik gereksinimidir. Bu sebeple genel bant üzerinden enerji kontrolü sağlanamadığından ilk etapta 0.77 olan STI değeri 0.71 değerine düşmüştür. Baslardaki bu kayıp düşük bant genişlikli alt-bas bölgesinde etkin bir rezonatör ile giderilebilir. 311 modeli için rezonatör boyutları Tablo 30'da gösterilmiştir.

Tablo 30- 311 modeli için rezonatör boyutları

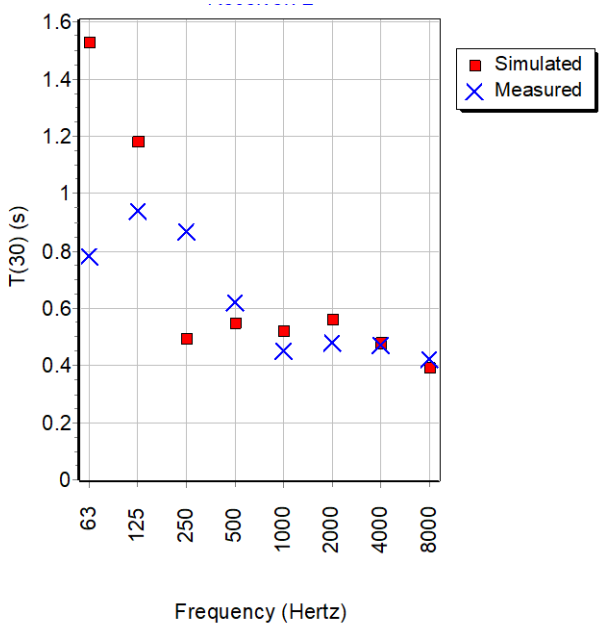
Hacim - V	45.88 Litre
Port alanı - A	63.62 cm^2
Port uzunluğu – I	18 cm
Delik Çapı - d	9 cm
Rezonans Frekansı - f_r	60.92 Hz

311 modelindeki teorik G değeri 23.04 dB olup yaklaşık -8 dB değerinde bir ses azalması sağlar. 311 modeli çalgı uyumluluk listesi Tablo 31'de sunulmuştur.

Tablo 31- 311 modeli çalgı uyumluluk listesi

Çalgılar	Ses seviyesi	G (dB) ihtiyacı	Duyum seviyesi (dB)
Piyano	93	23-28	85.00 (uygun)
Keman	89	27-32	81.00 (zayıf)
Viyola	87	29-34	79.00 (çok zayıf)
Çello	90	26-31	82.00 (zayıf)
Gitar	86	30-35	78.00 (çok zayıf)
Flüt	91	25-30	83.00 (zayıf)
Klarnet	93	23-28	85.00 (uygun)
Bas klarnet	92	24-29	84.00 (ideale yakın)
Piyano + keman	94.5	21.5-26.5	86.50 (uygun)
Piyano + gitar	93.8	22.2-27.2	85.80 (uygun)
Keman + viyola	91.13	24.8-29.8	83.13 (zayıf)
Keman + keman	92.04	24-29	84.04 (ideale yakın)
Viyola + viyola	90	26-31	82.00 (zayıf)
Yaylı dördül	95	21-26	87 (-)
Piyano + yaylılar	96.40	19.7-24.7	88.40 (-)
Alto	93	23-28	85.00 (uygun)
Tenor	95.05	21-26	87.05 (uygun)
Bas	96	20-25	88.00 (uygun)
Soprano	97	19-24	89 (uygun)
Alto + tenor	97	19-24	89 (uygun)

311 modeli, piyano ve klarnetin *forte* çalışında ses seviyesinin en çok azalabileceği ve gürültüsüz bir şekilde duyulabileceği en ideal oda olarak belirtilebilir. Yaylı çalgılardaki en düşük G değerinden ötürü en uyumsuz model burasıdır. Düşük sesli çalgıların piyano eşlikli çalışmaları için ise en uyumlu odalardan birisidir. Vokal grupları bireysel olarak çalışabilirler. Bu modelde diğerlerinden farklı olarak piyano eşlikli birer üç yaylı grubu ve yaylı dördül uyumlulukları da değerlendirilmiştir. Her iki grup da modelin G değeriyle uyumlu bir sonuç almıştır. 311 modeli simülasyon sonrası karşılaştırmalar Şekil 42'de gösterilmiştir.



Şekil 42- 311 modeli simülasyon sonrası karşılaştırmalar

DEĞERLENDİRME

Farklı büyüklük ve oda oranına sahip modeller üzerinde yürütülen akustik simülasyonlar ile akustik uygunluk sorgulamasında, müzik prova odaları için kabul gören en güncel yaklaşımlar izlenmiştir. ISO 23591:2021 standardındaki hacim, yükseklik ve oda oranı gibi sınırlandırmalar ancak mimari aşamada hayata geçebilecek kadar dar bir uygulama aralığı sunmaktadır. Bu çalışmada ülkemizdeki eğitim kurumlarında yaygın olarak karşılaşabileceğimiz dört farklı küçük hacim örneği üzerinde çalışılmıştır.

Akustik ölçümler ve genetik uygunlaştırma, modeller bazındaki farklılıkları değerlendirmeye almış, bu çalışmanın akustik iyileştirme yönünü güçlendirmiştir. İncelenen modellerde yükseklik değerlerinin farklı olması, asma tavanın boşluklarının farklı hacimlerde oluşu emicilik değer kalibrasyonunu zorlaştırmaktadır. Akustik ölçümler sayesinde aynı asma tavan modelinin sınıf içerisindeki farklı etkileri de analizin içine dâhil olmuş olur. Aydınlatma armatürleri ve tavan panelleri eş alanlı birim kareler halinde asma tavan yüzeyine dağıtılmıştır. Yüzey alanına bağlı aydınlık hesaplarından ötürü tavan yüzeyinin kaçta kaçının ışıklandırma için ayrıldığını Odeona yansıtmak simülasyondaki yüzey sayılarını arttıracağı için analiz doğruluğunu olumsuz etkiler. GO sayesinde yüzey tek bir parça halinde hibrit olarak ele alınabilmiş ve buradan doğan farklar başlangıç Sabine değerlerinde kendisini olduğu gibi gösterebilmiştir.

Simülasyon sonuçları; teorik panel sayısı, G değeri, çınlama değerleriyle örtüşmektedir. Parametre gruplarının birbirileriyle olan ilişkilerinin tutarlı olduğu gözlenmiştir. Hacim ve parametre gruplarındaki değişim ilişkileri olması gerektiği gibi sonuçlara yansımıştır.

ISO23591 standardının çoğunlukla G ve RT değerlerine olan uyumlulukları üzerinde çalışılmış; yükseklik ve oda oranı uyumsuzlukları sınıflara verim katmak adına olabildiğince göz ardı edilmiştir. Simülasyon, her bir model için Schroeder frekansı ve üstünde güvenilir sonuçlar sağlamıştır. Seçilen hacim ve çınlama değerlerinde bu değer 125 Hz ve 250 Hz arasında değişmektedir. Seçilen paneller, arkasındaki gözenekli

malzemelerden ötürü 125 Hz değerinde kesin olarak bir kontrol sağlayacaktır. 63 Hz'de elde edilen sonuçlar Odeon'un malzeme tanımlanırken gerçekleştirdiği ekstrapolasyon yöntemiyle belirlenmiştir. Bu sonuçların 125 Hz frekansındaki kadar üstün bir performans göstermesi tartışmalı olacağı için özellikle çınlama dengesinin iyi ayarlandığı bir akustik iyileştirme sonrasında sadece 100 Hz frekansına kadar etkili çözümlerin odaya dâhil edilmesi gerektiği düşünülmektedir. Teorik Sabine değeriyle de örtüşen bir Odeon konfigürasyonundan sonra akustik ölçümler gerçekleştirilebilir ve dengeyi bozmayacak bir müdahaleyle alçak frekans bölgesindeki frekans tepkisinin düzleşmesi sağlanabilir.

SONUÇ

Bu çalışmada farklı tipteki müzik sınıflarındaki uygun akustik koşulların incelenmesi ve karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bunun yanında her bir çalgı grubunun dâhil edilebileceği hacim ve çınlama değerleri belirlenmiş; en etkin ve kapsayıcı kullanım yöntemleri denenmiştir.

311 ve 501 modellerindeki yüzey alanı form farlılıkları, panel yerleşimlerinde birtakım farklı tercihlere sebep olmuştur. Uzun dikdörtgen bir yapıdaki 501 ve 104 modelleri, sadece uzunluk eksenindeki iki yanal duvara ve yükseklik eksenindeki tavan yüzeyine panel yerleşimleri için uygun olarak bulunmuştur. Bu sınırlayıcılık, yüksek panel sayıları gerektiğinde her bir panelin karşı yüzeyini boş bırakmayı zorlaştırmıştır. Bu gibi odalarda iki farklı ağırlıklı emicilikte panel tipi varsa bunları çapraz yerleştirmenin eğrilik parametresini azalttığı gözlenmiştir. 501 gibi kare form ve daha geniş hacimli odalarda eksenlerden birisinin panel kullanımlarına ayrılabileceği veya boşluklu çapraz panellerin tercih edilebileceği anlaşılmıştır. Panel yerleşimlerindeki bir diğer bulgu, ses alanına en uzak yüzey olan tavandaki panellerin geç dürtü tepkisi bölgesinde daha lineer bir dürtü tepkisi düşüşü sağladığı yönündedir.

Özellikle küçük hacimlerde düşük ve yüksek sesli çalgılara yönelik çınlama aralıklarının kesişimlerini hedef almak oda içerisinde daha çok çalgının birlikte çalışabilmesine olanak sağlayacaktır. Bu kesişim bölgesi ilk etapta piyano uyumluluğunu korurken aynı zamanda en gürültülü duyumu verse de yüksek sesli enstrümanların düşük

seviyeli olanlarını odaya dâhil edebilmektedir. Piyano, k değeri 2 olmasına rağmen düşük sesli müzik bölgesinde de uyumlu sonuçlar verir. Ancak buralarda daha gür (> 87 dB *forte* için) duyulmaktadır. Bu sebeple değişken akustik kurulumuna sahip sınıflarda *fortissimo* seslendirmelerin kesişim bölgesinde çalışılması daha uygun olacaktır. *Pianissimo* çalışlarda tuşe gücünü ayarlamak bir piyano öğrencisi için zor olabilir. Odanın sesi 1-2 dB daha fazla azaltması, *pianissimo* duyumu destekleyen yapay ve fark edilebilir bir etki olacaktır. Bu sebeple yüksek çınlamalı konfigürasyonun düşük dinamik seviyelerde öğrenciye daha çok gelişim sağlayacağı düşünülmektedir. Değişken akustik dinamik çeşitlilikte bu şekilde kullanılabilir. Zaman zaman kural dışına çıkmak farklı ortam ve akustik nitelikleri deneyimlemek adına da öğrenciye fayda sağlayacaktır.

Yaylı gruplarındaki G gereksinimi 27-32 dB olduğu için 26 dB seviyesinin aşılmaması kuralıyla ters düşer. Bu sebeple yaylı çalgı uyumluluğunu standartta sunulan hacim aralığının en düşük değerlerinde aramak ve 26 dB'yi biraz aşan değerleri optimum kabul etmek uygun bir yol olacaktır. Kesişim bölgesinde tasarlanan bir oda düşük seviyeli müzik bölgesinde en az duyuma karşılık gelir. Bu sebeple 101 modelinde olduğu gibi değişken akustikle kesişim bölgesinin üstüne çıkmak yaylı çalgıların bireysel çalışması için uygun bir ortam yaratır. Yaylı çalgılar için geliştirilen bu yaklaşım, standart tarafından sunulan hacim aralıklarının alt limitine yakın bölgelerde çalışır.

Müzik prova odalarındaki yüksek emicilik gereksinimi müzikte netlik sağlarken konuşma işlevi için de uygun bir ortam yaratacaktır. Bu durum öğretmen ve öğrenci arasındaki konuşma anlaşılırlığını da olumlu etkileyecektir. Sonuçlara bakıldığında STI değerleri akustik iyileştirmeyle artmaktadır ancak hacim arttıkça iyileştirme sonrası STI değerleri azalmaktadır. Düşük çınlama değeri gereksinimi dolayısıyla STI değerleri tüm iyileştirme sonrası modellerde özellikle küçük hacimler için konuşacak olursak 1'e yakın olarak gözlenmiştir.

KAYNAKÇA

Kitaplar

Ballou, G. (2008). Handbook for sound engineers. Taylor & Francis.

Berg, R. E., & Stork, D. G. (2005). The physics of sound. Pearson Education India.

Cox, T., & D'Antonio, P. (2016). Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application. Crc Press.

Everest, F. A. (2001). *Master handbook of acoustics*. McGraw-Hill Education.

Gray, D. E. (1972). American institute of physics handbook.

Hartmann, W. M. (2013). Principles of musical acoustics. Springer Science & Business Media.

Howard, D., & Angus, J. (2013). Acoustics and psychoacoustics. Routledge.

Long, M. (2006). Architectural acoustics. Elsevier.

Lyons, R. G. (1997). Understanding digital signal processing, 3/E. Pearson Education India.

Maekawa, Z., Rindel, J., & Lord, P. (2010). Environmental and architectural acoustics. CRC Press.

Meyer, J. (2009). Acoustics and the performance of music: Manual for acousticians, audio engineers, musicians, architects and musical instrument makers. Springer Science & Business Media.

Müller, M. (2021). Fundamentals of music processing: Using Python and Jupyter notebooks (Vol. 2). Cham: Springer.

Pedersen, K., & Grimshaw-Aagaard, M. (2018). The Recording, Mixing, and Mastering Reference Handbook. Oxford University Press

Rossing, T. D. (2014). Springer handbook of acoustics. Springer New York.

Winer, E. (2012). The audio expert: everything you need to know about audio. Routledge

Makaleler ve Raporlar

Cox, T. J., D'Antonio, P., & Avis, M. R. (2004). Room sizing and optimization at low frequencies. Journal of the Audio Engineering Society, 52(6), 640-651.

Durmaz, S., & Zerafet, A. Müzik Prova Odalarında Açılı Duvarların Oda Frekans Tepkisi Üzerindeki Etkileri: İzmir Devlet Konservatuvarı ve Işılay Saygın Lisesi Örneği. Yedi, 55-67.

Durmaz, S., Işıkhan C. ve Karaman, Ö. Y. (2021). MEB Eğitim kurumlarındaki müzik etüt sınıflarında akustik konfor ve gürültü kirliliğinin araştırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi. 2020-KB-FEN-025

Lundeby, A., Vigran, T. E., Bietz, H., & Vorländer, M. (1995). Uncertainties of measurements in room acoustics. Acta Acustica united with Acustica, 81(4), 344-355.

Nijs, L., & de Vries, D. (2005). The young architect's guide to room acoustics. Acoustical science and technology, 26(2), 229-232.

Rindel, J. H. (2015). Modal energy analysis of nearly rectangular rooms at low frequencies. Acta Acustica united with Acustica, 101(6), 1211-1221

Rindel, J. H. (2021). Preferred dimension ratios of small rectangular rooms. JASA Express Letters, 1(2), 021601.

Seddeq, H. S. (2009). Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials. Australian journal of basic and applied sciences, 3(4), 4610-4617.

Bildiriler

Białek, J., & Nowıcka, E. (2016). Comparison of sound absorption ratings calculated according to ISO and ASTM. Standards. Conference: LXIII Open Seminar on Acoustics, Bialowieza, Warsaw.

Christensen, C. L., Koutsouris, G., & Rindel, J. H. (2013, June). The ISO 3382 parameters: Can we simulate them? Can we measure them. In Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, Toronto, ON, Canada (Vol. 910).

Heringa, P., Isbrücker, D., & Valk, M. (2009). Variability and Adaptability of the Acoustics in the new Conservatory of Amsterdam. NAG/DAGA Rotterdam.

Knöfel, B., Weisheit, L., & Troge, J. (2018). Musicians and their practice rooms: What do they think about present room acoustics and what would they prefer?. In Euronoise 2018-Conference Proceedings (pp. 2183-2188).

Mansilla, J., Sato, S. I., Rodiño, L., Arias, A., Masson, F., & De Palma, I. C. (2015, August). Comparison of room acoustic parameters calculated by different types of software. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings (Vol. 250, No. 3, pp. 3333-3343). Institute of Noise Control Engineering.

Osman, R. (2010, August). Designing small music practice rooms for sound quality. In INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS (Vol. 20).

Rindel, J. H. (2014, September). New Norwegian standard on the acoustics of rooms for music rehearsal and performance. In Proceedings of Forum Acusticum Krakow.

Rindel, J. H. (2022). On the importance of sound strength in music rehearsal rooms. In Proceedings of DAGA (pp. 21-24).

Tezler

Ågren, G., & Wenzke, E. (2017). Methods to evaluate room acoustical preferences regarding practice rooms-A study focusing on drummers and percussionists (Master's thesis).

Gonzalez, V. G. (2009). Acoustic study and conditioning for Kirche Am Hohenzollernplatz in Berlin (Doctoral dissertation, PhD Thesis, Institut Fur Technische Akustik).

Lombardo, A. (2019). Classroom acoustics design: algorithms to optimize typology, extension and position of acoustic materials to improve teaching-learning activities (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).

Standart ve Yönergeler

Daniels, R., & Bodkin, A. (2015). Acoustic design of schools: performance standards Building bulletin 93.

IEC (1996). "61260; Electroacoustics - Octave-Band and Fractional-Octave-Band Filters". International Electotechnical Commussion.

ISO 23591 (2021). "Acoustic quality criteria for music rehearsal rooms and spaces".

NS 8178 (2014). "Norwegian Standart; Acoustic Criteria for rooms and spaces for musical rehearsal and performance".

TSE ISO (2010). "3382-1; Akustik - Odaların akustik parametrelerinin ölçülmesi – Bölüm 1: Gösteri mekanları". Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

TSE ISO (2009). "3382-2; Akustik - Odaların akustik parametrelerinin ölçülmesi – Bölüm 2: Sıradan odalarda çınlama süresi". Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

Yazılımlar ve Kullanım Kılavuzları

ODEON: Odeon Room Acoustics Software Auditorium (ver.13)

ZORBA: Users Manual, Marshal Day Acoustics

İnternet Kaynakları

A Paneli, Decustik PE010, https://www.decustik.com/arxius/docs/1655904455_eng_Technical%20Data%20Sheet%20PE010%202022.pdf (Erişim Tarihi: 28.04.2023)

B Paneli, Decustik PAP045 https://www.decustik.com/arxius/docs/FTP_PAP045_2015_uk.pdf (Erişim Tarihi: 28.04.2023)

C Paneli, Decustik PAP025, https://www.decustik.com/arxius/docs/FTP_PAP025_2015_uk.pdf (Erişim Tarihi: 28.04.2023)

D Paneli, Gustafs PD8, https://koi- 3qno6nbll8.marketingautomation.services/net/m?md=HNTwKJWr0i%2FADrxZcp0x8h15TPwkfG8q (Erişim Tarihi: 28.04.2023)

EK 1: Her bir sınıf için çalgı uyumluluk listesi

		OTURTUMLAR				
		101 (23 m^3)		104 (40 m^3)	501 (55 m^3)	311 (69 m^3)
	RT	0.32 s	0.4 s	0.45 s	0.51 s	0.55 s
	G	25.2 dB	26.42 dB	24.57 dB	23.71 dB	23.04 dB
TEMEL	Piyano	★		★	★	★
DÜŞÜK SESLİ ÇALGILAR	Gitar	☆	☆	☆	☆	☆
	Keman	★	★	☆	☆	☆
	Viyola	☆	☆	☆	☆	☆
	Çello	★	★	★	☆	☆
	Piyano + gitar			★	★	★
	Piyano + keman			★	★	★
	Keman + viyola			★	★	★
	Keman + keman			★	★	★
	Viyola + viyola			★	☆	☆
	Yaylı dördül					★
	Piyano + yaylılar					★
YÜKSEK SESLİ ÇALGILAR	Flüt	★		★	☆	★
	Klarnet	★		★	★	★
	Trampet					
	Bass drum					
	Bas klarnet	★		★	★	★
VOKAL	Alto	★		★	★	★
	Tenor	★		★	★	★
	Bas			★	★	★
	Soprano				★	★

☆ zayıf

★ ideale yakın

★ ideal

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Atakan Zerafet

Yabancı dil: İngilizce

Eğitim:

- Yüksek Lisans: 2018, Dokuz Eylül Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, Müzik Teknolojisi
- Lisans: 2013, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- Lise: 2009, Narlıdere Cahide-Ahmet Dalyanoğlu Anadolu Lisesi

İş Tecrübesi:

- 2016, Standard Profil Ege Otomotiv A.Ş., Elektrik-Elektronik Mühendisi Stajyer
- 2015, Work & Travel, Öğrenci

TEZ'den Üretilmiş Yayınlar:

Makaleler:

Durmaz, S., & Zerafet, A. Müzik Prova Odalarında Açılı Duvarların Oda Frekans Tepkisi Üzerindeki Etkileri: İzmir Devlet Konservatuvarı ve Işılay Saygın Lisesi Örneği. Yedi, 55-67.

(https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2193749)