İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜÇÜK HACİMLERDE DURAĞAN DALGALARIN (MODLARIN) ODA GEOMETRİSİ VE ODA ORANLARI İLE İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlkay SEFER

Mimarlık Anabilim Dalı

Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi Programı

TEMMUZ 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜÇÜK HACİMLERDE DURAĞAN DALGALARIN (MODLARIN) ODA GEOMETRİSİ VE ODA ORANLARI İLE İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlkay SEFER
(502161534)

Mimarlık Anabilim Dalı

Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sevtap YILMAZ

TEMMUZ 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 502161534 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi İlkay SEFER, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "KÜÇÜK HACİMLERDE DURAĞAN DALGALARIN (MODLARIN) ODA GEOMETRİSİ VE ODA ORANLARI İLE İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Gül KOÇLAR ORAL** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mine AŞÇIGİL DİNÇER .....
Bahçeşehir Üniversitesi

Teslim Tarihi : 15 Haziran 2020
Savunma Tarihi : 21 Temmuz 2020

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında küçük hacim akustik parametrelerinin en önemlilerinden biri olan oda modlarının, oda oranları ve şekil özellikleri ile ilişkisi incelenmiştir. Tasarımın başlangıç aşamasında mekânın görsel algı için olduğu kadar ses ihtiyacını da karşılayacak şekilde tasarlanması amaçlanmıştır.

Yüksekl lisans eğitimim boyunca ve tez çalışması sürecinde bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, bu süreçte ilgi ve desteğini esirgemeyen tez danışmanın Prof. Dr. Sevtap YILMAZ'a; eğitimim boyunca bilgilerinden yararlandığım Dr. Öğretim Üyesi Nurgün Tamer BAYAZIT'a, lisans eğitimim sırasında tanıştığım ve ders aldığım Y. Mühendis Türker TALAYMAN ve tüm ders yürütücülerime ve her zaman yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Haziran 2020

İlkay Sefer
(Mimar)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ix
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xxv**
SUMMARY ..... **xxvii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Çalışmanın Amacı 2
1.2 Çalışmanın Kapsamı ve Yöntemi 2
1.3 Mimaride Oran Sisteminin Tarihçesi 2
2. KÜÇÜK ODALARDA ORAN TÜRLERİ, KÜÇÜK ODANIN AKUSTİK OLARAK TANIMI VE KÜÇÜK ODA TASARIM PARAMETRELERİ **5**
2.1 Küçük Odalarda Genel Oran Türleri, Akustik Oran Türleri ve Küçük Odanın Akustik Olarak Tanımı 5
2.1.1 Genel oran türleri 5
2.1.2 Akustik oran türleri 9
2.1.3 Küçük odanın akustik olarak tanımı 12
2.2 Küçük Oda Tasarım Parametreleri 17
2.2.1 Oda modları 19
2.2.1.1 Frekans bölgesi 23
2.2.1.2 Mod düşüşü ve mod bant genişliği 25
2.2.1.3 Mod basınç alanları ve modal yoğunluk 26
2.2.1.4 Bonello kriteri, mod aralığı ve renklenme 27
2.2.2 Tekrarlayan eko 29
2.2.3 Çınlama 31
2.2.4 Gürültü kontrolü 34
3. SESİN YANSIMASI, YUTULMASI VE YAYILMASI **37**
3.1 Sesin Yansıması 38
3.1.1 Yansımalar arasındaki ortalama mesafe 38
3.1.2 Yansımalarının algılanması 39
3.2 Sesin Yutulması ve Ses Yutucu Malzeme ve Konstrüksiyonları 41
3.2.1 Gözenekli emiciler 43
3.2.1.1 Mineral/doğal elyaf ve akustik köpükler 43
3.2.1.2 Akustik karolar ve sıva uygulamaları 44
3.2.1.3 Halı, perde ve akustik baffle 44
3.2.1.4 İnsanlar, koltuklar, mobilyalar ve diğer nesneler 45
3.2.2 Membran Emiciler 45
3.2.3 Rezonant Emiciler 46

3.2.3.1 Delikli membran emiciler 47
3.2.3.2 Helmholtz rezonatörleri 48
3.2.3.3 Lata emiciler 49
3.2.4 Emiciliğin etkisi 49
3.3 Sesin Yayılması 50
3.3.1 Difüzyon ve ses alanı 51
3.3.2 Difüzör Tipleri 54
3.3.2.1 Matematiksel (sayısal) difüzörler 54
3.3.2.2 Fraktal difüzörler 58
3.3.2.3 Polisilindirik difüzörler 58
3.3.2.4 Hacim difüzörleri 59
3.3.2.5 Üç boyutlu difüzyon 60
3.3.2.6 Akustik beton bloklar 61
3.3.3 Difüzyon uygulamaları 61
3.3.4 Difüzörlerin modifikasyonu ve ses emme davranışları 62
4. KÜÇÜK ODALARIN AKUSTİK AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ 65
4.1 Küçük Odaların Tasarımı ve Değerlendirme Kabulleri 66
4.2 Küçük Oda Oranlarının Değerlendirilmesi 68
4.2.1 Birim kübün değerlendirilmesi, 1:1:1 70
4.2.2 Harmonik oranın değerlendirilmesi, 1:2:3 82
4.2.3 Altın oranın değerlendirilmesi, 1:2.26:1.6 94
4.2.4 Europan oranın değerlendirilmesi, 1:0.6:1.6 106
4.2.5 Alberti oranın değerlendirilmesi, 1:0.75:1.5 118
4.2.6 Alberti oranın değerlendirilmesi, 1:0.4:0.6 130
4.2.7 Alberti oranın değerlendirilmesi, 1:0.57:1.28 142
4.3 Küçük Oda Oranlarının Değerlendirilmesinin Sonucu 154
4.4 Birim Küp Hacmin Akustik Açıdan İncelemesi 161
4.4.1 Birim küp hacmin köşe ve yüzey şekillerinin değiştirilerek incelenmesi 162
4.4.2 Birim küp hacmin köşe ve yüzey şekillerinin değiştirilmesinin sonucu 208
5. SONUÇ 213
KAYNAKLAR 219
EKLER 222
ÖZGEÇMİŞ 234

KISALTMALAR

ANSI **:** Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü (American National Standarts Institute

AS **:** Avustralya Standardı (Standards Australia)

BB93 **:** Yapı Bülteni 93, İngiltere (Building Bulletin 93)

DfES **:** Eğitim ve Beceri Departmanı, İngiltere **(**Dept. for Education and Skills, United Kingdom)

ISO **:** Uluslararası Standardizasyon Örgütü (The International Organization for Standardization)

OCPS **:** Orange County Devlet Okulları Standardı (Orange County Public Schools Standards)

SAA **:** Ses Emme Ortalaması (Sound Absorption Avarage)

NRC **:** Gürültü Azaltma Katsayısı (Noise Reduction Coeffecient)

SEMBOLLER

A	**:** Alan, m^2
B	**:** Mod Bant Genişliği
c	**:** Sesin Havadaki Hızı, 343 m/s
dB	**:** Ses Basınç Düzeyi, desibel
Pa	**:** Ses Basıncı, Pascal
f	**:** Frekans, Hz.
f_c	**:** Kritik Frekans, Schroeder Frekansı, Hz.
HVAC	**:** Isıtma, Havalandırma, İklimlendirme Sistemleri
L, W, H	**:** Uzunluk, Genişlik, Yükseklik, m
L_x, L_y, L_z	**:** x, y, z Eksenleri Üzerindeki Uzunluk Birimi, m
N	**:** Mod Sayısı
NC	**:** Arka Plan Gürültüsü, dB
RT	**:** Çınlama Süresi, s
RT_{60}	**:** Çınlama Süresi (60 dB), s
S	**:** Toplam Yüzey Alanı, m^2
V	**:** Hacim, m^3
Δf	**:** Modlar Arasındaki Ortalama Mesafe, m
α	**:** Emicilik Katsayısı (Absorption Coefficient)
δ	**:** Saçılım Katsayısı (Scatterring Coefficient)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Genel mimari çarpanlar ve oranlar [9]. 7
Çizelge 2.2 : Küçük odalar için önerilen oda boyut oranları [20]. 12
Çizelge 2.3 : Gilford ve Bonello kriterlerinin koşulu ve reklenme durumu. 28
Çizelge 2.4 : Küçük müzik odaları için önerilen çınlama süreleri [20]. 33
Çizelge 2.5 : Stüdyo ve Dinleme Odaları Arkaplan-Gürültü Düzeyleri [2]. 36
Çizelge 3.1 : NRC, SAA ve αw ile Örnek Sabine Absorpsiyon Katsayısı (α_{SAB}) Spektrumu [3]. 42
Çizelge 4.1 : Oda oranları ve oran türleri 67
Çizelge 4.2 : Yükseklik boyutuna göre eşitlenmiş oda oranları 67
Çizelge 4.3 : Eşit hacim altında oda boyutları 67
Çizelge 4.4 : 1:1:1 oranlarına sahip hacmin ilk 30 aksiyel mod frekansları 72
Çizelge 4.5 : 1:1:1 oranlarına sahip hacmin ilk 4 aksiyel,teğet ve oblik mod frekansları. 75
Çizelge 4.6 : 1:2:3 oranlarına sahip hacmin ilk 30 aksiyel mod frekansları 84
Çizelge 4.7 : 1:2:3 oranlarına sahip hacmin ilk 4 aksiyel,teğet ve oblik mod frekansları. 88
Çizelge 4.8 : 1:2.26:1.6 oranlarına sahip hacmin ilk 30 aksiyel mod frekansları 96
Çizelge 4.9 : 1:2.26:1.6 oranlarına sahip hacmin ilk 4 aksiyel,teğet ve oblik mod frekansları. 100
Çizelge 4.10 : 1:0.6:1.6 oranlarına sahip hacmin ilk 30 aksiyel mod frekansları 108
Çizelge 4.11 : 1:0.6:1.6 oranlarına sahip hacmin ilk 4 aksiyel,teğet ve oblik mod frekansları. 112
Çizelge 4.12 : 1:0.75:1.5 oranlarına sahip hacmin ilk 30 aksiyel mod frekansları .. 120
Çizelge 4.13 : 1:0.75:1.5 oranlarına sahip hacmin ilk 4 aksiyel,teğet ve oblik mod frekansları. 124
Çizelge 4.14 : 1:0.4:0.6 oranlarına sahip hacmin ilk 30 aksiyel mod frekansları 132
Çizelge 4.15 : 1:0.4:0.6 oranlarına sahip hacmin ilk 4 aksiyel,teğet ve oblik mod frekansları. 136
Çizelge 4.16 : 1:0.57:1.28 oranlarına sahip hacmin ilk 30 aksiyel mod frekansları 144
Çizelge 4.17 : 1:0.57:1.28 oranlarına sahip hacmin ilk 4 aksiyel,teğet ve oblik mod frekansları. 148
Çizelge 4.18 : Hacim oranlarının, 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayıları. 154
Çizelge 4.19 : Hacimlerde modlar arasındaki mesafelerin oluşumu. 160
Çizelge 4.20 : 1:1:1 oranlarına sahip hacmin frekans ve dalga boyu değerleri 161
Çizelge 4.21 : Birinci hacmin ilk ilk 4 aksiyel,teğet, oblik frekansları. 164
Çizelge 4.22 : Üçüncü hacmin ilk 4 aksiyel,teğet, oblik mod frekansları. 175
Çizelge 4.23 : Dördüncü hacmin ilk 4 aksiyel,teğet, oblik mod frekansları 186
Çizelge 4.24 : Sekizinci hacmin ilk 4 aksiyel,teğet, oblik mod frekansları 200
Çizelge 5.1 : Mimari tasarım açısından hacimlerin değerlendirilmesi. 216

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Birime eklenmenin üç yolu [9]. 6
Şekil 2.2 : Plan ve hacim düzleminde altın oran [9]. 8
Şekil 2.3 : Alberti tarafından önerilen oda oranları [9]. 9
Şekil 2.4 : Dikdörtgen bir odanın Bolt tarafından önerilen boyutları [2]. 10
Şekil 2.5 : Bir odadaki frekans cevabı. 15
Şekil 2.6 : Bir sınıf veya prova odasının tasarımı [2]. 18
Şekil 2.7 : İki paralel yüzey arasında bir ses dalgasının yansıması [6]. 19
Şekil 2.8 : Aksiyel, Teget ve Eğik Modlar [6]. 21
Şekil 2.9 : Düşük frekanslı modal basınç dağılımlarının gösterimi [1]. 22
Şekil 2.10 : Dört bölgeden oluşan duyulabilir frekans aralığı [1]. 24
Şekil 2.11 : Kararlı durum oda yanıtı [2,6]. 25
Şekil 2.12 : Mod bant genişliği [1]. 26
Şekil 2.13 : Mod-frekans ilişkisi [1]. 27
Şekil 2.14 : Tekrarlayan eko üreten geometrik olasılıklar [2]. 29
Şekil 2.15 : 500-1000 Hz aralığında çınlama süreleri [2]. 32
Şekil 2.16 : Müzik uygulama ve öğretim odaları arkaplan gürültü seviyeleri [2, 18]. 36
Şekil 3.1 : Zemin, tavan, yan duvarlar üzerinde erken yansımaları gösteren oda plan ve yükseklik görünümleri [1]. 38
Şekil 3.2 : Yansıma düzeyi (dB) ve yansıma gecikmesi (ms)[1,12]. 40
Şekil 3.3 : Farklı tür sinyal yansımalarının mutlak eşikleri [1]. 41
Şekil 3.4 : Saçılma,speküler yansıma oranı [5]. 51
Şekil 3.5 : A, Çift eğimli bozulma grafiği. B, İç bükey bozulma grafiği [1]. 53
Şekil 3.6 : (A) Farklı kuyu derinliği ile, (B) farklı empedans özelliği ile faz kaymasının sağlanması [5]. 55
Şekil 3.7 : Difüzör kesiti [5]. 55
Şekil 3.8 : p = 7 asal sayı QRD'nin iki periyodu [3]. 57
Şekil 3.9 : Kuyu yönüne göre değişen yayılma modelleri [1]. 57
Şekil 3.10 : Fraktal difizör [1]. 58
Şekil 3.11 : Polisilindirik difüzörün (A) ve düz panelin (B) ses yansıtma açıları [1]. 59
Şekil 3.12 : Tek ve üç boyutlu difüzyon modelleri [1]. 60
Şekil 3.13 : Izgara sistem difüzör [1]. 60
Şekil 3.14 : Emilim, yansıma ve difüzyonun fiziksel prensiplerinin karşılaştırılması [1]. 63
Şekil 4.1 : Çalışılan oda boyutları. 68
Şekil 4.2 : 1:1:1 oranlı hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı. 70
Şekil 4.3 : 1:1:1 oranlı hacmin modal yoğunluk grafiği. 71
Şekil 4.4 : Hacimde oluşan birinci aksiyel mod (yz yüzeylerinde) f_1=23.3 Hz. in ses basıncı (Pa). 73

Şekil 4.5 : f_1=23.3 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa). 74
Şekil 4.6 : f_1=23.3 Hz. aksiyel modunun h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu. 74
Şekil 4.7 : f_4=32.95 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 76
Şekil 4.8 : f_4=32.95 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden 3 boyutlu gösterimi. 77
Şekil 4.9 : f_7=40.35 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeylerinde) ses basıncı (Pa) cinsinden plan düzleminde gösterimi. 77
Şekil 4.10 : f_7=40.35 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeylerinde) ses basıncı (Pa) cinsinden 3 boyutlu gösterimi. 78
Şekil 4.11 : f_1=23.30 Hz. aksiyel modunun (yz yüzeylerinde) ses basınç düzeyi (dB). 78
Şekil 4.12 : f_4=32.95 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeylerinde) ses basınç düzeyi (dB)..... 79
Şekil 4.13 : f_7=40.35 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeylerinde) ses basınç düzeyi (dB). 80
Şekil 4.14 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) gösterimleri..... 81
Şekil 4.15 : 1:1:1 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi. 81
Şekil 4.16 : 1:2:3 oranlı hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı. 82
Şekil 4.17 : 1:2:3 oranlı hacmin modal yoğunluk grafiği. 83
Şekil 4.18 : Plan düzleminde oluşan birinci aksiyel mod (xz yüzeyleri) f_1=14.1 Hz. in ses basıncı (Pa). 85
Şekil 4.19 : Plan düzleminde oluşan ikinci aksiyel mod (yz yüzeyleri) f_2=21.1 Hz. in ses basıncı (Pa). 85
Şekil 4.20 : f_1=14.1 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).. 86
Şekil 4.21 : f_2=21.1 Hz. aksiyel modunun (yz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).. 86
Şekil 4.22 : f_1=14.1 Hz. aksiyel modunun (A) ve f_2=21.1 Hz. aksiyel modunun (B) h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu..... 87
Şekil 4.23 : f_4=25.44 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 89
Şekil 4.24 : f_7=49.39 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 89
Şekil 4.25 : f_4=25.44 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 90
Şekil 4.26 : f_7=49.39 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 90
Şekil 4.27 : f_1=14.1 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB)..... 91
Şekil 4.28 : f_4=25.44 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 92
Şekil 4.29 : f_7=49.39 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 92
Şekil 4.30 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) gösterimleri..... 93
Şekil 4.31 : 1:2:3 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi. 93
Şekil 4.32 : 1:2.26:1.6 oranlı hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı. 94
Şekil 4.33 : 1:2.26:1.6 oranlı hacmin modal yoğunluk grafiği. 95

Şekil 4.34 : Plan düzleminde oluşan birinci aksiyel mod (xz yüzeyleri) f_1=18.38 Hz. in ses basıncı (Pa). 97
Şekil 4.35 : Plan düzleminde oluşan ikinci aksiyel mod (yz yüzeyleri) f_2=23.36 Hz. in ses basıncı (Pa). 97
Şekil 4.36 : f_1=18.38 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 98
Şekil 4.37 : f_2=23.36 Hz. aksiyel modunun (yz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 98
Şekil 4.38 : f_1=18.38 Hz. aksiyel modunun (A) ve f_7=41.82 Hz. oblik modunun (B) h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu. 99
Şekil 4.39 : f_4=29.72 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 101
Şekil 4.40 : f_7=41.82 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 101
Şekil 4.41 : f_4=29.72 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 102
Şekil 4.42 : f_7=41.82 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 102
Şekil 4.43 : f_1=18.38 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 103
Şekil 4.44 : f_4=29.72 Hz. teğet modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 104
Şekil 4.45 : f_7=41.82 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 104
Şekil 4.46 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) ve ses basnç düzeyi (dB) gösterimler. 105
Şekil 4.47 : 1:2.26:1.6 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi. 105
Şekil 4.48 : 1:0.6:1.6 oranlı hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı. 106
Şekil 4.49 : 1:0.6:1.6 oranhacmin modal yoğunluk grafi 107
Şekil 4.50 : Plan düzleminde oluşan birinci aksiyel mod (xz yüzeyleri) f_1=14.35 Hz. in ses basıncı (Pa). 109
Şekil 4.51 : Plan düzleminde oluşan ikinci aksiyel mod (xy yüzeyleri) f_3=22.95 Hz. in ses basıncı (Pa). 109
Şekil 4.52 : f_1=14.35 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa). 110
Şekil 4.53 : f_3=22.95 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa). 110
Şekil 4.54 : f_1=14.35 Hz. aksiyel modunun h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu. 111
Şekil 4.55 : f_4=40.88 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 113
Şekil 4.56 : f_7=46.88 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 113
Şekil 4.57 : f_4=40.88 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 114
Şekil 4.58 : f_7=46.88 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 114
Şekil 4.59 : f_1=14.35 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 115
Şekil 4.60 : f_4=40.88 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 116

Şekil 4.61 : f_7=46.88 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 116
Şekil 4.62 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) ve ses basnç düzeyi (dB) gösterimleri. 117
Şekil 4.63 : 1:0.6:1.6 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi. 117
Şekil 4.64 : 1:0.75:1.5 oranlı hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı. 118
Şekil 4.65 : 1:0.75:1.5 oranlı hacmin modal yoğunluk grafiği. 119
Şekil 4.66 : Plan düzleminde oluşan birinci aksiyel mod (xz yüzeyleri) f_1=16.13 Hz. in ses basıncı (Pa). 121
Şekil 4.67 : Plan düzleminde oluşan ikinci aksiyel mod (xy yüzeyleri) f_3=24.22 Hz. in ses basıncı (Pa). 121
Şekil 4.68 : f_1=16.13 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 122
Şekil 4.69 : f_3=24.22 Hz. aksiyel modunun (xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 122
Şekil 4.70 : f_1=16.13 Hz. aksiyel modunun (A) ve f_2=32.29 Hz. oblik modunun (B) h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu. 123
Şekil 4.71 : f_6=29.10 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 125
Şekil 4.72 : f_7=43.47 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 125
Şekil 4.73 : f_6=29.10 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 126
Şekil 4.74 : f_7=43.47 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 126
Şekil 4.75 : f_1=16.13 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 127
Şekil 4.76 : f_6=29.10 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 128
Şekil 4.77 : f_7=43.47 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 128
Şekil 4.78 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) ve ses basnç düzeyi (dB) gösterimleri. 129
Şekil 4.79 : 1:0.75:1.5 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi. 129
Şekil 4.80 : 1:0.4:0.6 oranlı hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı. 130
Şekil 4.81 : 1:0.4:0.6 oranlı hacmin modal yoğunluk grafiği. 131
Şekil 4.82 : Hacimde oluşan birinci aksiyel mod (xy yüzeyleri) f_3=14.46Hz. in ses basıncı (Pa). 133
Şekil 4.83 : Hacimde oluşan ikinci aksiyel mod (xz yüzeyleri) f_1=24.12 Hz. in ses basıncı (Pa). 133
Şekil 4.84 : f_3=14.46 Hz. aksiyel modunun (xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 134
Şekil 4.85 : f_1=24.12 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 134
Şekil 4.86 : f_1=24.12 Hz. aksiyel modunun (A) ve f_2=36.18 Hz. oblik modunun (B) h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu. 135
Şekil 4.87 : f_6=28.12 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 137

Şekil 4.88 : f_7=45.82 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 137
Şekil 4.89 : f_6=28.12 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi. 138
Şekil 4.90 : f_7=45.82 Hz. oblik modunun oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi. 138
Şekil 4.91 : f_3=14.46 Hz. aksiyel modunun (yz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 139
Şekil 4.92 : f_6=28.12 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 140
Şekil 4.93 : f_7=45.82 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 140
Şekil 4.94 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) ve ses basnç düzeyi (dB) gösterimleri. 141
Şekil 4.95 : 1:0.4:0.6 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi. 141
Şekil 4.96 : 1:0.57:1.28 oranlı hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı. 142
Şekil 4.97 : 1:0.57:1.28 oranlı hacmin modal yoğunluk grafiği. 143
Şekil 4.98 : Hacimde oluşan birinci aksiyel mod (xz yüzeyleri) f_1=16.33 Hz. in ses basıncı (Pa). 145
Şekil 4.99 : Hacimde oluşan ikinci aksiyel mod (xy yüzeyleri) f_3=20.99 Hz. in ses basıncı (Pa). 145
Şekil 4.100 : f_1=16.33 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 146
Şekil 4.101 : f_3=20.99 Hz. aksiyel modunun (xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 146
Şekil 4.102 : f_1=16.33 Hz. aksiyel modunun (A) ve f_2=36.72 Hz. oblik modunun (B) h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu. 147
Şekil 4.103 : f_6=26.59 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 149
Şekil 4.104 : f_7=45.34 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 149
Şekil 4.105 : f_6=26.59 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 150
Şekil 4.106 : f_7=45.34 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 150
Şekil 4.107 : f_1=16.33 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 151
Şekil 4.108 : f_3=20.99 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 152
Şekil 4.109 : f_7=45.34 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 152
Şekil 4.110 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) ve ses basnç düzeyi (dB) gösterimleri. 153
Şekil 4.111 : 1:0.57:1.28 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi. 153
Şekil 4.112 : 7 oran türüne ait hacimlerin frekans tepkisi eğrileri. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir. 155
Şekil 4.113 : Küp hacmin frekans bölgesi ve sınır frekans değerleri 161
Şekil 4.114 : Küp hacme uygulanan köşe elemanlarının plan ve kesit görünüşleri. 162

Şekil 4.115 : Birinci hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı. 162
Şekil 4.116 : Birinci hacmin modal yoğunluk grafiği. 163
Şekil 4.117 : Hacimde oluşan birinci aksiyel mod (xy yüzeyleri) f_1=23.31 Hz. in ses basıncı (Pa). 165
Şekil 4.118 : Hacimde oluşan ikinci aksiyel mod f_2=24.56 Hz. in ses basıncı (Pa). 165
Şekil 4.119 : f_1=23.31 Hz. aksiyel modunun (xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 166
Şekil 4.120 : f_2=24.56 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa). 166
Şekil 4.121 : f_2=24.56 Hz. aksiyel modunun h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu. 167
Şekil 4.122 : f_5=33.86 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 167
Şekil 4.123 : f_7=43.59 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 168
Şekil 4.124 : f_5=33.86 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 168
Şekil 4.125 : f_7=43.59 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 169
Şekil 4.126 : f_2=24.56 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB)..... 169
Şekil 4.127 : f_4=33.86 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 170
Şekil 4.128 : f_7=43.59 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 171
Şekil 4.129 : Birinci hacmin frekans tepki eğrisi. 171
Şekil 4.130 : Küp hacme uygulanan köşe elemanlarının plan ve kesit görünüşleri. 172
Şekil 4.131 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) gösterimleri... 172
Şekil 4.132 : Küp hacme uygulanan köşe elemanlarının plan ve kesit görünüşleri. 173
Şekil 4.133 : Üçüncü hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı. 173
Şekil 4.134 : Üçüncü hacmin modal yoğunluk grafiği. 174
Şekil 4.135 : Hacimde oluşan birinci aksiyel mod f_1=23.31 Hz. in ses basıncı (Pa). 176
Şekil 4.136 : Hacimde oluşan ikinci aksiyel mod f_2=24.32 Hz. in ses basıncı (Pa). 176
Şekil 4.137 : f_1=23.31 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa). 177
Şekil 4.138 : f_2=24.32 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa). 177
Şekil 4.139 : f_2=24.32 Hz. aksiyel modunun h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu. 178
Şekil 4.140 : f_5=33.69 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 178
Şekil 4.141 : f_7=42.84 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 179
Şekil 4.142 : f_5=33.69 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 179
Şekil 4.143 : f_7=42.84 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 180
Şekil 4.144 : f_2=24.32 Hz. aksiyel (yz yüzeyleri) modunun 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 180

Şekil 4.145 : f_4=33.69 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 181
Şekil 4.146 : f_7=42.84 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu (A) ve h=1.2 düzlemindeki (B) ses basınç düzeyi (dB). 182
Şekil 4.147 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) gösterimleri. . 183
Şekil 4.148 : Üçüncü hacmin frekans tepki eğrisi. 183
Şekil 4.149 : Küp hacme uygulanan köşe elemanlarının plan ve kesit görünüşleri. 184
Şekil 4.150 : Dördüncü hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı. 184
Şekil 4.151 : Dördüncü hacmin modal yoğunluk grafiği. 185
Şekil 4.152 : Hacimde oluşan üçüncü aksiyel (xy yüzeyleri) mod f_3=23.31 Hz. in ses basıncı (Pa). 187
Şekil 4.153 : Hacimde oluşan birinci aksiyel (xz yüzeyleri) mod f_1=22.77 Hz. in ses basıncı (Pa). 187
Şekil 4.154 : f_3=23.31 Hz. aksiyel modunun (xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 188
Şekil 4.155 : f_1=22.77 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 188
Şekil 4.156 : f_1=22.77 Hz. aksiyel modunun h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu. 189
Şekil 4.157 : f_4=31.06 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 189
Şekil 4.158 : f_7=38.84 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. 190
Şekil 4.159 : f_4=31.06 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 190
Şekil 4.160 : f_7=38.84 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa). 191
Şekil 4.161 : f_1=22.77 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 191
Şekil 4.162 : f_4=31.06 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 192
Şekil 4.163 : f_7=38.84 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 193
Şekil 4.164 : Dördüncü hacmin frekans tepki eğrisi. 193
Şekil 4.165 : Küp hacme uygulanan köşe elemanlarının plan ve kesit görünüşleri. 194
Şekil 4.166 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) gösterimleri. . 194
Şekil 4.167 : Küp hacme uygulanan köşe elemanlarının plan ve kesit görünüşleri. 195
Şekil 4.168 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) gösterimleri. . 195
Şekil 4.169 : Küp hacme uygulanan köşe elemanlarının plan ve kesit görünüşleri. 196
Şekil 4.170 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) gösterimleri. . 196
Şekil 4.171 : Küp hacme uygulanan köşe elemanlarının plan ve kesit görünüşleri. 198
Şekil 4.172 : Sekizinci hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı. 198
Şekil 4.173 : Sekizinci hacmin modal yoğunluk grafiği. 199
Şekil 4.174 : Hacimde oluşan birinci aksiyel (xy eksenleri) mod f_1=23.31 Hz. in ses basıncı (Pa). 201
Şekil 4.175 : Hacimde oluşan ikinci aksiyel mod f_2=24.55 Hz. in ses basıncı (Pa). 201
Şekil 4.176 : f_1=23.31 Hz. aksiyel (xy eksenleri) modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa). 202

Şekil 4.177 : f_2=24.55 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa). 202
Şekil 4.178 : f_2=24.55 Hz. aksiyel modunun h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu. 203
Şekil 4.179 : f_5=33.86 Hz. teğet modunun ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi. ... 203
Şekil 4.180 : f_7=45.27 Hz. oblik modunun ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.... 204
Şekil 4.181 : f_5=33.86 Hz. teğet modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa). 204
Şekil 4.182 : f_7=45.27 Hz. oblik modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa). 205
Şekil 4.183 : f_1=23.31 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB)..... 205
Şekil 4.184 : f_5=33.86 Hz. teğet modunun 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB). 206
Şekil 4.185 : f_7=45.27 Hz. oblik modunun 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB)..... 207
Şekil 4.186 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) gösterimleri... 207
Şekil 4.187 : Sekizinci hacmin frekans tepki eğrisi. 208
Şekil 4.188 : 1'inci, 3'üncü, 4'üncü, 8'inci hacimlere ait frekans tepkisi eğrileri. . 211
Şekil A.1 : 1:1:1 oran türüne ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir. 223
Şekil A.2 : 1:2:3 oran türüne ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir. 224
Şekil A.3 : 1:1.26:1.26 oran türüne ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir. 225
Şekil A.4 : 1:0.6:1.6 oran türüne ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir. 226
Şekil A.5 : 1:0.75:1.5 oran türüne ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir. 227
Şekil A.6 : 1:0.4:0.6 oran türüne ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir. 228
Şekil A.7 : 1:0.57:1.28 oran türüne ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir. 229
Şekil A.8 : Birinci hacme ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir. 230
Şekil A.9 : Üçüncü hacme ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir. 231
Şekil A.10 : Dördüncü hacme ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir. 232
Şekil A.11 : Sekizinci hacme ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir. 233

KÜÇÜK HACİMLERDE DURAĞAN DALGALARIN (MODLARIN) ODA GEOMETRİSİ VE ODA ORANLARI İLE İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Mimari tasarımda oda oranları 20'inci yüzyılın ikinci yarısından itibaren tasarımın iyi ve kötü olarak nitelendirilmesine yönelik olarak tartışılmaya başlandı. Platon, Pisagor, Euclid gibi filozofların doğada bulunan oranlara ilişkin matematiksel yaklaşımları, bu tartışmanın epey öncesinde başlamıştır. Matematiksel oranların mimari tasarıma uygulanması bu düşünceler ışığında önemli bir konu haline geldi. Rönesans dönemi boyunca sanat üretiminde kullanılan altın oran, Fibonacci serisi ile tanımlanan matematiksel oranlar; doğanın düzeni ve kanunu olan karşılıklı anlaşma ve uyum olarak ifade edilir. Sanatta güzellik kavramı yalın olarak optik bir olayı değil, daha derin bir anlamı (karşılıklı anlaşma ve uyum) ifade eder. Modern mimari, Rönesans dönemi mimari anlayışından farklı olarak, mekânın sade, yalın ve net olarak üretir. Mekânın yüzeyleri, köşeleri, tavan, duvar, döşeme ve mobilya tasarımı net yüzeyler ile kurgulanır. Bu form değişimi sesin mekândaki davranışlarını da değiştirir. Sesin yayılmasını sağlayacak yüzeyler bu tasarım anlayışında yoktur. Bu durum özellikle küçük hacimlerde oda modlarını ortaya çıkarır.

Bu çalışmada, küçük hacimlerde oldukça önemli bir olay olan oda modlarının, hacmin şekil ve boyut özellikleri ile ilişkisi ve oda oranlarının modlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmanın birinci bölümü, mimaride kullanılan oda oranlarını inceler. İkinci bölüm, küçük oda tanımını ve küçük odaların akustik parametrelerini ayrıntılı olarak ele alır. Üçüncü bölüm, literatür araştırması sonucunda belirlenen çalışma matrisinin bilgisayar ortamında benzetiminin yapılmasıdır. Elde edilen sonuçlar üzerinden, modal karakteristiği en kötü olan hacim çalışmanın ikinci aşamasında incelenir. İkinci aşamada hacmin köşe ve yüzeylerine farklı şekil değişiklikleri uygulanarak modal karakteristiğindeki değişimler incelenmiştir.

Yedi elemanlı matris (eşit hacimde yedi adet oda) üzerinde yapılan çalışma, birbirinin tam sayı katlarına sahip oranlı hacimlerin modal davranışlarının ve ses yayılımının akustik kusurlar içerdiğini gösterir. En kötü sonucu 1:1:1 oranlı küp hacim verir. En iyi sonucu ise 1:0.57:1.28 oranlı hacim verir. İkinci aşamada küp hacim, birim olarak kabul edilir. Hacmin köşe ve yüzeylerine uygulanan değişiklikler sonucunda modal karakteristiğin nasıl etkilendiği incelenmiştir. Çalışmanın iki aşamasında da yüzeylere malzeme bilgisi girilmez. Çalışma, tasarım sürecinin malzeme kararlarının verilmediği ilk aşamasında, şekil ve boyut özelliklerinin akustik kaliteye etkisini incelemeyi amaçlar.

Yapılan çalışma sonucunda, hacme uygulanan köşe değişiklikleri olay modun dalga boyu ile ilişkili olarak etki gösterdiği görülmüştür. En etkin akustik durum, hacimde yüzey paralelliklerinin bozulduğu örnekte görülmektedir. Paralelliğin bozulması hacmin modal karakteristiği üzerinde olumlu sonuçlar verir.

EXAMINATION OF STANDING WAVES (MODES) VIA RELATIONS ROOM GEOMETRY AND ROOM RATIO IN SMALL ROOMS

SUMMARY

The room ratios in architectural design has started to be discussed since in the second half of the 20th century in order to can be characterized the design as good and bad. The mathematical approaches of philosophers such as Plato, Pythagoras and Euclid about of the proportions in nature has started well before this discussion. The application and using of mathematical proportions to architectural design has become an important subject in the light of these thoughts. The golden ratio and Fibonacci series used in art production during the Renaissance period; It is expressed as mutual agreement and harmony, which is the order and law of nature. The concept of beauty in art do not expresses only an optical event. It expresses a deeper meaning (mutual agreement and harmony). Unlike the architectural understanding of the Renaissance period, modern architecture produces the own architectural space with basic, simple and clear surfaces. The surfaces, corners, ceiling, wall, floor and furniture of the space are designed with clear surfaces. This design approach also changes the behavior of the sound in the architectural space. The surfaces that will diffuse the sound are absent in this design concept. This situation reveals room modes, especially in small volumes.

In this study, relation of the room modes, which is a very important acoustics criterion in small rooms, with the shape and size characteristic/property of the volume and the effect of room ratios on the modes were investigated. The first part of the study investigates the room ratios which used in architecture. The second part discusses a definition of the small room and the acoustics criterion of small rooms. The third part simulate room ratios which is determined as a result of the literature research. In the second stage of the study, the room has a worst modal characteristics is investigated. In the second stage, how can be change modal characteristics of the room with applying different treatments to the corners and surfaces of the room were investigated.

The simulation of the room was done in COMSOL Multiphysic software, which works according to the wave theory of sound. The wave theory is an effective in the small room acoustics. Mode frequencies and pressure values (Pascal and decibel) were obtained with using the software's Pressure Acoustics, Frequency Domain (acpr) physics calculation unit. Room response graphs were created by combining frequency and pressure level values.

Architectural ratio (Alberti, Golden Ratio, Fibonacci) and acoustic ratio (Europan, Harmonic) types in the literature were used to find the rooms. In the first part of the study, 3 architectural / visual ratio, 3 acoustic ratio and cube totally 7 different room ratios were studied.

Some design parameters have been kept constant. The constant parameters: volume, reverberation time. The design parameters whose effect will be investigated have been changed. Parameters whose effects are investigated: room ratio, surface and shape changes.

The images of the modes are obtained as a result of the simulation using Comsol Multiphysic software. Frequency values and pressure values of the modes are obtained by simulation. The frequency values of the modes were also calculated with the formulas for control purposes.

The frequency response curve is created by exporting the sound pressure level value and the frequency value which is corresponding to these pressure value obtained as a result of the simulation and reworking them in Excel software to make them graphic. The value on the curve represent the value of the frequency axis. Frequency response curve graphs start from the dB type of 1 Pa for each volume.

The subset was created, which has seven element. The subset is intersection of architectural room ratio set (defined by Alberti and architect/artist) and acoustics room ratio set (defined by Bonello and acoustician) which is defined by literature research. The cube room (1:1:1) was analyzed as a control unit. The number of modes in the rooms, the mode frequencies, the number of modes depending on the frequency, the distances between the modes, the positions of the modes and the shape features were investigated. The room response curve of the volumes are expressed as a graph for making comparison.

The integer multiplication between the dimensions of the room gives acoustically bad results. Overlapping mode can be created by the common divisor of the dimensions. Multiple repetition of mode frequencies make coloration phenomenon in the room. The rooms create different sound pressure levels according to their room ratio.

The modal characteristics and diffusion of sound is not good in the room, which is the integer multiplication between the dimensions. The 1:1:1 cube room has been worst results in terms of mode. The 1:0.57:1.28 room has been best results in terms of mode. Material information (reflection, absorption and diffusion datum) is not assigned on the surfaces in the both stages of the study. The study aims to investigate the effect of shape and size properties on the acoustic quality in the room. When the first phase of the architectural design the material decisions are not made.

Schroeder frequency, volume and ringing time are at the same value as they are kept constant in all room rates. It has been observed that modes with the same frequency in volumes are supported by different surfaces of the volume. This is especially the case when there is an integer relationship and a common divisor between the ratios of 1: 1: 1, 1: 2: 3, 1: 0.75: 1.5 and 1: 0.4: 0.6 ratios. These overlapping modes do not meet the Bonello and Gilford criteria. The coincident mode was not observed in volumes with 1: 0.57: 1.28 and 1: 1.26: 1.6 ratios which has not numerical common divisor relationship between ratios. The frequency response curve (frequency-decibel graph) of the volumes are different each other.

The modal characteristic of the cube room how was affected by the shape interventions on the corners and surfaces of the volume has been investigated as the second stage of the study. To the corners and surfaces of the volume, respectively; placement of square corner elements which is continuing along the height of the room, chamfering the corners, placing convex quarter cylinders, applying the vertical slats, applying the grill system which is consisting of vertical and horizontal slats on the surfaces of the room, and the splaying of the room surface for break parallelism were applied. Placement of square corner elements and chamfering corners give similar results. The vertical slats and the grid system also give similar results.

Adding a rectangular prism to the corners (1st volume); frequency values do not differ from the cubic volume, which is the control unit. It has been observed that the position and shape characteristics of the low frequency modes do not change. Adding a convex elements to the corners (3rd volume); frequency values are similar to the cubic volume. It is observed that the convex corner form has diffuser effect. For this reason, there are shifts in the zero pressure lines. Adding a vertical laths to the surfaces (4th volume); this application did not show diffuser effect at low frequency modes as expected.

As a result of the study, it is seen that the corner and surface applications of the room have an effect in relation to the wavelength of the mode. The most effective acoustic solution can be seen in the example where splaying surfaces and break parallelism. Breaking of parallelism gives positive results on the modal characteristic of the room.

The material properties (reflection, absorption and diffusion) are one of the most important criterion which is affected the acoustic properties of the volume. In this study investigates what is the effect geometric ratio of the dimensions and shape properties of the room when in the first architectural design and planning phase where the material decisions are not made and the space is designed geometrically.

1. GİRİŞ

Mimari tasarımda matematiksel oranların kullanılması, tasarımın karşılıklı anlaşma ve uyum içerisinde gelişmesine olanak tanır. Bu durumun gelişmesi tasarımın sadece optik bir olay olmaktan çıkıp, nesnel bir konuma yerleşmesini sağlar. Günümüz mimari anlayışında geçmiş dönem anlayışlara kıyasla matematik daha az kullanılmakta ve bu unsurun tasarımın bir parçası olduğu düşüncesi unutulmaktadır. Görsel açıdan kullanılagelen bu oranların, işitsel karşılıkları nedir? Mekânın tasarımında kullanılan oran, sesin hacimdeki davranışını nasıl etkiler? Özellikle küçük hacimlerde, sesin dalga boyunun oda boyutları ile kıyaslanabilir olduğu hacimlerde, oda oranları akustik tasarımın bir parçası haline gelir. İşitsel önemin daha fazla olduğu hacimlerde tasarım görsel olarak değil işitsel olarak ele alınmalı ve akustik tasarımın daha iyi çalışılmasına olanak taşıyacak şekilde ilk tasarım anlayışı geliştirilmelidir. Eğitim amaçlı olarak kullanılan hacimlerin tasarımı, eğitimin kalitesine doğrudan etki eder. Eğitimin doğru bir şekilde yapılıp ürünün oluşturulması için kullanılan hacimler performans amaçlı olarak kullanılan nihai temsil hacimlerine göre daha küçüktür.

Oda akustiği, hacim içerisindeki fonksiyonun uygun bir şekilde gerçekleştirilmesinde oldukça etkilidir. Çocukların genel gelişimi için müzikle aktif olarak uğraşmanın öneminin giderek arttığı anlaşılmaktadır. Kuzeybatı Üniversitesi'nden araştırmacılar, "müzik eğitimi sırasında sinirsel bağlantıların, insan iletişimini güçlendirdiğini" bulmuşlardır. Müzik eğitimi almış çocukların, müzik eğitimi almayan çocuklardan daha iyi bir kelime hazinesi ve okuma becerisine sahip olduklarını da bildirmişlerdir [20, 27].

Bununla birlikte, özellikle müzik öğretimi ve profesyonel olmayan toplulukların provaları ile ilgili olarak, odaların genellikle akustik açıdan tatmin edici olmadığı anlaşılmaktadır. Çeşitli sporlar faliyetlerine ayrılmış hacimler için belirlenmiş gereklilikler olsa da, müzik prova odalarının gereksinimleri çok zayıf ya da tamamen eksiktir [20, 27].

1.1 Çalışmanın Amacı

Çalışmada, çeşitli oran türlerinin ve hacim şekillerinin küçük oda akustiğine olan etkisinin ortaya konması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda mimari tasarımda, görsel olarak ve işitsel olarak kullanılan hacim oranları ile hacmin köşe ve yüzey geometrisinin küçük odalarda etkin akustik parametrelerden biri olan durağan dalgalar (mod) üzerindeki etkisi bilgisayar ortamında benzetim yöntemi ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile mimari tasarımın ilk aşamasında, işitsel fonksiyonu önemli olan hacimlerin oran-ses ilişkisi üzerinden incelenmesi ve bir tasarım anlayışı geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Tasarımın malzeme kararlarının verilmediği, geometrik tasarım aşamasında yüzey ve boyut geometrisinin akustik tasarımda etkin bir biçimde kullanılması amaçlanmaktadır.

1.2 Çalışmanın Kapsamı ve Yöntemi

Çalışma kapsamında, bir odayı oluşturan 6 adet yüzeyin (tavan ve döşeme xy düzlemi, en duvarları xz düzlemi, boy duvarlar yz düzlemi) geometrisinin, oda modlarına etkisi incelenmiştir. Bu çerçevede ele alınan hacmin mod, yansıma, emilim ve yayılım parametreleri incelenip, mod analizi yapılmıştır. Hacmin çalışma kapsamında dış ortamdan tamamen yalıtıldığı varsayılmıştır.

Hacimlerin analizi, COMSOL Multiphysic yazılımında yapılmıştır. Hacimlerin mod sayısı ve frekansları matematiksel denklem ile Excel yazılımında yapılarak, bilgisayar benzetimi ile sağlaması yapılmıştır. Benzetim sonucunda elde edilen frekans ve basınç değeri verileri kullanılarak oda tepki eğrisi grafiği oluşturulmuş ve hacmin incelemesi yapılmıştır. Çalışmanın bu birinci aşamasından elde edilen sonuçlar ikinci aşamada; birim hacmin belirlenip bu hacmin yüzey ve köşe geometrisinin değiştirilerek akustik incelemesi yine modlar üzerinden yapılmıştır. Çeşitli yüzey ve köşe değişikliklerinin hacmin modal karakteristiğine etkisi incelenmiştir.

Akustik tasarımda malzeme bilgisi girilmeden hacim geometrisinin etkisinin incelenmesi çalışmanın esas kapsamını oluşturmaktadır.

1.3 Mimaride Oran Sisteminin Tarihçesi

18 Haziran 1957'de, Londra'daki Kraliyet İngiliz Mimarlar Enstitüsü'nde “Oran sistemlerinin iyi tasarımı kolaylaştırması ve kötü tasarımı daha da zorlaştırması”

konusu tartışmaya açıldı. Tartışma, Colin Rowe'nin İdeal Villa'nın Matematiği çalışmasının 1947'de yayınlanmasından 10 yıl sonraya tekabül eder. Matematiksel oranların tasarıma uygulanması mimaride önemli bir konu haline geldi. Birkaç yıl sonra, Rowe'nin hocası Rudolf Wittkower'ın Rönesans mimarisini yeni bir perspektifte, matematiksel bir uyum sanatı olarak ele aldığı "Architectural Principles in the Age of Humanism" kitabı, Le Corbusier'in altın bölüm (oran) ve insan vücudundan türetilen yeni bir oran sistemi ortaya koyduğu "Modulor" kitabı, Hermann Weyl'in sanat ve doğadaki simetri ve orantısal uyumu ifade eden yasaları anlatan "Simetri" kitabı, bu alandaki önemli yayınlardır. 1951'de, Milano'da Uluslararası Sanat Oranları Kongresi düzenlendi. Rudolf Wittkower'a göre, bu kongre genç nesiller üzerinde kayda değer bir etki oluşturamadı [9].

Palladio ile Le Corbusier tarafından tasarlanan binaların birbirinden oldukça farklı matematiksel ilkelere dayanarak tasarlanamasına rağmen her tasarım yaklaşımı da güzel olarak kabul edilebilir. Kurallar tasarım sürecinin başında takip edilmesi gereken temel ilkeler olarak ya da tasarımın sonunda düzeltici birer unsur olarak kullanılabilir.

Einstein'a göre, Le Corbusier'in modülor oranları iyi olarak nitelenir, çünkü doğanın yasalarıyla uyumlu, insan mantığı ile tutarlı ve anlaşılabilirdir [9].

Sanatta, matematiksel oranlar görsel güzellik ile ilişkilendirilmiştir, ancak sanattaki güzellik eskiden sadece optik bir olgu olarak değil, daha derin bir şeyin ifadesi olarak kabul edilirdi: dünyanın genel bir uyumu. Alberti bu uyumu, concinnitas (karşılıklı anlaşma veya uyum) olarak adlandırdı ve bunu doğanın temel kanunu olarak kabul etti [9].

Wittkower'ın "Değişen Oran Kavramı" çalışmasından çıkardığı üç sonuç: (1) Sayısal oran sistemlerinin azalması, Newton'un yasalarını yayınlamasından bir yüzyıldan fazla bir süre önce mimarlıkta başladı; Bu gerileme, on altıncı yüzyılın ortasındaki Mannerizmin yükselişi ile ilişkiliydi ve Barok ile devam etti. On yedinci yüzyıl biliminin ortaya koyduğu evrenin sanattaki oran sistemlerinin kozmolojik temelini baltalaması gerektiğinin açık bir nedeni yoktur. Bu evren kesinlikle "mekanik yasalar" tarafından yönetiliyordu, ancak "dış bir plan" olmaktan uzaktı. Hiçbir doğa anlayışı daha mükemmel bir şekilde uyumlu ve birleşik olmamıştır. Bütün bunlar esasen tek bir matematiksel orana indirgenebilir. Bütün yüksek medeniyetler, sayıların ve sayıların ilişkilerine dayanan bir düzene inanıyorlardı, evrensel ve kozmik kavramlar

ile insanın yaşamı arasında sık sık bir uyum arandı. (2) Her zaman kozmolojik fikirler ile mimarlık arasında bir ilişki olmasına rağmen, matematik veya bilimdeki keşiflerin mimari üzerindeki doğrudan etkisinin belgelenmiş örnekleri azdır. Plato'nun Timaeus'unda ortaya konan Pisagor sayısal armonilerinin, Wittkower'ın Mimari İlkeleri'nde incelediği İtalyan Rönesans mimarisi üzerindeki etkisi kuraldan ziyade istisnadır. Mimaride kullanılan oran türleri genellikle evrenin matematiği hakkındaki fikirleri değiştirmenin yanında, bağımsız olarak geliştiği görülmektedir. Mimari orantı matematiği her zaman binanın formlarına ve tekniklerine uygun bir tür olmuştur ve bunlar günümüzde bile temelinde çok az değişiklik göstermiştir. (3) Doğada hiçbir zaman bir çember veya üçgen olmasa da, Euclid'in kanıtladığı gerçekler kesinliğini ve kanıtlarını daima korur [9].

2. KÜÇÜK ODALARDA ORAN TÜRLERİ, KÜÇÜK ODANIN AKUSTİK OLARAK TANIMI VE KÜÇÜK ODA TASARIM PARAMETRELERİ

Küçük oda tanım olarak iki türde ifade edilebilir; geometrik tanım; hacim m^3, taban alanı m^2, yükseklik m, kişi başına düşen hacim m^3, kişi başına düşen alan m^2 ve akustik tanım; kritik frekans f_c. Geometrik tanım odanın katı cisim geometrisi özelliklerini ifade eder. Akustik tanım ise bu geometri içeresinde sesin davranış özelliklerini ifade eder.

2.1 Küçük Odalarda Genel Oran Türleri, Akustik Oran Türleri ve Küçük Odanın Akustik Olarak Tanımı

Geometrik olarak odanın küçüklüğü ile akustik olarak küçüklüğü, hacim ve kritik frekans olarak değişen iki parametreye bağlıdır. Tasarım parametreleri detaylıca incelendikten sonra akustik olarak küçük odanın tanımının yapılması kavrama kolaylığı sağlayacaktır.

Kullanıcı sayısı ve hacim büyüklüğü bakımından küçük çalışma gruplarını (8-10 kişi) ve yaklaşık 100-150 m^3 hacim büyüklüğü küçük odayı geometrik olarak tanımlar [20, 27, 33, 30, 34].

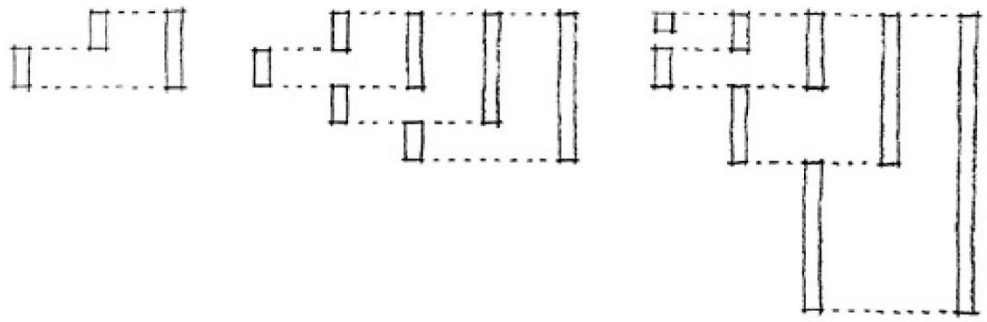
Plan ile kesit arasındaki matematiksel ilişkilerin, yapıda insan tarafından doğru algılanamadığı açıktır. Bu nedenle, geometrik şemanın harmonik mükemmelliğinin, öznel ve geçici algımızdan bağımsız olarak mutlak bir değer teşkil etmesi gerektiği sonucuna varılabilir [9].

Doğa matematik tarafından yönetilir ve sanatın başyapıtları doğa ile uyumludur; doğanın yasalarını ifade ederler ve bu yasalardan hareket ederler. Sonuç olarak, onlar da matematiğe tabidir [10].

2.1.1 Genel oran türleri

Oranın başlangıcı, saymanın başlangıcı ve tüm matematiğin başlangıcı gibi, bir ile iki arasındaki geçiştir. Sayma, birimi kendisine ekleyerek başlar; birim tanımı gereği bölünemez olduğu için, birime eklenecek daha küçük bir şey yoktur. Kendisine bir

tane ekleriz ve iki tane alırız (bkz. Şekil 2.1). Bu ilk adımı attığımızda, devam etmenin üç yolu vardır.



A B C

Şekil 2.1 : Birime eklenmenin üç yolu [9].

(1) İlk ve en belirgin yöntem toplama işlemidir. Birim, en son oluşturulan sayıya eklenmeye devam edilir ve böylece sayımda kullanılan basit aritmetik dizi elde edilir: 1, 2, 3, 4, 5… (bkz. Şekil 2.1B) Sürekli birim eklenerek oluşturulan bu tür bir ilerleme, dizi terimlerinin tüm olası toplamlarını içerdiğinden sonsuz derecede esnektir. Ancak rakamlar büyüdükçe, birim sabit olmaktadır. Ardışık elemanlar arasındaki oranlar her aşamada azalır, daha az algılanabilir, bütün olarak daha az önemli hale gelir. Hiçbir oran aynı değildir [9].

(2) Birimi, sürekli olarak oluşturulan son sayıya eklemek yerine, bir sonraki sayıyı üretmek için her sayı bir sabit ile çarpılabilir. Örneğin, sabit çarpan 2 ise, 1, 2, 4, 8, 16, vb. bu şekilde geometrik dizi elde edilir. (bkz. Şekil 2.1C) Birimin altındaki sayılar aynı anda art arda yarıya iniyorsa, azalan dizi 1, 1/2, 1/4, 1/8, vb. ise, çok basit ve tanımlanabilir embriyonik orantı sistemini oluşturur [9].

Bir seriye dayanan tasarımda iki farklı elemanın herhangi bir kombinasyonu, dizinin üyesi olmayan üçüncü bir eleman üretmelidir. Kompozisyon, karmaşıklığı tamamen düzensizliğe yükseltilerek dejenere olabilir. Tersine, eğer düzen düzgün bir elemanın tekrarı ile korunmaya çalışılırsa, sonuç yalnızca başka bir düzensizliktir. Gerçek düzen dengeli bir birliğin ve karmaşıklığın birleşiminden oluşur. Etkili bir oran sistemi, geometrik dizinin çok yönlülüğünü, aritmetik dizinin artan özelliği ile birleştirmelidir.

Geometrik ilerlemenin bir kusuru, bir ile iki atlamanın basitçe çok büyük olmasıdır. 1: 1'den büyük ancak 2: 1'den daha az oranlar kullanabilmesi gerekir. Bu nedenle, etkili bir sistem tasarlamadaki ikinci şart, ardışık elemanlar arasındaki çarpanın bir ile iki arasında bir yerde durması gerektiğidir.

(3) Bu sorunların üstesinden gelmek için ilk adım sabit çarpanı azaltmaktır ve çoğu orantı sistemi aslında ikiden küçük çarpanlara sahiptir. Çizelge 2.1, mimaride kullanılan temel çarpanların ondalık değerlerini göstermektedir. Bu oranlar hacim boyutlarının belirlenmesinde çarpan olarak kullanılır. Örneğin 1x1 birim boyutlarındaki kare bir alanın köşegeni $\sqrt{2}$ birimdir [9].

Çizelge 2.1 : Genel mimari çarpanlar ve oranlar [9].

Karekök 2 ($\sqrt{2}$)	1.4142…
Karekök 3 ($\sqrt{3}$)	1.732...
Karekök 4 ($\sqrt{4}$)	2.0
Karekök 5 ($\sqrt{5}$)	2.236…
Altın Oran (ϕ)	1.618…
Plastik Oran (ψ)	1.325…

Bununla birlikte, altın oran ve Van der Laan'ın plastik oranı dışında, bu sabitlere dayanan geometrik seriler gerçekte etkili değildir. İkiye katlama veya ilerleme durumunda gördüğümüz gibi, yalnızca bir terimin kendisine eklenmesi, diziye ait olan bir toplamı oluşturur [9].

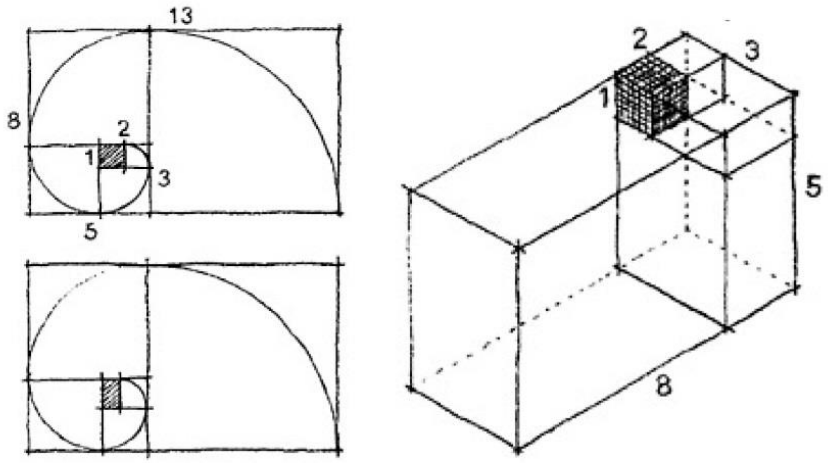
Platon'un tercih ettiği geometrik ortalama, daha yüksek ve daha düşük bir terim arasındaki orta terim, daha yüksek ortalama anlamına gelir. A ve C iki terimdir ve B geometrik ortalamaları ise, A/B = B/C. İki sayının geometrik ortalaması aynı zamanda elemanların karekökünü de eşittir: B=$\sqrt{A.B}$. Aritmetik ortalama, hem toplamlarını hem de farklarını iki eşit parçaya bölen diğer iki terim arasındaki orta terimdir. B, A ve C terimi arasındaki aritmetik ortalama ise, B = (A + C) / 2.

Harmonik ortalama, farklarını iki terimin birbirine oranla aynı oranda bölen iki terim arasındaki orta terimdir. B = 2AC / (A + C) olduğunda A ve C arasındaki harmonik ortalamadır. Eleman sayısının, elemanların çarpma işlemine göre tersinin toplamına bölümüne denir.

Genellikle göz ardı edilen, dördüncü bir ortalama vardır: kontraharmonik ortalama. Adından da anlaşılacağı gibi, bu iki uç nokta arasındaki farkı harmonik ortalamanın tersine böler. A ve C'nin kontraharmonik ortalaması B ise, B = (A^2 + C^2) / (A + C) [9].

Fibonacci sayıları, çiçek yaprakları ve ağaç dallarının şekilleri, tavşanların doğum oranları ve matematiğin birçok yerinde ortaya çıkan diğer doğal olaylarla ilgili olarak,

önde gelen ortaçağ matematikçi Leonardo Fibonacci tarafından keşfedilen ilginç bir tam sayı dizisidir. Pascal üçgeninde de bu dizi görülür [35].



Şekil 2.2 : Plan ve hacim düzleminde altın oran [9].

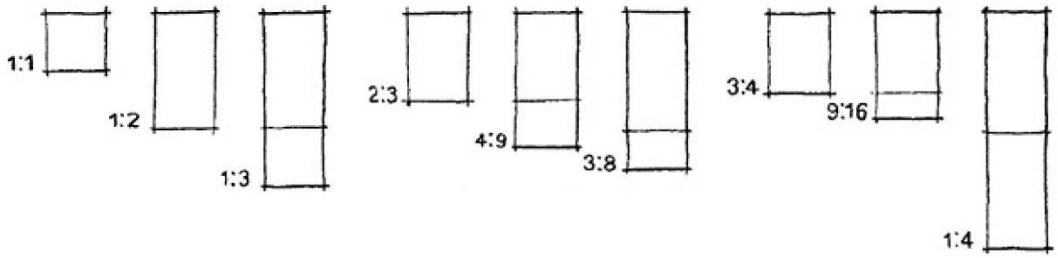
Leon Battista Alberti, güzelliği, hem temel geometrilerden hem de sayısal ilişkilerden geldiğini ifade eder. Leon Battista Alberti ve Andrea Palladio'nun tasarım teorisi, orantılı ve geometrik güzelliği ifade eder. Bu yaklaşım Plato'nun sayılarını, geometrilerini ve diğer matematik disiplinlerini temel alır. Alberti belirli oda oranlarını mimari olarak güzel kabul eder ve bu oranları belirler. Şekil 2.3 bu oda oranlarını plan düzleminde gösterir.

Fibonacci sayıları özyinelemeli bir matematik dizisi ile üretilir. Fibonacci sayıları 0 ile başlayarak 1 ile sonuçlanan bir diziden üretilir. Bir önceki elemana 1 eklenir, sonuç 2 sayısıyla sonuçlanır. Bu mantığı takiben, dizide her sayıya kendinden bir önceki sayı eklenerek bir sonraki sayı elde edilir [9, 10, 35, 36].

Bu süreci göstermek için, ilk on Fibonacci Sayısı:

0	1	1	2	3	5	8	13	21	34	55
		(0+1)	(1+1)	(2+1)	(3+2)	(5+3)	(8+5)	(13+8)	(21+13)	(34+21)

Fibonacci Sayılarının doğa, sanat, mimari ve anatomi ile ilişkisini anlamak ve temel olan Altın Oranın üretimi bir bütündür [28]. Fibonacci serisinin türetilmesi Şekil 2.2'de görüldüğü gibi özyinemeli olarak plan düzleminde ve perspektif olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.3 : Alberti tarafından önerilen oda oranları [9].

Rönesans döneminde üzerinde oldukça düşünülen oran konusu mimarinin görsel algı parametresi üzerinden gelişmiştir. Birbirinin tam katı boyutlar ile kurgulanan hacimlerin küçük oda akustiğinde incelenmesi gereken bir durum oluşturur. Dönemin yapılarının nispeten daha iyi akustik özelliklere, bu oranlar ile sahip olmaları hacim içerisinde kullanılan süsleme ve mobilyaların ses yayılımı, emilimi ve yansıması üzerindeki etkileri ile açıklanabilir. Modern mimarinin süslemeyi kullanmaması, mobilya seçimlerini soyut anlayış ile tasarlaması, mevcut oda hacminin oranlarının akustik etkisini ön plana çıkarır.

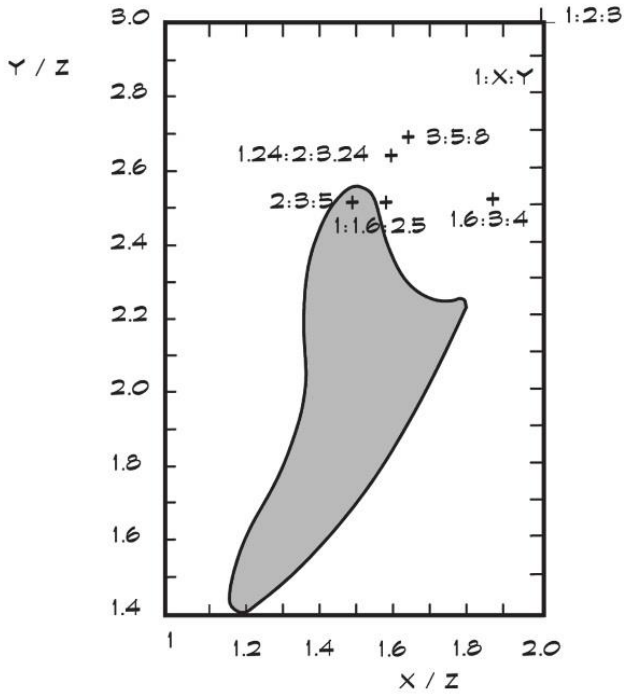
2.1.2 Akustik oran türleri

Akustik olarak oda boyutu ve şekli geometrik olarak ifade edilenden farklılıklar gösterebilir. Geometrik olarak açılandırılmış bir yüzeye sahip oda akustik olarak düz gibi davranabilir. Bu durum çalışılan frekansa bağlıdır. Frekans özelinde odanın geometrisi ve akustiği farklılıklar gösterir.

Bolt, Rettinger ve diğerleri dahil olmak üzere çok sayıda yazar, dinleme odaları ve stüdyolar için tercih edilen oda boyutları hakkında önerilerde bulunmuştur. Bunlar, dikdörtgen bir odanın kenarlarının, uzunluklarının oranları cinsinden verilmiştir. Bolt tarafından yayınlanan grafik, Şekil 2.4'te gösterilmektedir [2].

Dikdörtgen odalarda düzgün frekans tepkisi elde etmek için, odanın düşük frekanslı ses dağılımını boyut oranlarına göre sınıflandırmak için girişimlerde bulunulmuştur. En uygun modal yanıtı veren boyut oranları bulunmuştur.

Şekil 2.4'te gösterilenler gibi öneriler, dikdörtgen bir oda istendiğinde, akustik test amaçlı yankı odaları tasarımında oldukça yararlıdır. Küçük stüdyoların tasarımında faydalı olabilirler ancak; ses stüdyoları nadiren dikdörtgen şeklinde inşa edilir. Dikdörtgen olmayan odalar için normal mod hesaplamaları daha zordur ve sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak yapılabilir [2].



Şekil 2.4 : Dikdörtgen bir odanın Bolt tarafından önerilen boyutları [2].

Błaszak (2008), Schroeder frekansına kadar olan bir frekans aralığını inceler ve 1: 1.2: 1.4 oranını en iyi oran olarak ifade eder. Sepmeyer (1965) modal tepkinin düzensizliğini en aza indirmek için: 1: 1.14: 1.39, 1: 1.28: 1.54 ve 1: 1.6: 2.33 oda oranlarını belirler. Louden (1971), modal frekansların dağılımının, yüksek frekansta, mod aralığına çok yakın olduğu zaman düzenli olduğunu kabul eder ve 1: 1.4: 1.9 oranını belirler. Milner ve Bernhard'ın (1989) 1: 1.186: 1.439 oranını belirler.

Volkman [32] 2: 3: 5 oda oranını belirler. Bolt, en iyi değerlerden biri olarak kabul edilen geometrik oranı 1: 1.5: 2.5 belirler [37, 38, 39, 40]

Walker, düzenlemelerin amacının kötü durumlardan sakınmak yerine, mod sorunlarını gizleyen oranlar belirmekten geçtiğini ifade eder. Oda oranlarına ilişkin bir yaklaşım geliştirir [33].

L_x, L_y ve L_z odanın sırasıyla x,y ve z eksenleri üzerindeki uzunluk birimini ifade eder;

$$\frac{L_y}{L_z} \leq \frac{L_x}{L_z} \leq \frac{4.5L_y}{L_z} - 4$$

$L_x<3L_z$

$L_y<3L_z$

Tamsayı değerlerinin yaklaşık % 5'i içindeki L_x, L_y ve L_z oranlarının da kaçınılması gerektiği öngörülmektedir [33]. Odanın zemini, xy düzleminde ve yüksekliği z ekseninde olduğu kabul edilir ve oda boyutlarının ilişkisi: $L_x \geq L_y \geq L_z$ [30].

Stüdyoların ve prova salonlarının tasarımı ile oditoryum ve konser salonları arasındaki temel fark, durağan dalgaların kontrolündedir. Tüm kapalı alanlarda normal modlar vardır, ancak küçük odalarda modlar duyabildiğimiz aralığa girer. Odanın merkezinde düşük frekanslı bir boşluğu önlemek istiyorsak, düşük frekanslarda yüksek oranda yansıtıcı olan bir malzeme kullanılabilir. Bir odanın bir duvarına uygulanan düşük frekanslı emici iyileştirme, odanın birinci mod frekansını düşürerek akustik olarak daha uzun görünmesini sağlar ve birinci düğümü odanın merkezinden uzağa doğru hareket ettirir [2].

Dikdörtgen bir odada bulunan hava sonsuz sayıda normal titreşim moduna sahiptir [1896, Rayleigh]. Yirminci yüzyılın ilk yarısında radyo yayıncılığı endüstrisinin hızlı büyümesi ile küçük oda akustiğine olan ilgi, özellikle küçük stüdyolarda, oda modlarının olumsuz etkisini ortaya koydu.

Küçük hacimler içinde kullanılabilir olan, rezonans frekanslarının sakıncalı gruplanmasını en aza indirecek 2: 3: 5'lik bir yükseklik, genişlik ve uzunluk oranı önerilir [22].

Oda modal etkisinin en aza indirmek için yükseklik, genişlik, uzunluk olarak 1.00: 1.14: 1.39, 1.00: 1.28: 1.54, 1.00: 1.60: 2.33'lük oda oranlarını önerilir [23].

En uygun modal dağılımı sağlayan oda oranları hakkındaki diğer çalışmalardan derlenen ve belirli oda oranları Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Oda iki ortogonal yönde aynı boyutlara sahip olduğunda, basınç minimumları aynı frekanslarda ve aynı yerde, yani merkezde gerçekleşecektir. Oda boyutları birbirinin katlarıysa, merkezde üst üste binen boşluklar da ortaya çıkar. 2:1 uzunluk oranının basit bir örneği için, uzun boyutun ikinci modu, kısa boyutun ilk (temel) moduyla çakışır. Bu odanın uzunlukları alışılmadık oda boyutu olsa da, bu büyüklük sırasına göre uzunluk-boy oranının olması nadir değildir. Genellikle, birbirinin tamsayı katları olmayan oda boyutlarını seçmek daha faydalıdır [2].

Çizelge 2.2 : Küçük odalar için önerilen oda boyut oranları [20].

Oran Adı	**Oda Oranı**	**Eşit Hacim**	**Eşit Yükseklik**
Harmonic	1:2:3	1:2:3	1:2:3
V.O.Knudsen	1.6:3:4	1.09:2.04:2.71	1:1.88:2.5
European	3:5:8	1.11:1.84:2.95	1:1.67:2.67
J.E.Volkmann	1:1.6:2.5	1.14:1.83:2.86	1:1.6:2.5
Golden Ratio	1:1.25:1.6	1.44:1.80:2.31	1:1.25:1.6
Golden Section	$(5^{1/2}-1):2:(5^{1/2}+1)$	1.12:1.82:2.94	1:1.63:2.63
P.E.Sabine	2:3:5	1.17:1.75:2.92	1:1.5:2.5
Sepmeyer 1	1:1.14:1.39	1.56:1.78:2.17	1:1.14:1.39
Sepmeyer 2	1:1.28:1.54	1.45:1.86:2.23	1:1.28:1.54
Sepmeyer 3	1:1.6:2.33	1.17:1.88:2.73	1:1.6:2.33
Louden	1:1.4:1.9	1.31:1.83:2.49	1:1.4:1.9
BBC Prototype	3.25:4.9:6.7	1.25:1.88:2.57	1:1.51:2.06

Düşük frekanslarda, küçük dikdörtgen odalarda, oda modlarının (eigentonlar) aralıklarının çok büyük ve genellikle yarım oktavdan daha büyük olması ve bunun oda tepkisinde istenmeyen tepeler ve vadiler (peak, valley) oluşturması mümkündür. Zirve ve vadilerin etkilerini en aza indirmek için, oda modlarının öngörülen yayılımına dayanarak oda modları dağılımı modelinin kabul edilebilirliği için Bonello Kriteri olarak adlandırılan kriterler belirlenmiştir [24]. Bu kriterler; her bir üçte birlik oktav bandının üzerindeki modları çizmek ve her bir üçte birlik oktavın en az bir önceki 1/3 oktavdan en az aynı sayıda veya daha fazla modu olduğunu kontrol etmektir. Frekans arttıkça oda modlarında eşit yayılım ve kademeli bir artış gözlenmelidir. Rastlantısal modlar olmadığından emin olmak gereklidir [20].

2.1.3 Küçük odanın akustik olarak tanımı

Akustik olarak "büyük oda koşulunun" sağlayan frekans aralıklarında sınırlama yapılır denklem 2.1 akustik olarak odanın frekansına bağlı büyük veya küçük hacim olması durumunu belirler.

$$f = 2000\sqrt{\frac{RT}{V}} \tag{2.1}$$

f : oda kritik frekansı, Hz.

V : oda hacmi, m^3

RT : çınlama süresi, s

Bu durum, normal modlarla ilişkili rezonans eğrilerinin kuvvetli bir şekilde üst üste binmesini sağlar ve bu nedenle ayrı ayrı gözlenemez. Çok kısıtlayıcı olmamakla birlikte: 400 m^3 gibi küçük hacimli bir oda ve 1 s'lik bir çınlama süresi, denklem 2.1 ile hesaplanabilir, duyulabilir frekansların çoğunun, yani 100 Hz'in üzerindeki sesleri kapsar [4].

Akustik açıdan küçük oda; bu bağlamda, oda akustiğinin Modal Bölgesi, $f < f_c$ durumunda oda küçük hacim olarak tanımlanır. Küçük odaların diğer önemli özellikleri, daha küçük emme alanları ve daha kısa çınlama süreleridir. Müzik provaları için, küçük oda boyutu tipik olarak, bir performans odasındakiyle aynı akustiği sağlamaz. Küçük oda akustiğinin aksine, büyük bir odanın akustiğine modlar değil speküler yansımalar hakimdir.

Yankılanan ses alanı, ışın izlemeli, geometrik akustik tarafından tahmin edilebilecek koşullar tarafından belirlenir. Bu, sesin ışık gibi davrandığı, yalnızca daha yavaş yayılma hızıyla hareket ettiği anlamına gelir. RT ~ 2.0 s olan 20.000 metreküplük bir salonda kritik frekans (Schroeder Frekansı) 20 Hz.'dir. Frekans aralığı geometrik akustik aralığından uzak olduğu için modlar büyük hacimlerde etkili değildir.

"Büyük oda koşulunu" yerine getiren odalarda veya frekans aralıklarında konumuz olan küçük hacim ve mod çalışmaları yapılmıyor. Frekans bölgesi bölümünde tartışılacak olan frekans aralıkları konusunda C bölgesine denk gelen bu durum küçük hacimlerin frekans değerinin üst sınırını belirlemektedir.

Çok küçük hacimli alanlarda ses problemleri kaçınılmazdır. 42.47 m^3'den daha küçük oda hacimlerinin, pratik olmadıkları, renklenme tonlarına çok yatkın olduklarını bilinir. Bundan daha küçük odalar, duyulabilir çarpıklıkların kaynağı olan abartılmış aralıklarla seyrek modal frekanslar üretir. Oda modlarına en uygun dağılımı sağlayan oda oranları bulunmaktadır. Tasarımda, bu oranların bir kılavuz olarak kullanılması önerilir; bu oranlarla tasarıma başlanması aksiyel mod frekanslarının aralığına ve yayılımına hakimiyet sağlar [1].

Oda ne kadar küçük olursa, durağan dalgalar gibi düşük frekanslı fenomenlerin önemi artar [2].

Kritik Frekans bir küçük oda kriteri olarak kabul edilir. Küçük odalarda f_c, 100 Hz mertebesindedir; bu müzik ve konuşmadaki tonların mod bölgesinde olduğu anlamına gelir.

Direkt ses ile erken yansıyan sesin birleşimi küçük ve büyük odalar için farklıdır. Büyük bir odada, ilk yansıyan sesin gelme süresi direkt sesten sonra yaklaşık 50-80 ms arasındadır. Küçük odalar için, yansıyan sesin gelme süresi direkt sesten sonra yaklaşık 1-2 ms arasındadır. Odada belirli bir zamanda duyduğumuz toplam ses enerjisi odadaki ses kaynaklarından gelen direkt ses ile yansıyan sesin birleşimidir. Küçük bir oda için zaman gecikmeleri (direkt ve yansıyan ses gecikmeleri) karakteristik olarak büyük odalardan daha kısadır [29].

Sabine formülü $RT_{60} = 0.161V/A$, küçük odalar için de geçerlidir ve sabit hacimde oda emilimini azaltarak, çınlama süresinin arttırılabileceğini gösterir. Küçük ve büyük odalarda ses ile ilgili kısa ve uzun bozulma süresi, dinleyiciye odanın büyüklüğü ve doğası hakkında önemli işitsel bilgiler verir. Odadaki ses emilimi $A = S\alpha$ (m^2) temel olarak odanın altı yüzeyi için kullanılan malzemelerin emilim katsayılarına bağlıdır. RT_{60} çınlama süresinin hacim / yüzey alanı oranı, V / S ile orantılıdır. Küçük dinleme odaları için V / S genellikle küçüktür (konser salonuna veya oditoryuma kıyasla) ve dolayısıyla bir küçük oda için çınlama süresi genellikle oldukça kısadır [29].

Küçük bir odada, dinleyici kaynak sesten yaklaşık 2 m veya daha fazla bir mesafede olacaktır. Düşük frekanslarda, hoparlörlerin yönlendirme faktörü, kırınım etkisinden ve oda emiliminden (A) dolayı azalır. Bu nedenle küçük bir odada dinleyici genellikle düşük frekanslarda odanın yankı alanında, $Q / 4\pi r^2 < 4/A$ olur. Daha yüksek frekanslarda, hoparlörlerin yönlendirme faktörü Q, odanın ses emilimi ile artar, tipik olarak yaklaşık 3-4 m uzaklıktaki dinleyici, yüksek frekanslarda $Q / 4a\ \pi r^2 > 4/A$ dinleme mesafesi dinleyicinin küçük salonların, büyük salonlara göre ölü olduğu algısını oluşturur [29].

Oda akustiğinde, birkaç metreküp ile birkaç yüz metreküp arası hacme sahip odalar küçük hacim olarak sınıflandırılır [5,30,31]. Küçük odaların şekli genellikle dikdörtgendir, bu nedenle, bu tür odalar için tipik olan akustik sorunlar, tekrarlayan eko, modal dağılım ve renklenmedir. Küçük boyutlar, bir oda yanıtının modal davranış tarafından güçlendirilmesine neden olur; bu nedenle, küçük odaların akustiği, düşük frekanslarda düzensiz ses dağılımlarına neden olur [30,31].

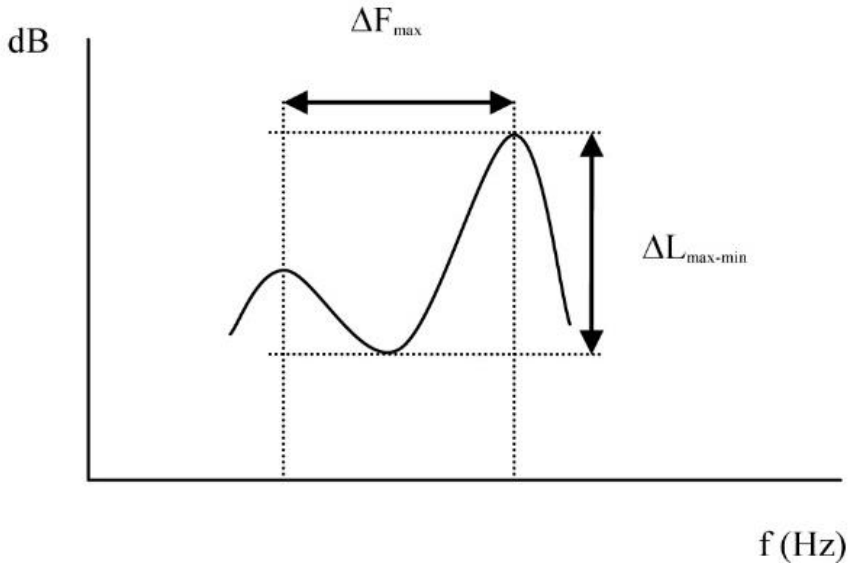
20. yüzyılın ortalarında, Manfred Schroeder, odanın akustik frekans tepkisinin geçiş bölgesini, yani ayrı modların baskın olduğu düşük frekans bölgesi ile yoğun modal örtüşme durumunun egemen olduğu yüksek frekans bölgesi arasındaki geçiş

özelliklerini araştırdı. Geçiş bölgesinde belirli ve sınırlayıcı bir frekans tanımı yoktur. Küçük oda ölçümlerinde $0.5f_c$'nin altında yüksek frekans bölgesinden ayırt edilemeyen frekans tepkisinin istatistiksel özellikleri bulunabilir. Kritik frekans oda akustiğinde çok önemlidir [34].

Schroeder Bölgesini düşük frekans bölgesinden ayıran ve ölçülebilen bir geçiş frekansına veya en azından bir geçiş frekansı bölgesine ihtiyaç doğmaktadır. Schroeder Frekansı bu gereksinimi karşılamak için tasarlanmamıştır. Deneysel veriler, Schroeder Bölgesinin alt limitinin Schroeder Frekansı kadar düşük olarak ayarlanabildiğini haklı gösterse de, düşürülemeyeceği gerekçelendirilmemiştir. Aksine, yüksek bölgenin istatistiksel özelliklerinin Schroeder Frekansından oldukça düşük olduğu örnekler mevcuttur. Önemli bir problem, Schroeder Frekansının, $f_c = 2000\sqrt{RT / V}$, doğrudan ölçümlerle tespit edilememesinden kaynaklanmaktadır. Alternatif yaklaşım, iki bölgenin ölçülebilir karakteristik özelliklerine bakmak ve bu özelliklerin gözlendiği frekans bölgelerini belirlemeye çalışmaktır. Schroeder'e göre, Schroeder Bölgesini karakterize eden temelde iki özellik vardır;

- Maksimumlar arasındaki ortalama boşluk.
- Maksimum ve minimum arasındaki dalgalanmaların ortalama seviyesi.

Spesifik olarak, iki bitişik tepe arasındaki ortalama frekans aralığı Şekil 2.5'te gösterildiği gibi $F_{maks} = 6.7 / RT_{60}$ olarak ifade edilir.



Şekil 2.5 : Bir odadaki frekans cevabı.

Manfred Schroeder, ondalık sayıları ve RT'nin arkasındaki “60” alt üyesini görmezden gelir ve maksimumlar arasındaki ortalama frekans aralığını şu şekilde ifade eder:

$$\Delta F_{max} = 4/RT \quad (2.2)$$

Modal teoriye göre, yüksek frekans bölgesi, mod bant genişlikleri, modların ortalama aralığı ile karşılaştırıldığında daha büyüktür yüksek bir modal örtüşme derecesine sahiptir. Bant genişliği sadece çınlama süresine bağlıdır.

$$B = \frac{\log_e 10^6}{2\pi RT} = \frac{2.2}{RT} \quad (2.3)$$

Bir frekans bölgesindeki modlar arasındaki ortalama mesafe:

$$\Delta f = \frac{c^3}{4\pi V f^2} \quad (2.4)$$

c : sesin hızı, m/s

V : hacim, m^3

f : merkez frekans, Hz

Birinci karakteristik özellikten başlayarak, Schroeder Bölgesinde maksimumlar arasındaki ortalama aralığın $\Delta F_{max} = 4/RT$ olduğu ölçelebilir ve hesaplanabilir. Buna karşılık, frekans ölçeğinin en düşük ucunda, gözlenen maksimum, mod zirvelerini ifade eder. Maksimumlar arasındaki boşluk, L uzunluklu bir odada asla c_0 / 2L'den fazla olamaz, ancak daha yüksek frekanslara doğru, gözlemlenen maksimumlar arasındaki ortalama frekans aralığı $1/f^2$ olarak ifade edilir. $f_1 \sim 900\sqrt{RT / V}$ frekansı etrafında, modlar arasındaki ortalama aralığın $f = 4/T$, tam olarak Schroeder Bölgesinde maksimum aralığına eşit olacağı tahmin edebilir. Bu frekans, Schroeder Frekansının altında, bir oktavdan biraz daha geniştir, $f_1 = 0.45f_c$. Sonuç olarak, f_1 ile ilgili bölgenin Schroeder Bölgesine mi yoksa Modal Bölgeye mi ait olduğunu belirleyen bir ortalama tepe boşluğu ölçümü tek başına ifade edilemez.

Mod Bölgesi veya Schroeder Bölgesine ait olmayan bir geçiş bölgesi mevcuttur. Şekil 2.11 ve 2.12 bu durumu ifade eden bölgeleri gösterir. A bölgesi, f_c ile Schroeder bölgesinin kesin düşük limiti olan uzun bir sapma bölgesini gösterir. Sapmanın f_1 etrafında meydana gelme olasılığı, ortalama modal aralığın $f < 1.3f_1$ için modal bant genişliğinden daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır. B bölgesi, Schroeder Bölgesinin frekans aralığının f_c'nin altına uzanma olasılığını temsil eder ve herhangi bir geçiş bölgesi olmadan f_1'de doğrudan üst Mod Bölgesine girer. C bölgesi, f_c'nin

Schroeder bölgesinin kesin düşük limiti olduğunu, ancak Mod Bölgesi ve Schroeder Bölgesi arasında çok kısa bir geçiş olduğunu gösterir.

2.2 Küçük Oda Tasarım Parametreleri

Küçük hacim akustiğinde; modlar, yansıma ve odanın şekli etkindir. Büyük hacimlerde kullanılan parametrelerin çok az bir kısmı küçük hacimler için uygulanabilirdir [3].

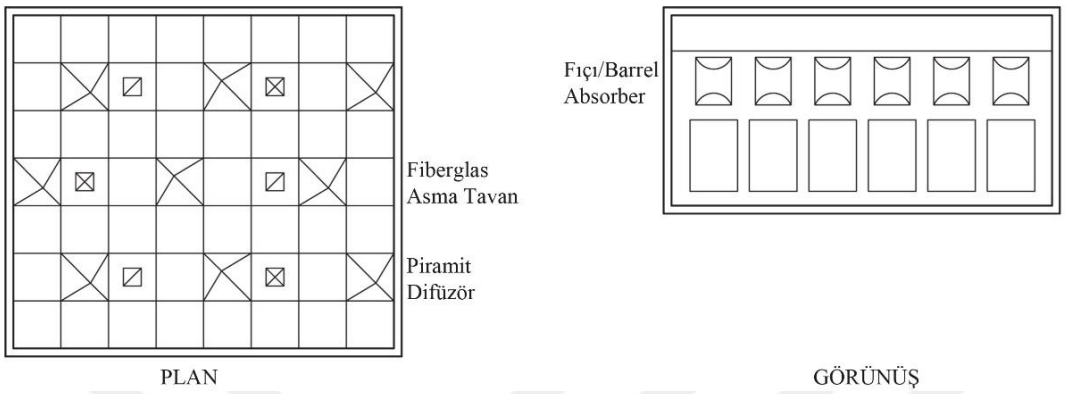
Küçük odaların tasarımında genel akustik tasarım parametrelerine ek olarak hacmin küçüklüğünden dolayı ortaya çıkan frekans olayları eklenir. Bu yeni parametreler hacim akustiğinde önemli bir yere sahiptir. Çınlama süresi, emilim, yansıma, difüzyon, gürültü kontrolü, modlar, bas kontrolü ve tekrarlayan eko başlıca küçük oda tasarım parametreleri olarak vurgulanabilir.

Odaları, tek kişilik odalardan tüm orkestraya uyum sağlayacak şekilde tasarlanmış odalara kadar bir yelpazede incelenir. Oda kullanımı, sesin kişi, öğretmen ve diğer orkestra elemanları tarafından duyulabilmesi gerekliliğinden dolayı performans hacimlerinden farklı bir akustik yaklaşım ile ele alınması gerekir. Akustik tasarımın amacı, bir performans alanının akustik özelliklerini elde etmek değildir, müzisyenlerin normal ses seviyesinde kendilerini ve birbirlerini rahatça duyabilmelerini ve çalabilmelerini sağlanaktır.

Bir genellemenin yapılabileceği ölçüde, küçük hacimlerdeki birincil endişe ses yüksekliğinin (ses şiddeti) aşırılığıdır. Çok küçük olabilecek bireysel odalarda, renklenme ve tekrarlayan eko da önemli endişe faktörleridir. Ses yüksekliği, oda hacmini artırarak ve tavan yüzeyine emilim ekleyerek kontrol edilir [2]. Enstrümanist başına 15.6 ila 21.8 m^3 ve vokalist başına 10.9 ila 14.2 m^3 birim oda hacmi, enstrümantal kullanım için 5.5 m – 6.7 m , korolar için 5 m – 6 m tavan yüksekliği tercih edilir [19]. Difüzörler tavanın en fazla % 20'sini kapsamalıdır. Duvar emilimi bant odalarında tekrarları ve çınlamayı gidermek için kullanılır. Duvarların yüksek kotlarına yerleştirilen emiciler aşırı düşük frekans yankılanmasını kontrol etmek için uydundur.

Küçük odalar, tekrarlayan ekoyu önlemek için duvarları açılı olarak tasarlanabilir. Duvarlara yerleştirilmiş emici paneller de yararlıdır çünkü duvarlar paralel olmasa bile, yatay düzlemde tekrarlanan yansımalar meydana gelebilir.

Tavan düzleminde gerçekleşebilecek tekrarları gidermek için difüzör kullanılmalıdır. Emici paneller, bir duvarın merkezine yerleştirildiğinde en etkindir, çünkü parçacık hızları köşelere göre daha yüksektir. Bir prova odasının örneği, Şekil 2.6'da gösterilmiştir [2].



Şekil 2.6 : Bir sınıf veya prova odasının tasarımı [2].

Oda tasarımındaki akustik konular:

- Oda Modları,
- Oda Çınlama Süresi,
- Oda Difüzyonu,
- Oda Gürültü Yalıtımı ve Arkaplan Gürültüsüdür.

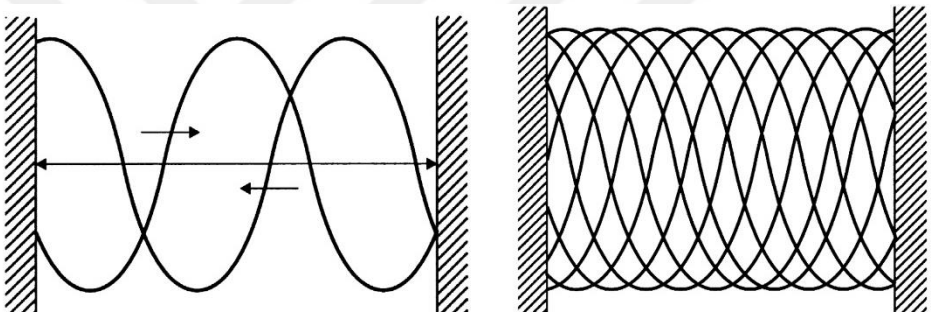
Oda boyutları, oranları, şekilleri ve yüzey malzemeleri odaların ses kalitesi üzerinden doğrudan bir etkiye sahiptir. Oda modları, oda oranları, modların eşit dağılımı, çınlama süresi ve difüzyon küçük hacimlerde birinci derecede incelenen akustik kriterlerdir.

Küçük bir odada iyi oda akustiği, tonlama, konuşmanın anlaşılabilirliği, denge, dinamizm ve ton üretimi gibi ince kavramları daha etkili bir şekilde öğretirken, zayıf bir akustik ortam öğrencinin temel müzik ve öğrenme becerilerinin gelişimini olumsuz yönde etkileyebilir. Okullardaki müzik odalarının tasarımı için İngiliz standardı [21] sadece istenen oda yankılanma sürelerini ve genel olarak oda modlarını ve tekrarlayan yansımayı (flutter echo) azaltmak için yayınırlık (diffusivity) ve müzik odalarında ses yayılımını artırmayı hedeflemiştir. Akustik sorunların odağının çoğu, dışarıdan gelen (örneğin taşıt trafiği) ve dâhili (örneğin bina hizmetleri) kaynaklardan gelen arka plan gürültüsü ve bitişik müzik odaları arasındaki ses geçişidir. Müzik enstrümanlarının türü ve enstrümanın potansiyel gürültüsü, küçük müzik odasının tasarımından dikkate alınmalıdır [20].

Odanın tasarımı sırasıyla şu şekilde yapılabilir; iç kabuk şekli ve boyutları belirlenir, oda modları ve dağılımı kontrol edilir, istenilen ve gerekli olan çınlama süresi belirlenir, emilim ve difüzyon miktarı belirlenir. Ek olarak odanın daha iyi bir akustiğinin olması ve farklı arayışlara cevap verebilmesi için değişken çınlama süresine sahip olabilecek şekilde tasarlanması artı değer oluşturur.

2.2.1 Oda modları

Sesin doğrusal süperpozisyonu, herhangi bir ses dalgası formuna uygulanabilen "durağan dalgalar" olarak bilinen bir dalga olayını açıklamak için kullanılabilir. Ses dalgaları yansıtıcı yüzeyler arasında hareket ettiğinde durağan dalgalar oluşur. Bunun meydana gelebileceği en basit sistem, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi iki yansıtıcı sınırından oluşur. Bu sistemde ses dalgası iki yansıtıcı yüzey arasında ileriye ve geriye doğru hareket eder [6,3].



Şekil 2.7 : İki paralel yüzey arasında bir ses dalgasının yansıması [6].

Oda modu, ses dalgasının, iki yansıtıcı yüzey arasında gidip geldiği, yanstıcı yüzeyler arasındaki mesafenin, geri yansıyan dalga ile kendisi üzerinde bir durağan dalga oluşturması ile meydana gelen bir durumdur. Modların dağılımı küçük bir odanın düşük frekans akustik performansını belirler [3].

Denklem 2.5 kullanılarak yansıtıcılar arasındaki belirli bir mesafe için durağan dalganın mevcut olabileceği en düşük frekans hesaplanır [2, 3]:

$$f = \frac{\mathrm{c}}{2\mathrm{L}} \tag{2.5}$$

f : durağan dalga frekansı, Hz

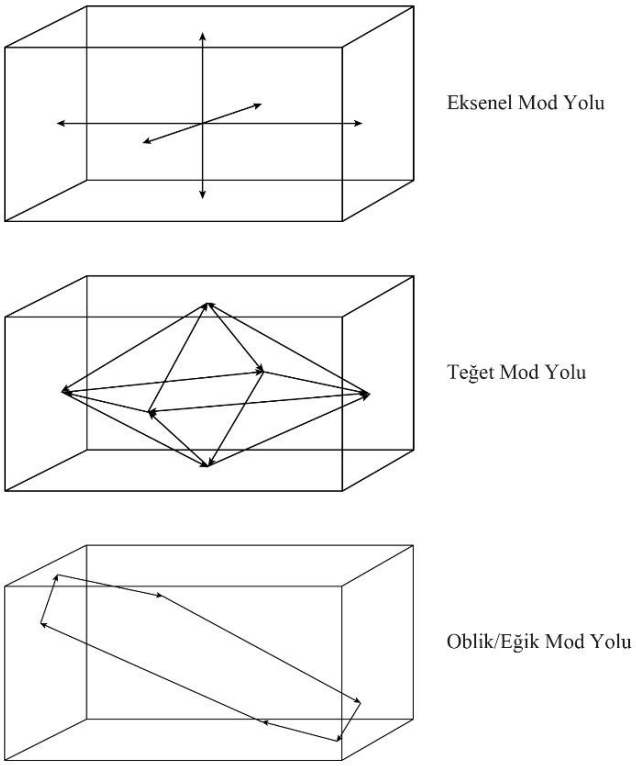
L : sınırlar arasındaki uzaklık, m

c : ses hızı, m/s

Basınç bileşeninin genliği karşılıklı iki sınır yüzeyinde ve iki yüzeyin orta noktasında maksimumdur. Hız bileşeni ile basınç bileşeni ters orantılıdır. Basınç bileşeninin maksimum olduğu yerde hız bileşeni minimum, basınç bileşeninin minimum olduğu yerde hız bileşeni maksimum değerdedir. Basınç genliğinin sıfır olduğu noktaya basınç düğümü (nod) denir ve maksimum olduğu noktaya basınç antinodu denir. Durağan dalgalardaki yarım dalga boylarının sayısı arttıkça, düğüm ve antinodların sayısı da artar ve rijit yansıtıcı sınırlar için, yarım dalga boylarının sayısı basınç düğümlerinin sayısına eşit ve basınç antinodlarının sayısının bir fazlasıdır. Hız düğümleri ve antinodlar her zaman basınç düğümlerini tamamlayıcıdırlar [6].

Bir oda içerisinde yansıyan ses dalgalarının bilinen yolları mod olarak adlandırılır ve sayıları sonsuzdur. Çok yönlü bir ses kaynağı bir odada olduğunda, sesi her yöne yayar. Ses kaynağı daha sonra kesilirse, bir miktar enerji durağan dalgaların tekrarlanan yollarında sıkışır. Bu yollarla ilişkili rezonanslara, odanın kendi frekansları için Almanca olan eigentonlar denir. Bunlar oda rezonansının doğal frekanslarıdır. Ses kaynağı tarafından uyarılan ses dalgaları mecburi modları (forced modes) üretirler. Ses kaynağı durduktan bir süre sonra etkisi azalmaya devam eder. Bu nedenle, tüm modlar dalga yolları üzerinde oluşmazlar yani tüm modlar durağan dalga değildir, ancak tüm durağan dalga yolları modlardır [6].

Dikdörtgen bir odada üç tip rezonans modu vardır: İki paralel yüzey arasında bulunan aksiyel modlar; dört yüzey arasında var olan ve diğer ikisine paralel olan teğet modlar ve yansıma yolu, başlangıç noktasına dönmeden önce altı yüzeye çarpan eğik modlar. Odanın en uzun boyutunun aksiyel modları en fazla enerjiye sahiptir, çünkü daha az yüzeye çarpmaktadırlar. Modlardaki enerjiyi tüketen her bir yansımada yüzeydeki emilimdir. Odanın en düşük modu her zaman en geniş aralıklı iki yüzey arasındaki aksiyel mod olacaktır. Teğet ve eğik modlar için daha uzun toplam yansıma yollarına rağmen, en düşük frekansları her zaman en düşük aksiyel moddan daha yüksek olacaktır, çünkü herhangi bir rezonans modunda desteklenecek en düşük frekansı belirleyen, yolun daha kısa olanıdır. Bunun nedeni, tam bir yarı dalga boyunun integral sayısının teğet ve eğik modların boyutlarına uyması gerektiğidir [2, 6]. Modların tipik yansıma yolları Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Bu üç tip modun kombinasyonu, yansıtıcı bir odada çok yoğun bir rezonans frekansı oluşturabilir [6].



Şekil 2.8 : Aksiyel(Eksenel), Teğet ve Eğik (Oblik) Modlar [6].

Denklem 2.6, dikdörtgen bir odada olası tüm modların frekanslarını verir [2, 3, 6].

$$f_{xyz}= \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{x}{L}\right)^2+\left(\frac{y}{W}\right)^2+\left(\frac{z}{H}\right)^2} \quad (2.6)$$

L : odanın uzunluğu, m

W : odanın genişliği, m

H : odanın yüksekliği, m

c : havadaki ses hızı, m/s

Oda boyutları birbirinin tam sayı katları ise, modal frekanslar çakışacaktır. Odadaki enerji, sesi renklendirecek olan birkaç modda birleşme eğiliminde olacaktır [2].

Sıfır ve belirli bir üst frekans sınırı *f* arasındaki modlarının sayısı N hesaplanabilir. denklem 2.7, dikdörtgen bir odadaki mod sayısını verir [2, 4].

$$N= \frac{4\pi}{3}V\left(\frac{f}{c}\right)^3+\frac{\pi}{4}S\left(\frac{f}{c}\right)^2+\frac{1}{8}L\left(\frac{f}{c}\right)^1 \quad (2.7)$$

V : Hacim, m^3

S : Yüzey alanları toplamı, m^2

L : 4 (L + W + H), m

Modların sayısı frekansla artıkça artar ve birbirlerine yaklaşırlar. Belirli bir frekanstaki ortalama mod mesafesi denklem 2.8 ile hesaplanır [2, 4].

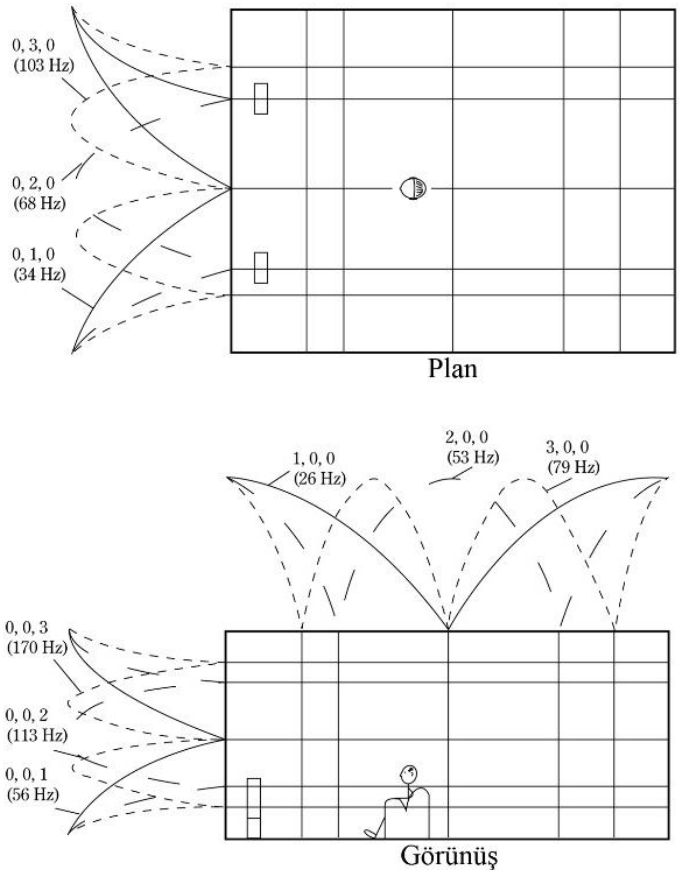
$$\Delta f = \frac{c^3}{4\pi V f^2} \tag{2.8}$$

c : havadaki ses hızı, m/s

V : oda hacmi, m^3

f : frekans, Hz.

Toole'un Şekil 2.9'da gösterilen soyutlanmış oda görünüş çizimlerini inceleyerek, odadaki basınç boşluklarının konumları belirlenebilir [11]. Uzunluk modu boşluğunu temsil eden yatay çizgiler, hem yükseklik görünümünde hem de plan görünümünde çizilir, çünkü bu boşluklar aslında tabandan tavana uzanan sıfır basınç noktalarıdır. Alıcı konumu bu çizgiler üzerinde konumlandırılmamalıdır.



Şekil 2.9 : Düşük frekanslı modal basınç dağılımlarının gösterimi [1].

Dinleme odası akustiğinin modal yapısı modların sayısı itibariyle oldukça karmaşıktır. Bu gösterimde ilk üç aksiyel (uzunluk, genişlik ve yükseklik) modu gösterilmektedir. Odanın tüm aksiyel mod frekansları, alanın düşük frekanslı akustiğinde düşünülmesi gerekli bir konudur. Bu aksiyel modlar, düşük frekanslı ses dalgaları ile uyarıldıklarında oluşur. Müzik yapısal olarak oldukça geniş bir frekans aralığına sahiptir, bu nedenle modların uyarılma durumları bu frekans skalası içrerisinde sürekli olarak değişmektedir.

Dinleyici konumunda düşük frekanslı ses alanı, odadanın o noktasındaki tüm aksiyel, teğet ve eğik modların vektörel toplamından oluşur. Ses kaynağı, bulundukları yerde geçerli olan modal rezonansları uyarır. Kaynağın bulunduğu konumunda oluşmayan modlar kaynağın çalışması ile uyarılmaz, sadece bu konumda kısmi veya tam maksimum değere sahip olan modlar orantılı olarak uyarılır. Odanın genel ambiyansının ayarlanması, odanın ses kaynağına en yakın iki köşesinde düşük frekanslı emilim uygulanması ile odanın düşük frekans akustiği üzerinde önemli bir etki oluşturur [1].

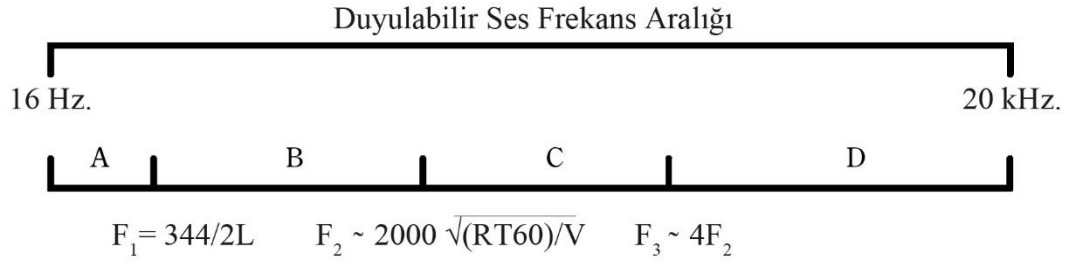
Odadaki tüm modların akustik olarak ayrı ayrı iyileştirilmesi mümkün değildir. Genel olarak etkili bir düşük frekans kontolü ve iyileştirmesi rezonans anormalliklerini kontrol eder.

2.2.1.1 Frekans bölgesi

Ses spektrumu, dalgaboyu açısından bakıldığında geniş bir alanı kapsar. 16 Hz, ortalama insan kulağının duyabildiği en düşük frekans sınırı olarak kabul edilir, dalga boyu 344/16 = 21.5 m'dir. İşitme üst sınır frekansı, 20.000 Hz, dalga boyu 344 / 20.000 = 0.017 m'dir. Sesin davranışı, dalga ve karşılaşılan nesnelerin boyutları arasındaki kıyas tarafından belirlenir. Bir odada, 0.017 m dalga boyundaki ses, birkaç cm'lik bir duvar düzensizliği ile önemli ölçüde yayılabilir. Aynı düzensizliğin 21.5 m dalga boyundaki ses üzerinde etkisi önemsiz derecede küçüktür [1].

Küçük odaların akustiği göz önüne alındığında, duyulabilir spektrum dört bölgeye ayrılır (Şekil 2.10). Kapalı alanların akustiği ile uğraşırken, F frekansı F_1, F_2 ve F_3 frekansları tarafından belirtilen dört bölge: A, B, C ve D'den oluşan duyulabilir frekans aralığını dikkate almak uygundur. D bölgesinde, speküler yansımalar ve ışın akustiği hakimdir. B bölgesinde, oda modları hakimdir. C bölgesi, difraksiyon (diffraction) ve

difüzyonun (diffusion) hakim olduğu bir geçiş bölgesidir. A bölgesinde ses durağan dalgalar tarafından desteklenmez [1].



Şekil 2.10 : Dört bölgeden oluşan duyulabilir frekans aralığı [1].

A Bölgesi, c_0 / 2L frekansının altındaki çok düşük frekans bölgesidir, burada L, odanın en uzun boyutudur. Bu en düşük aksiyel mod frekansının altında, odada ses için rezonans desteği yoktur. Bu, bu kadar düşük frekanslı sesin odada bulunamayacağı anlamına gelmez, sadece o bölgede oda rezonansı ile desteklenmez [1].

B Bölgesi, odanın boyutlarının göz önüne alındığı, boyutların sesin dalga boyuyla karşılaştırılabildiği, ayrıntılı olarak incelediğimiz bir bölgedir. Bu bölgede ışın akustiği değil, dalga akustiği uygulanmalıdır. Düşük frekans ucunda en düşük aksiyel mod olan c_0 / 2L ile sınırlandırılmıştır. Üst sınır kesin olmamakla birlikte denklem 2.9 tarafından verilen Schroeder Frekansı (f_s) veya Kritik Frekans (f_c) olarak adlandırılan bir yaklaşım ile hesaplanabilir [1] :

$$f_s = f_c \sim 2000 \sqrt{\frac{RT60}{V}} \tag{2.9}$$

F_2 : Schroeder Frekansı (f_s) veya Kritik Frekans (f_c), Hz.

RT_{60} : çınlama süresi, s

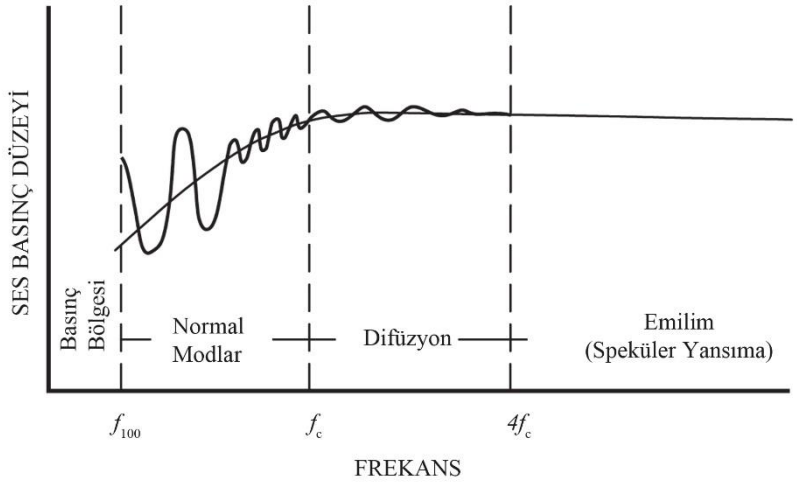
V : hacim, m^3

D Bölgesi, geometrik akustik yaklaşımının uygulanacağı dalga uzunluklarının yeterince kısa olduğu yüksek sesli frekansları kapsar. Bu bölgede, bilye topları gibi etrafı saran ses ışınları, gelme açısının yansıma açısına eşit olduğu genel kuralını izler. Bu bölgede sesin dalga boyu, odanın boyutlarına kıyasla oldukça küçüktür. Bu bölgede istatistiksel yaklaşımlar genellikle mümkündür [1].

C bölgesi, dalga akustiğinin (wave acoustics) kullanılması gereken B bölgesi ve ışın akustiğinin (ray acoustics) geçerli olduğu D bölgesi arasındaki bir geçiş bölgesidir. Düşük frekanslı uçta yaklaşık olarak F_2 kritik frekansı ($f_s = f_c$) ile sınırlandırılmıştır.

Yüksek uç sınırı yaklaşık $4F_2$ olarak yazılır. Bu bölge dalga boyu tarafından kontrol edilen, ışın akustiği yaklaşımına göre oldukça büyük, dalga akustiği yaklaşımına göre oldukça küçük dalga boylarını içeren bir geçiş bölgesidir [1].

Schroeder frekansı, oda davranışını bölgelere ayırmamızı sağlar. Şekil 2.11 frekansa bağlı çizilen bir odadaki ses basıncı seviyesinden bekleyebileceğimiz davranış tipini göstermektedir. Ayrıca, sabit durum oda yanıtını kontrol etmek için kullanılabilecek teknikleri de gösterir. Normal mod bölgesinin birkaç yüz Hertz'e kadar uzayabildiği küçük odalarda, istatistiksel bir model sadece nispeten yüksek frekanslarda kullanılabilir.



Şekil 2.11 : Kararlı durum oda yanıtı [2,6].

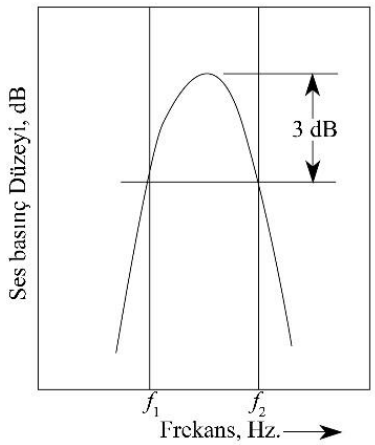
Bu şekil Şekil 2.11'de gösterilen çizimin grafik yorumudur. 4 bölüme ayrılan frekans bölgesinin grafiksel ifadesini göstermektedir.

2.2.1.2 Mod düşüşü ve mod bant genişliği

Çınlama düşüşü (reverberation decay), ölçülebilen geçici bir olaydır. Konuşma ya da müzik gibi geniş bant ses modlarını harekete geçirir, bu durumda modların düşüşü incelenmelidir. Çınlama genellikle oktav bantlarında ölçülür.

Oktav bantlar, her bir çınlama azalımını, yani bir çok modun azalımının bir ortalamasını içerir, fakat sesin oktav bandının azalımını tamamen açıklamak için bireysel modların düşüşüne dair bir yaklaşım gerekir. Oktav bant merkez frekansı ne kadar yüksekse, dahil edilen modların sayısı o kadar büyük olur [1].

Tüm modlar aynı oranda bozulmaz. Mod bozunması/düşüşü, bir çok parametrenin yanında, emici malzemenin odaya yerleştirilme şekline bağlıdır. Odanın zeminindeki halı, sadece duvarları içeren 1,0,0 veya 0,1,0 aksiyel modları üzerinde etkilidir. Daha fazla yüzey içeren teğet ve eğik modlar, sadece iki yüzeyi içeren aksiyel modlardan daha hızlı bozunur. Ses, yaygın olan düşük gelme açısına sahip teğet ve eğik modlarda; daha dik gelme açısına sahip olan aksiyel modlara göre daha etkin bir biçimde emilir. Modlar oda rezonanslarının bir parçasıdır. Ayrı olarak ele alındığında, her mod Şekil 2.12'de gösterildiği gibi bir rezonans eğrisi sergiler. Her mod, belirli bir bant genişliğine sahiptir. Her modun sonlu bir bant genişliği vardır. Odanın emiciliği artıkça bant genişliği de artar [1].



Şekil 2.12 : Mod bant genişliği [1].

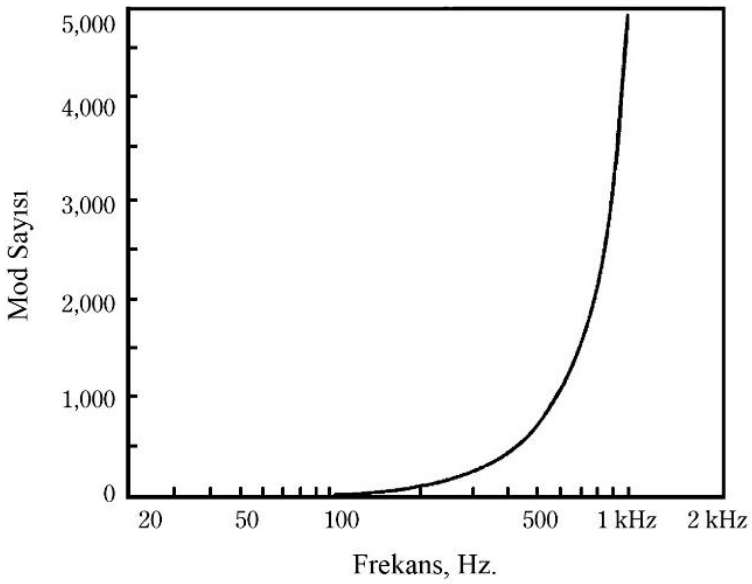
Her modun belirli bant genişliği denklem 2.10 ile bulunur.

Bant Genişliği = f_1-f_2 = $\frac{2.2}{RT_{60}}$ (2.10)

RT_{60} : çınlama süresi, s

2.2.1.3 Mod basınç alanları ve modal yoğunluk

Mod basınç noktaları plan ve görünüş üzerinde maksimum (1) minimum (0) olarak ifade edilir. Tepe ve vadi olarak adlandırılan bu noktalar odanın basınç dağılımını gösterir. Plan düzleminin üzerinde maksimum ve minimum basınç noktalarını ifade eden eş basınç eğrileri odanın frekansa bağlı modal yanıtını ve hacim içerisinde modal dağılımı göstermek için kullanılır.



Şekil 2.13 : Mod-frekans ilişkisi [1].

Maksimum başınç her zaman ve tüm modlar için oda köşelerinde oluşur. Tüm modları harekete geçirmek için ses kaynağını bu nedenle köşeye yerleştirilir. Tüm modları ölçmek için, alıcı tam karşı köşeye yerleştirilir [1].

Modal yoğunluk frekans ile doğru orantılıdır. Modal frekansların sayısı, frekans değeri artıkça artar. Yüksek frekans değerlerinde mod aralığı o kadar küçüktür ki, oda yanıtı frekansla belirgin bir şekilde düz olarak okunabilir [1].

2.2.1.4 Bonello kriteri, mod aralığı ve renklenme

Bonello kriteri, sesin spektrumunun alt ucunu 1⁄3 oktav genişliğine böler ve her banttaki mod sayısını 200 Hz'in altında değerlendirir. 1⁄3 oktav bantları, insan kulağının kritik bantlarına yaklaştıklarından dolayı seçilir. Bonello'nun ölçütlerini karşılamak için, her bir 1⁄3 oktav, öncekinden daha fazla veya en az aynı sayıda mod içermelidir. Modal çakışmalar, en az 5 mod olmadıkça tolere edilemez [1].

Renklenme küçük oda ses kalitesini önemli ölçüde etkiler. Bir odadaki yüzlerce modal frekansın hangisinin, renklenme yaratacağı belirlenmelidir. Modal frekansların aralığı kritik öneme sahip bir kriterdir. Frekans aralığı bölgelerinden, D bölgesinde, mod aralığı birbirine çok yakındır, bunlar yararlı ve zararsız olarak birleşme eğilimindedir. B ve C bölgelerinde, mod aralıkları daha büyüktür ve bu bölgede renklenme olayı ortaya çıkabilir [1].

Renklenme akustik bir kusurdur. Mod aralıklarının birbirinden bellirli oranda uzaklaşması her bir modun bağımsız olarak duyulabilir olmasına (eğer duyulabilir aralıkta frekansa sahip ise) neden olur.

Gilford, "bir sonraki aksiyel moddan 20 Hz'den daha fazla ayrılan bir aksiyel modun akustik olarak izole olma eğiliminde olacağı fikrini" savunur. Çakışan mod etekleri nedeniyle akustik olarak kaynaşamayan mod, bağımsız hareket etme eğiliminde olacaktır. Bu kriter sadece aksiyel modlar için geçerlidir. Mod aralığı için bir başka kriter de, üç tip modu da dikkate alan Bonello tarafından önerilmiştir. Kritik bir bantta tüm modal frekansların; ilgili mod frekansının en az % 5'i kadar diğer mod frekansından ayrılması fikrini savunur. Örneğin, 20 Hz'de ve 21 Hz'de (20 Hz'in % 5'i 1 Hz'dir) oluşan iki mod kabul edilebilirdir. Ancak 1 Hz aralığı 40 Hz için kabul edilemez (40 Hz'in % 5'i 2 Hz'dir). Gilford, "öncelikle bağımsız ve birbiriyle ilişkili olmayan modal eylemlerden kaynaklanan problemleri önlemek için aksiyel modların birbirinden ne kadar mesafede olması gerektiğini" ifade eder. Bonello, "çakışma etkilerinden kaçınmak için aksiyel, teğet ve oblik modların birbirinden ne kadar mesafede olması gerektiğini ifade eder [1].

Frekanslar arasındaki sıfır mesafe durumu, renklenme olarak ifade edilir. Sıfır mesafe, iki modal frekansın çakıştığını ifade eder ve bu çakışık modlar, sinyal bileşenlerini ilgili frekansta aşırı uyarma eğilimindedir. 80 Hz altındaki konuşma renklenmeleri nadirdir, çünkü spektrumun bu bölümünde konuşmada çok az enerji vardır. Erkek ya da kadın sesleri için 300 Hz üzerinde hiçbir konuşma renklenmesi oluşmaz [1].

Çizelge 2.3 Gilford ve Bonello kriterlerini, etkili mod türünü, kriterin belirlediği ideal mod mesafesini ve renklenme durumunun oluşması koşulunu göstermektedir. Gilford kriterine göre iki aksiyel mod arasında 20 Hz.'den az mesafe olması; Bonello kriterine göre ise %5 Hz.'den az mesafe olması renklenme durumunu oluşturur.

Çizelge 2.3 : Gilford ve Bonello kriterlerinin koşulu ve reklenme durumu.

Kriter	**Mod Türü**			**Mod Mesafesi**	**Renklenme Durumu**
	Aksiyel	Teğet	Oblik	Δf	
Gilford	+	-	-	20	$\Delta f > 20$ Hz. ise "Var" $\Delta f < 20$ Hz. ise "Yok"
Bonello	+	+	+	%5	$\Delta f <$ %5 Hz. ise "Var" $\Delta f >$ %5 Hz. ise "Yok"

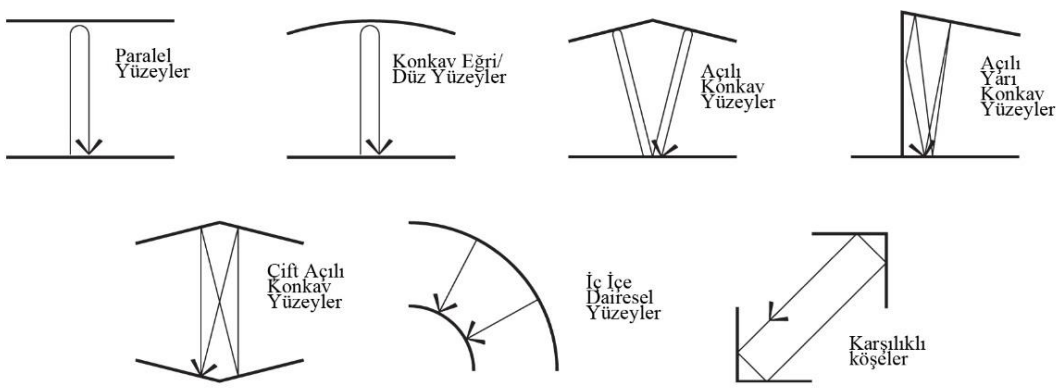
Sesin düşük frekanslardaki renklenmesinin belirgin nedeni; modların yoğunluğundan veya modlar arasındaki büyük boşluklardan kaynaklanan, oda tepkisinin düzlüğündeki anlık sapmalardan ileri gelir. Geçici müzik enerjisi patlamaları, modların eşit olmayan şekilde , zorla uyarılmasına neden olur. Geçici uyaran kaldırıldığı zaman, her bir mod doğal (ve genellikle farklı) frekansında bozulur [1].

Küçük odaların akustik incelenmesinde renklenmeler özellikle konuşma kalitesinde akustik kayıplara neden olur. Renklenmeler, konuşma sesinde müzik sesine göre daha belirgindir. Konuşma eyleminde kelimelerin anlaşılabirliği önemlidir. Renklenme kelime heceleri arasında devamlılık ve anlaşılabilirlik sorunlarına neden olur.

2.2.2 Tekrarlayan eko

Eko, ayrı olarak işitildikten sonra çok yüksek ve uzun gelen ses tekrarıdır. Tekrarlayan eko paralel yansıtıcı duvarlar arasında meydana gelir. Sesin kısa patlamaları paralel yüzeyler arasında yansır, yüzeyler arasında yeterince mesafe var ise giderek azalan ekolar serisi oluşur [8]. Bu yansımalar sadece psikolojik olarak sinir bozucu ses efektleri oluşturmakla kalmaz, aynı zamanda müzikal seslerin duyulmasına, algılanabilirliğine ve tanımlamaya da zarar verir [41].

Kaynak ve alıcının birbirine yakın olduğu bir müzik prova odasında veya kayıt stüdyosunda, tekrarlayan eko olarak bilinen, tekrarlanan çoklu yansımalar rahatsız edici olabilir. En bilinen örnek iki paralel duvar arasında oluşur, ancak bu durumu üretebilen çok sayıda geometrik durum vardır. Şekil 2.14'te birkaç örnek gösterilmiştir. Eko, emici malzeme, difüzör elemanlar, aşamalı reflektörler veya yansıtıcı yüzeyleri birleştirerek iyileştirilebilir. Küçük odaların tasarımında bu tip kapalı yansıma döngüleri, yüzeye uygulananacak malzemelerle iyileştirilebilir [2].



Şekil 2.14 : Tekrarlayan eko üreten geometrik olasılıklar [2].

Görüntü kaydırma eşiğinin 10 dB daha üzerinde olan yansımalar başka bir algısal eşik oluşturur. Yansımalar, merkezi görüntü üzerine bindirilmiş olan ayrı ekolardır. Böyle ayrık yankılar, herhangi bir pratik durumda ses kalitesine çok zarar vermektedir. Bu nedenle, bu tür yankılara neden olan yansıma seviyesi / gecikme kombinasyonlarından, uzak durulmalıdır [1].

Bir odanın karşıt iki yansıtıcı yüzeyi paralel ise, her zaman tekrarlayan eko olasılığı vardır. Bu, yatay veya dikey modlar için geçerlidir. Zaman içinde eşit aralıklarla yapılan ardışık, tekrarlayan yansımalar, müziğin perdesini veya tınısını renklendirebilir ve konuşmanın anlaşılabilirliğini azaltabilir. Modern mimaride süsleme eksikliği, daha fazla tekrarlayan eko olasılığı ile sonuçlanır [1].

Eko, ses emici malzemenin dikkatlice yerleştirilmesi veya duvarların açılandırılmasıyla azaltılabilir. Duvarın açılandırılması çoğu durumda pratik değildir ve emilimin artması çoğu zaman bir mekânın akustik kalitesini düşürür. İhtiyaç duyulan şey, emilimden çok yayılma yoluyla yansımaları azaltan bir duvar uygulamasıdır. Difüzörler, ses yansımasına katkıda bulunmasının yanı sıra speküler yansımayı azaltır [1].

Emici duvar panelleri veya kaplamalarının aksine, difüzörler tekrarlayan eko problemini en aza indirir ve oda çınlama süresini önemli ölçüde azaltmadan oda difüzyonunu arttırır [20].

Difüzör, gelen sesi çok çeşitli yönlerde yansıtır. Yansımaları düz bir yüzeyin ürettiği speküler ya da ayna benzeri yansımaların aksine nonspeküler olarak adlandırılır. Silindirler gibi reflektörler bir düzlemde yayıcı ve diğeri bir düzlemde speküler etkide olabilir. Kuadratik orantılı veya çeyrek dalga boyu kuyu difüzörleri de bu şekilde davranır. Çok yönlü reflektörler, çeşitli yönlerde speküler yansımalar oluşturabilir ve davranışları mükemmel olmamasına rağmen bir odada difüzyona katkıda bulunabilir. Prova odalarında ve stüdyolarda sesin yayılması, genişlik (spaciousness) ve çevreleme/sarma (envelopment) duygusuna katkıda bulunur. Speküler yansımalar arasındaki boşlukları doldurmaya yardımcı olabilir. Difüzyon, akustik enerjinin emicilerle etkileşime girmesini sağlayan yankılanan bir alan yaratarak emici malzemeleri daha etkili hale getirir [2].

2.2.3 Çınlama

Bir ses kaynağının kapatılmasından sonra sesin azalımı, çınlama olarak adlandırılır ve bir odadaki en önemli parametrelerdendir. Odada algılanan ses kalitesiyle doğrudan ilgilidir. Bir odada, duvarlardan ve diğer nesnelerden yansıyan doğrudan sesi ve ardışık yansımaları algılarız. Ses algısının kalitesi, doğrudan ve yansıyan sesin oranına, sinyal türüne, ses bozulmasına ve odanın diğer fiziksel parametrelerine bağlıdır. Çınlama süresi oda şekline, odadaki emici yüzeylerin dağılımına ve ses yayılımına bağlıdır. Çınlama süresinin türetilmesi, odadaki ses alanıyla ilgili çeşitli varsayımlara dayanır ve bu nedenle, çınlama süresi, hesaplaması için farklı yaklaşımlar mevcuttur [5].

Çınlama süresi (RT) muhtemelen oda akustiğinde en yaygın kullanılan parametredir ve genellikle Schroeder entegreli tepki yanıtı tekniği ve doğrusal regresyon kullanılarak ölçülür [2, 20].

Bir kaynak tarafından kısa bir ses, serbest bir alanda yayıldığında, alıcı konumuna benzer bir formda ulaşır. Alıcının yakınında yansıtıcı bir yüzey olması durumunda önce direkt ses ardından yansıtıcı yüzeyden yansıyan ses alıcıya ulaşır. Bu durum kapalı hacimlerde, alıcı tarafından alınan ses sinyalinin direkt ses ile yansıyan seslerin birleşimi olarak algılanır. Ses yüzeyler tarafından yutuluncaya kadar zamanla enerjisi azalır. Sesin azalımı oda yüzeylerinin yansıtıcılığına ve sayısına bağlıdır. Çınlama süresi RT, bir hacim içerisindeki, sabit bir ses basınç düzeyinin 60 dB azalması için geçen süredir. Çınlama süresi odanın fonksiyonu ile doğrudan ilişkilidir. Uzun çınlama süresi konuşmayı daha az anlaşılır, müziği ahenksiz kılar ve arka plan gürültüsü üretir. Kısa çınlama süresi konuşmayı boğar, müziği zayıf ve kesik algılatır ve arka plan gürültüsünü bastırır [8]. Çınlama süresi, Sabine tarafından ifade edilen denklem 2.13 ile matematiksel olarak hesaplanır.

$$\mathrm{RT} = \frac{0.161.V}{A+x.V} \tag{2.13}$$

RT : çınlama süresi, sn

V : odanın hacmi, m^3

A : odanın yutuculuğu, m^2 sabin

x : havanın yutuculuğu

0.161 : matematiksel sabit, sn/m

Odanın yutuculuğu A, aşağıdaki denklem 2.14 ile hesaplanır:

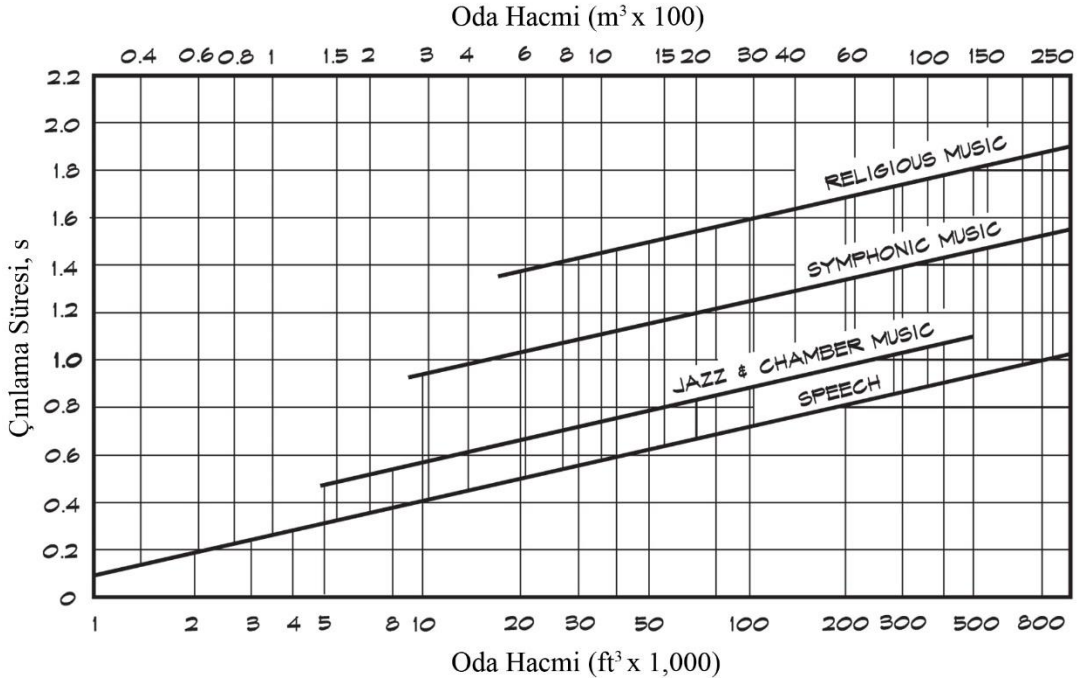
$$A=\alpha_1.S_1+ \alpha_2.S_2+\ldots\ldots \alpha_n.S_n \quad (2.14)$$

α : emme katsayısı

S : toplam yüzey alanı, m^2

Çınlama süresi odanın hacmine ve toplam yutuculuğuna bağlıdır. Sabine denklemi aşırı yutucu hacimler için geçerli değildir [8].

Küçük odalarda çınlama süresi önemli bir tasarım parametresidir [1, 2]. Konuşma ya da dublaj için tasarlanmış odalar çok ölü olmalı; müzik için biraz daha canlı alanlar olmalıdır. Şekil 2.15, oda hacmine ve müzik türüne bağlı olarak küçük stüdyolar ve kontrol odaları için çınlama süresi değerlerini gösterir. Bu hacimler için çınlama-zaman/frekans eğrisinin tercih edilen şekli düzdür [2].



Şekil 2.15 : 500-1000 Hz aralığında çınlama süreleri [2].

Prova odalarında çeşitli enstrümanların, 20 ile 100 metreküp arası odalar için tercih edilen orta frekans çınlama süreleri; ritim için 0.3-0.5 saniye; yaylı enstrümanlar için 0.6-0.9 saniye; nefesli enstrümanlar için 0.4-0.7 saniyedir. Çınlama süresinin alt aralığı yaklaşık 10 metreküplük oda hacmi ile yaklaşık 100 metreküplük oda hacimleri aralığı için önerilir. Ses yüksekliği (loudness), sinyal / gürültü oranı (signal to noise ratio), netlik (clarity), denge (balance, interaural level difference) ve müzik türü gibi diğer faktörler de ideal çınlama sürelesini etkiler [20].

Müzik öğrencilerinin % 59'unun “canlı” bir odayı tercih ettiği, % 11'inin “ölü” bir odayı tercih ettiği ve % 30'unun ortada bir durumu tercih etmektedir. Ölü oda, 0.4 ila 0.5 saniye çınlama süresine sahip ve canlı oda 0,8 ila 0,9 saniye çınlama süresine sahip bir odayı ifade ettikleri hesaplanmıştır. Tercih edilen çınlama süresi 0.7 saniyedir [25].

Müzik prova odaları için en uygun çınlama süreleri ve kabul edilebilir minimum büyüklük; çınlama süresi için 0,4 ila 0,5 saniye arasında olmalıdır. 100 Hz' de 0.6 veya 0.7 sn gibi bir artış kabul edilebilir. Yaklaşık 60 m^3 hacme sahip prova odaları için, 100 Hz' de yaklaşık 0,8 saniye gibi bir artış ile birlikte 0.5 ila 0.6 saniyelik bir çınlama süresi uygundur [26]. Çizelge 2.4, çeşitli müzik odaları için tipik boyutlar ve önerilen orta frekans (T_{mf}) çınlama sürelerini göstermektedir.

Çizelge 2.4 : Küçük müzik odaları için önerilen çınlama süreleri [20].

Müzik Etkinlik Alanı	**Alan m^2**	**Yükseklik m**	**Hacim m^3**	**AS2107,2000**	**DfES,2002**	**BB93,2003**	**OCPS,2003**	**ANSI S12.60**
Müzik Teorisi Dersliği	50-70	2.4-3.0	120-210	0.5-0.6	0.4-0.8	<1.0	Mevcut Değil	<0.6
Topluluk / Müzik Stüdyosu	16-50	2.4-3.0	38-150	0.7-0.9	0.5-1.0	0.6-1.2	0.5-0.7	<0.6
Resital Odaları	50-100	3.0-4.0	150-400	1.1-1.3	1.0-1.5	1.0-1.5	Mevcut Değil	Mevcut Değil
Eğitim / Uygulama Odası	6-10	2.4-3.0	14-30	0.7-0.9	0.3-0.6	<0.8	<0.5	<0.6
Stüdyo Kontrol Odası	8-20	2.4-3.0	19-60	0.3-0.7	0.3-0.5	<0.5	<0.6	Mevcut Değil

AS2107,2000 **:** Acoustics-Recommended design sound levels and reverberation times for building interiors
DfES,2002 **:** Great Britain. Department for Education and Skills
BB93,2003 **:** Building Bulletin 93 acoustic design of schools - performance standards
OCPS,2003 **:** Orange County Public Schools Standards
ANSI S12.60 **:** American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools**,**

Bir odada istenilen çınlama süresini sağlamak için, zemine, duvarlara ve tavanlara akustik olarak emici paneller yerleştirilir. Emici materyalleri seçerken, 250 Hz, 500 Hz, 1kHz ve 2kHz oktav bantlarındaki çınlama sürelerinin, hedef çınlama süresinin % 10'u içinde tutulmalıdır. 125 Hz oktav bandındaki çınlama süresi, hedef çınlama süresinden daha yüksek olabilir, ancak daha düşük olamaz. 4 kHz oktav bandındaki çınlama süresi, hedef çınlama süresinden daha düşük olabilir, ancak daha yüksek olamaz. Akustik olarak tasarlanmamış yüzeyler karşılıklı olarak konumlanmamalıdır. Odanın çınlama süresi, farklı yüzey özellikleri taşıyan değişken paneller ile müzisyenin oda akustiği ile deney yapmasına ve ayrıca odanın çeşitli müzik

enstrümanları için kullanılmasına izin verecek şekilde çınlama süresini değiştirme yeteneğine sahip olması akustik bir avantajdır [20].

Prova odaları için, aynı boyuttaki performans odalarına kıyasla biraz daha kısa bir çınlama süresi tavsiye edilir [27, 28].

Çınlama, müzik kalitesi üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir ve bir performansın samimi, sıcak, tam, dengeli, parlak, net, ayrıntılı veya karma bir şekilde yaşanıp yaşanmayacağını belirler. Uzun bir çınlama süresi (RT), dikkat gerektiren performanslar için gerekli olan samimiyeti yok edecektir. Bas frekans çınlama süresi orta aralık frekanslarına göre daha uzunsa, hacmin akustik olarak sıcak olduğu söylenir. Müzik ve akustik konusunda önde gelen bir otorite olan Leo Beranek, müzisyenler ile yaptığı röportajlardan ve kayıt endüstrisinin deneyimlerinden, bugün dinleyicilerin belirli dönemlerin müziğinin performansı için belirli çınlama süresini tercih ettiklerini açıkça belirtti. Barok ve Klasik dönemlerde inşa edilenler, 1.4 ve 1.8 saniye arasında çınlama sürelerine sahipti; on dokuzuncu yüzyılın başlarından bu yana inşa edilenlerin RT ortalaması 2.0 saniye veya daha fazladır. Prova alanlarının konser salonundan akustik olarak çok fazla farklılık göstermemesi gerektiğini varsaymak mantıklıdır, ancak bazı sapmalar zorunludur. Müzisyenlerin provadan konser salonuna geçmesi performans güvensizliği, ve denge sorunlarına neden olacaktır [A33].

Bir hacimde yutucu miktarı genel dinleme koşullarının oluşturulmasında önemlidir. Oda aşırı ölü ve yankısız veya çok canlı ve yankılanıyorsa, dinleyici yorgunluğu gelişebilir ve müzik kalitesi bozulabilir [1].

Çınlama bir odadaki algılanan ses kalitesiyle ilgilidir. Bir odadaki sesi dinlerken, etrafımızdaki duvarlardan ve diğer nesnelerden yansıyan doğrudan sesi ve ardışık yansıyan sesi algılarız. Ses algısının kalitesi, doğrudan ve yansıyan sesin oranına, sinyal türüne, ses bozulmasına ve odanın diğer fiziksel parametrelerine bağlıdır. Çınlama süresi, oda şekline, odadaki emici yüzeylerin dağılımına ve dâhili ses yayılımına bağlıdır. Çınlama süresinin türetilmesi, odadaki ses alanıyla ilgili çeşitli varsayımlara dayanır ve bu nedenle farklı formül yaklaşımları mevcuttur.

2.2.4 Gürültü kontrolü

Hacimlerin ses yalıtımı oda içerisindeki sesin akustik kontrolü ve yapılacak akustik iyileştirmenin etkinliği açısından oldukça önemlidir. Belirlenen kaynaklar dışında kontrolsüz bir ses kaynağının varlığı odanın belirlenmiş parametreler altında çalışılmış

olan akustik tasarımını bozabilir. Hacimlerin yalıtım değeri yüksek duvarlar ile birbirinden ayrılmasının yanı sıra fonksiyonlarına göre gruplanarak kaynak olma durumları göz önünde bulundurulup, tampon hacimler ile birbirinden ayrılması, kritik hacimlerin plan şemasında bilinçli bir şekilde gürültü kaynaklarından izole yerleştirlmesi, tasarımın bütünsel yaklaşımında oda bazında yapılacak akustik tasarımı kuvvetlendirecek etkiye sahip olacaktır.

En kritik alanlar, depo ve koridor gibi ses üretmeyen ölü alanlarla ayrılmalıdır. Yapının döşemeden ses geçişinin engellenmesi ve gürültülü alanların gruplanması kontrolü kolaylaştırır. Müzik prova odalarındaki ve stüdyolardaki hacimler arasında gürültü yalıtımı oldukça fazla parametreye bağlı olabilir. HVAC sistemleri, kanallar, kapılar ve pencerelerden ses iletilir. Titreşim kaynaklı gürültüler, levhalar, yapısal elemanlar, borular ve rijit elemanlar yoluyla hacimler arasında iletilebilir [17].

Arka plan gürültü düzeyleri sorulduğunda müzik öğrencilerinin % 86'sının, çalışan diğer öğrencileri, % 9'unun trafik gürültüsünü ve % 4'ünün diğer sesleri rahatsız edici bulmaktadır [25]. Müzik enstrümanları çok fazla ses üretebileceğinden küçük hacimlerde rahatsız edici derecede gürültülü olabilirler. Bu, yetersiz akustik emilime sahip küçük müzik odalarındaki yaygın bir sorundur [20].

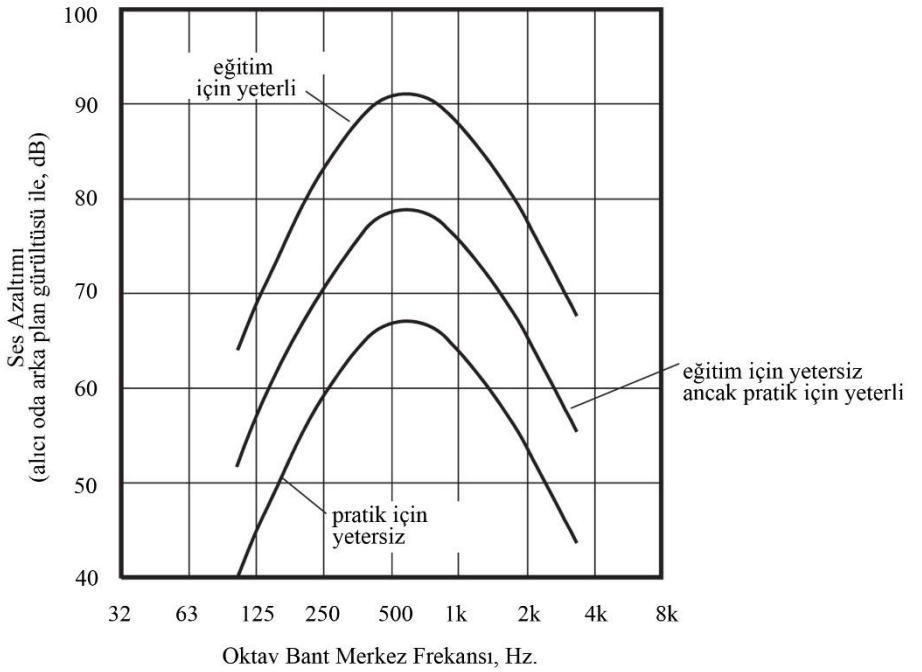
Kritik dinleme ortamlarında arka plan gürültü seviyeleri çok düşük tutulmalıdır. Stüdyo ve dinleme odalarında arka plan seviyeleri, NC 30'dan işitme eşiğine kadar kişisel bir zevk meselesidir. Çizelge 2.5 bir başlangıç noktası tanımlar. Seviyeler NC seviyesi açısından listelenmiştir. A ağırlıklı seviyeler, HVAC kaynaklı gürültü için yaklaşık 5 dB daha yüksektir. NC 10 değerleri formel olarak tanımlanmamış olmasına rağmen, 63 Hz'den 500 Hz'e kadar NC 15'in altında yaklaşık 4 dB ve 1000 Hz'de ve yukarısında NC 15'in altında 5 dB olarak alınır. Müzik uygulama odalarındaki yüksek arkaplan düzeylerinin, sağladıkları maskeleme nedeniyle istenebileceği durumlar da mevcuttur [2].

HVAC üniteleri, stüdyolarda ve dinleme odalarında önemli bir gürültü kaynağıdır. Düşük arka plan seviyeleri için akış kaynaklı gürültü kontrolü özellikle önemlidir. Ayarlanabilir amortisörlü terminal cihazlarından kaçınılmalıdır. Ses kontrol üniteleri, sonlandırmanın tam akışına yerleştirilmelidir. Kanallar odalar arasındaki gürültüyü iletir. Bitişik alanlara hizmet eden HVAC kanalları, eşit ses yalıtımı sağlayacak şekilde yönlendirilmelidir [2].

Çizelge 2.5 : Stüdyo ve Dinleme Odaları Arkaplan-Gürültü Düzeyleri [2].

Oda Tipi	**Gürültü Seviyesi**
Yaşama Hacmi/Salon	NC 25-30
Müzik Pratik Odası	NC 30–35
Grup / Orkestra / Koro Odası	NC 25–30
Video Sonrası Prodüksiyon	NC 25–30
Dinleme Odası / Ev Sineması	NC 20–25
Proje Atölyesi	NC 25–30
Ses Aşaması (film)	NC 20–25
Dublaj Aşaması	NC 20–25
Kontrol odası	NC 15–20
Kayıt stüdyosu	NC 10–15
Puanlama Aşaması	NC 10–15
Foley Sahnesi	<NC 10

Prova ve öğretim odaları için alıcı odadaki oktav bant gürültü azaltma ve arka plan gürültü seviyeleri açısından yalıtım gereksinimleri Şekil 2.16'da gösterilmektedir [18].



Şekil 2.16 : Müzik uygulama ve öğretim odaları arkaplan gürültü seviyeleri [2, 18].

Bu tez çalışması kapsamında çalışılacak olan hacimlerin dış ortamdan tamamen izole olduğu ve gerekli yalıtımın yapıldığı kabul edilerek hacimler üzerindeki çalışmalara bu kabul üzerinden devam edilmiştir.

3. SESİN YANSIMASI, YUTULMASI VE YAYILMASI

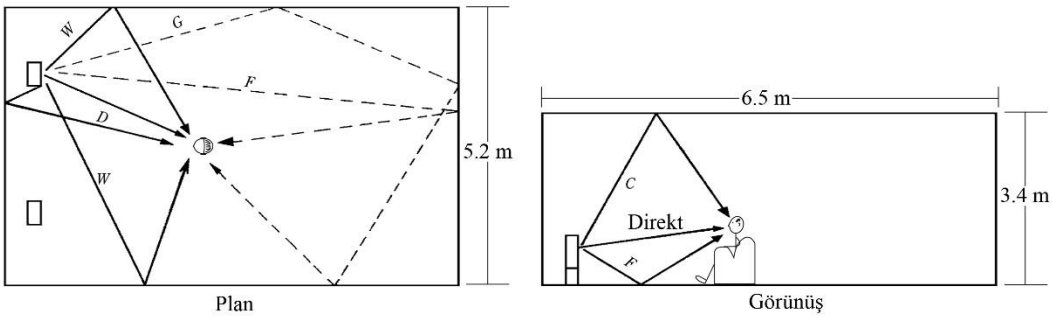
Ses yansımalarının algısal etkisi odanın büyüklüğüne bağlıdır. Bir kayıt stüdyosundaki, kontrol odasındaki veya dinleme salonundaki yansıma algısı ile bir müzik salonundaki veya büyük bir oditoryumdaki oldukça farklıdır. Dinleyiciye ulaşmak için konuşan kişinin ilk sesi, en kısa mesafeyi kullanarak doğrudan alıcıya/dinleyiciye ulaşır. Dinleyicinin kulaklarına ilk ulaşan bu doğrudan ses, sesin geldiği yönün algısını kurar. Odanın çeşitli yüzeylerinden yansıyan dalganın akışıyla su yüzüne çıkmış olsa da, bu yönsel algı devam eder, yönelim söz konusu olduğunda diğer tüm yansımaların etkilerini bastırma eğilimi gösterir. Cremer buna ilk dalga önü (wavefront) yasası olarak adlandırmaktadır. Ses kaynağına yönün bu şekilde sabitlenmesi, bir milisaniyenin küçük bir kesiti içinde gerçekleşir ve doğrudan sesin gelmesini takiben gelen yansımalardan etkilenmez [1].

Emilim, akustik enerjiyi başka bir enerji biçimine, genellikle ısı enerjisine, çevirme olayına verilen isimdir. Akustik emilim birimi, Sabindir. Teorik olarak, 1.0 sabin, tamamen emilim anlamına gelir. Sabine'nin orijinal çalışması, bir malzemenin ses emme gücünü belirlemekle ilgiliydi. Bir malzemenin yüzey alanının performansının, açık bir pencerenin alanıyla karşılaştırılmasıdır. Örneğin, eğer bir malzemenin 1 m^2'si, 0.4 m^2'lik açık pencere ile aynı emme gücünü verirse bağıl soğurma kuvveti (emme katsayısı) 0.4'e eşit olacaktır [3].

Difüzyon (yayılma), özel bir yansıma biçimidir. Ses dalgaları dalga boylarına göre, yüzey düzensizlikleri olan malzemelerde difüzif özellikler sergiler. İdeal olarak, bir difüzör, gelen akustik enerjiyi tüm yönlerde ve geniş bir frekans aralığında eşit olarak yönlendirir. Akustik difüzör, belirli bir frekans aralığında, tipik olarak yaklaşık 500 Hz üzerinde 2 ve 4 oktav bant arasında iyi çalışacak şekilde tasarlanır. Emicilerde olduğu gibi, bir difüzörün performansı frekans ile bağlantılıdır [3].

3.1 Sesin Yansıması

Kısa dalga boylarındaki ses yayılımı, yaklaşık 300 Hz üzerinde, speküler olarak düşünülebilir. Şekil 3.1, kaynaklardan gelen sesin orta-yüksek frekanslı yansımalarını, alıcı ve kaynak konumlarını göstermektedir [1].



Şekil 3.1 : Zemin, tavan, yan duvarlar üzerinde erken yansımaları gösteren oda plan ve yükseklik görünümleri [1].

Dinleyicinin kulağına ulaşan ilk ses, en kısa mesafeyi alan doğrudan sestir. Döşemeden gelen yansıma (F) daha sonra gelir. Tavandan (C), yan duvardan (W) ve uzaktaki duvardan (W) yansımaları da daha sonra gelir.

Oda yüzeylerinde gerçekleşen bu yansımalar erken yansımaları oluşturmaktadır. Erken yansımalar, doğrudan sesin üç boyutlu algısını bulanıklaştırır [1].

Olive ve Toole Şekil 2.18'de gösterilen yansıma seviyesi ve yansıma gecikmesi grafiğini ortaya koymuştur [12]. Yansımalar, yansıma eşiği ve yankı üretim eşiği arasındaki duyulabilir bölgeye; yansıma eşiği üzerindeki eko bölgesine; eşiğin altında duyulamaz bölgeye düşebilir.

Erken yansımaların seviyesini azaltmanın yolu, odanın tüm ön kısmını ses emici malzeme ile kaplamaktır. Bu akustik yaklaşım biçimi odayı ölü hale getirecektir. Burada önerilen ilke, yalnızca yansımalar için sorunlu olan belirli yüzeyleri emici malzeme ile kaplamaktır [1].

3.1.1 Yansımalar arasındaki ortalama mesafe

Küçük bir odada sesin birçok yansımasından, doğrudan dalga daha önce gelir ve alıcının sesin geliş yönüne ilişkin algısını oluşturur. Daha sonraki yansımalar bu yön algısını etkilemez.

Schroeder frekansının ($f_s = f_c$) üzerinde odadaki ses dalgaları, odanın yüzeylerinden yansımaları açısından ışın veya parçacık olarak ele alınabilir. Bu, bir odanın etrafındaki ışın yolunu izleyerek ve bunun duvarlarla olan etkileşimini inceleyerek veya her yansıtıcı yüzey için zahiri bir kaynak oluşturarak ve alıcıdaki katkılarını toplayarak yapılabilir. Bir odanın içerisindeki ses ışınlarını takip edersek, ses herhangi bir yüzeyle karşılaşana kadar hareket eder. Ses parçacığı t zamanda belirli bir mesafe (c_0.t) hareket eder ve bu süre zarfında N adet oda yüzeyine çarpar ve yansır ise yansımalar arasındaki ortalama mesafe [2]:

$$\lambda = \frac{c_0 t}{N} = \frac{c_0}{n} \tag{3.1}$$

burada n, birim zaman başına düşen ortalama yansıma sayısıdır ve λ, yansımalar arasındaki ortalama serbest yoldur. Knudsen (1932), çok sayıda farklı biçimli dikdörtgen oda için deneysel olarak ortalama serbest yolu belirledi, Kuttruff (1973), denklemi ilk prensibinden yola çıkarak ele aldı. Sonuç [2]:

$$\lambda = \frac{4V}{S} \tag{3.2}$$

Burada V hacim ve S odanın toplam yüzey alanıdır.

Ardışık ses yansımaları arasındaki ortalama mesafe mean free path olarak adlandırılır. Bu ortalama mesafe, V'nin hacim ve S'nin yüzey alanı olduğu, 4V / S ifadesi ile hesaplanır [1].

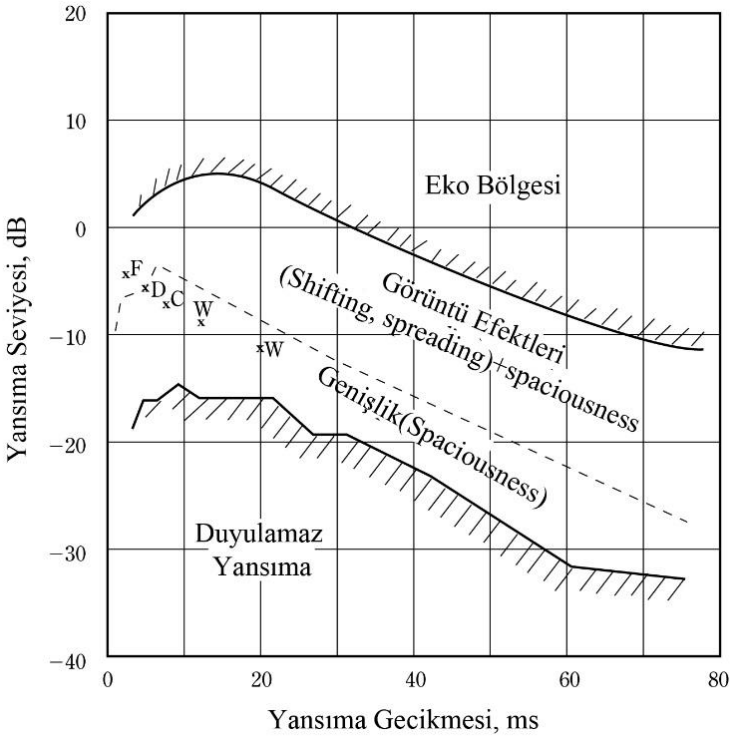
Boyutları L=7.62, W=6.96, H=3.48 m. olan bir odada, hacim 184.56 m^3, yüzey alanları toplamı 207.52 m^2 olarak hesaplanır. Ses yansımaları arasındaki ortalama mesafe, 3.55 m.'dir. Ses, milisaniyede 3.4 m hareket eder. Bu hızda, 3.55 m mesafe 9,5 msn de geçilir. Başka bir ifade ile yansımaların birçoğu bir saniye gibi kısa bir sürede gerçekleşir [1].

3.1.2 Yansımalarının algılanması

Yansımanın algılanmasında etkin olan iki parametre vardır. Bunlar; yansımanın düzeyi ve gecikme süresidir.

Şekil 3.2'de yukarıda belirtilen iki değişken; yansıma düzeyi ve yansımanın gecikmesi süresi, gösterilmektedir. 0 dB'lik bir yansıma seviyesi, yansımanın doğrudan sinyalle aynı seviyede olduğu anlamına gelir. –10 dB'lik yansıma seviyesi, yansıma seviyesinin

direkt sinyalin 10 dB altında olduğu anlamına gelir. Her durumda yansıma gecikmesi, doğrudan sinyalden sonraki milisaniyedir [1].



Şekil 3.2 : Yansıma düzeyi (dB) ve yansıma gecikmesi (ms)[1,12].

Eğri A, yansımanın algılanmasının mutlak eşiğidir. Eğri B, görüntü kaydırma eşiğidir. Eğri C, yansımanın gizli bir eko olarak duyulduğu noktaları gösterir. A eğrisi, eko'nun duyulabilirliğinin mutlak eşiğidir. Bu, herhangi bir gecikmede, bu çizginin altındaki yansıma seviyeleri için yansımanın duyulamadığı anlamına gelir. İlk 20 milisaniye için bu eşik sabittir. Daha fazla olan gecikmelerde, duyulabilir bir yansıma için giderek daha düşük yansıma seviyeleri gereklidir. Küçük bir oda için, 0–20 ms aralığındaki gecikmeler büyük önem taşımaktadır. Bu aralıkta yansımanın duyma eşiği, gecikme ile çok az değişiklik gösterir. [1]

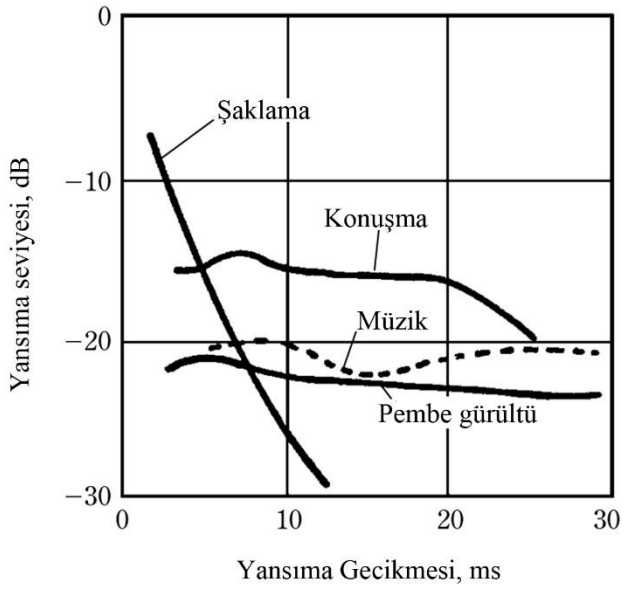
Yan yüzeylerden gelen yansımanın 10 ms geciktiği farazi bir durumda, yansıma seviyesi çok düşük bir seviyeden başlayarak arttığından, yansıma tamamen duyulmaz olur. Yansımanın seviyesi arttıkça, seviyesi doğrudan sinyalin 15 dB altına eriştiğinde, yansıma duyulur hale gelir. Yansıma seviyesi bu noktadan sonra artar ise, oda ferahlık/genişlik duygusu alır [1].

Yansıma seviyesi daha da artar ise, etkileri duyulabilir hale gelir. Yansımanın duyulabilirlik eşiğinin yaklaşık 10 dB üzerinde, ön işitsel görüntünün görünen

boyutunda ve yerindeki değişiklikler belirginleşir. Büyük gecikmelerde, görüntü yansımaya doğru yayılma eğilimindedir. 10-20 sn'lik gecikme aralığında, yansıma seviyesi işitme eşiğinin üzerinde olduğundan, mekânsal etkiler hâkim olur [1].

Yansımanın geldiği yönün, yansıma algısı üzerinde önemli bir istisna ile neredeyse hiçbir etkisi yoktur [1].

Sinyal tipi yansımaların duyulmasında büyük bir etkiye sahiptir. Sürekli ve süreksiz sesler arasında belirgin bir fark vardır. Şekil 3.3'te sürekli ve süreksiz seslerin duyulabilirlik eşikleri arasındaki farklar gösterilmektedir. Yankısız konuşma, müzik ya da pembe gürültüden ziyade sürekli olmayan bir ses olmaya daha yakındır. Mozart müziği ve pembe gürültü için eşik eğrileri birbirine çok yakındır. Bu, pembe gürültünün ölçümlerde müzik için makul bir vekil sinyal olduğu inancını doğrulamaktadır [1].



Şekil 3.3 : Farklı tür sinyal yansımalarının mutlak eşikleri [1].

3.2 Sesin Yutulması ve Ses Yutucu Malzeme ve Konstrüksiyonları

Emilim ile ilişkili üç tek sayı derecesi vardır. Bu derecelerin tümü, Sabine emilim katsayıları kullanılarak hesaplanmıştır. Gürültü azaltma katsayısı (NRC, Noise Reduction Coefficient) ilk ve en yaygın olanıdır. NRC, 250, 500, 1000 ve 2000 Hz oktav bant Sabine emilim katsayılarının en yakın 0.05'e yuvarlatılmış aritmetik

ortalamasıdır. NRC, konuşma için en kritik frekans bantlarında bir malzemenin performansının göstergesi olan tek bir sayı derecesi olarak düşünülmektedir [3].

NRC'nin bazı sınırlamalarını kısmen ele almak için, Ses emme ortalaması (SAA, Sound Absorption Average) geliştirilmiştir. NRC'ye benzer şekilde, SAA'da bir aritmetik ortalamadır, ancak dört oktav bandıyla sınırlı olmak yerine, Sabine emilim katsayılarının 200 ila 2500 Hz arasındaki on iki 1/3 oktav bantların ortalaması alınır ve en yakın 0.01'e yuvarlanır. Çizelge 3.1, bir dizi emilim katsayısı için NRC ve SAA'nın örnek bir hesaplamasını gösterir [3].

Çizelge 3.1 : NRC, SAA ve αw ile Örnek Sabine Absorpsiyon Katsayısı (α_{SAB}) Spektrumu [3].

1/3 Oktav Band Merkez Frekansı	**α_{SAB}**	**1/3 Oktav Band Merkez Frekansı**	**α_{SAB}**
100 Hz	0.54	1250 Hz	0.39
125 Hz	1.38	1600 Hz	0.31
160 Hz	1.18	2000 Hz	0.30
200 Hz	0.88	2500 Hz	0.23
250 Hz	0.80	3150 Hz	0.22
315 Hz	0.69	4000 Hz	0.22
400 Hz	0.73	5000 Hz	0.20
500 Hz	0.56		
630 Hz	0.56		**NRC =0.55**
800 Hz	0.51		**SAA =0.53**
1000 Hz	0.47		**α_w =0.30 (LM)**

ISO 11654 (ISO 11654:1997 Acoustics: Sound absorbers for use in buildings, Rating of sound absorption), ISO 354 (ISO 354:2003 Acoustics: Measurement of sound absorption in a reverberation room) standartlarına göre test edilen, ağırlıklı ses emme katsayısı (α_w) olarak adlandırılan, malzemeler için tek bir sayı derecesi elde edilir. Bir malzemenin α_w 'sini türetmek için bir eğri eşleştirme işlemi söz konusudur. Ek olarak, emilimin referans eğrisini önemli ölçüde aştığı alanları belirtmek için gösterge değerini izleyen parantez içinde şekil göstergeleri eklenebilir. Çizelge 2.4, α_w değerlerinden açıkça görülmeyen aşırı düşük ve orta frekans emiliminin olabileceğini belirten LM ile emme katsayıları kümesini göstermektedir. Bu, gerçek oktav bandının veya 1/3 oktav bant emme katsayılarının büyük olasılıkla daha detaylı incelenmeye değer olduğunu göstermek için bir yöntemdir [3].

Bu metriklerin hiçbiri, bir malzemenin emici davranışının doğru bir temsilini veremez. NRC, konuşma frekans aralığında dört bandın toplamıdır, burada sorun, dört sayının farklı kombinasyonlarının aynı ortalamayı verebilmesidir. SAA için de aynı durum geçerlidir. NRC ve SAA değerleri çok yakınsa, malzemenin konuşma frekansları aralığındaki emiliminde aşırı sapmalar görülmez. SAA, NRC'den büyük ölçüde farklıysa, belirli 1/3 oktav bandında büyük değişiklikler olduğunu gösterir. Bunlar, elbette, sadece tek sayı derecelendirmeleridir; 200 Hz 1/3 oktav bandının altındaki malzemenin performansını dikkate almaz. İyi bir değerlendirme, oktav veya 1/3 oktav bant verisini detaylı bir şekilde incelemeyi gerektirir [3].

3.2.1 Gözenekli emiciler

Gözenekli emiciler en bilinen ve yaygın olarak kullanılan türdür. Bunlar arasında doğal lifler (pamuk ve ahşap), mineral lifler (cam elyafı ve mineral yün), köpükler, kumaşlar, halılar, yumuşak sıvalar, akustik karolar bulunur. Ses dalgası ile uyarılan hava partikülleri, gözenekli malzemelerin derinliklerinde titreşime neden olur ve sürtünme kayıpları ile ses enerjisinin bir kısmının ısı enerjisine dönüşmesini sağlar. Kayıp miktarı malzemenin yoğunluğuna ve malzeme liflerinin sıkılığına bağlıdır. Lifler gevşek ise, çok az sürtünme kaybı olur. Lifler yoğun ise, yüzeyden iç kısma geçiş zorlaşır ve yansıma artar, bu da daha az emme ile sonuçlanır [3].

3.2.1.1 Mineral/doğal elyaf ve akustik köpükler

Mineral elyaf çeşitlerinden en popüler olanı cam elyaf panel veya levhadır. Farklı yoğunluk değerleri olsa da (24 kg/m³ düşük, 48 kg/m³ orta, 96 kg/m³ yüksek) 500 Hz' in altındaki frekanslarda iyi bir emilim göstermez. Yüksek ses frekanslarında, orta ve yüksek yoğunluklu olanlar, düşük yoğunluklu malzemeden biraz daha iyidir. Üç yoğunluk arasında emilim açısından çok az fark vardır. Yüksek yoğunluklu bir emici duvar katmanına doğru artan yoğunluk değerleri ile katmanlaşarak uygulandığında, aynı kalınlığa sahip tek yoğunluklu bir emiciden daha iyi emilim özelliği gösterir. Düşük frekansların emilimi malzeme kalınlığı ile doğru orantılıdır. Hava boşluğunun artması düşük frekanslı emilimi kademeli olarak artırır. Düşük frekanslı emilim, hem kalın malzeme hem de hava boşluğu ile sağlanabilir [3]

Akustik uygulamalar için çeşitli tiplerde retiküle (reticulated) açık hücreli köpükler vardır. Mimari uygulamalarda açık hücreli akustik emiciler olarak kullanılan en yaygın köpükler poliüretan (esterler ve eterler) ve melamin köpüklerdir. Kamalar (wedge) ve

piramitlerin yanı sıra, çeşitli kare, testere dişi ve hatta desenler ile şekillendirilmiş akustik köpükler kullanılmaktadır. Bu yüzey şekilleri, sese maruz kalan yüzey alanını artırmak içindir [3].

Genel olarak, akustik köpükler lifli materyallerden daha düşük yoğunluktadır. Akustik köpük yoğunlukları genellikle 8.0 kg/m³ ile 40 kg/m³ aralığındadır. Bu durum, aynı kalınlıktaki mineral elyaf panellerin yine aynı kalınlıktaki köpük panellerden daha yüksek emme katsayıları sağlama eğiliminde olduğu anlamına gelir [3].

3.2.1.2 Akustik karolar ve sıva uygulamaları

Akustik karolar, gözenekli emiciler içinde en yüksek yoğunluğa sahip olanlardır. Asma tavan uygulamalarında yaygın olarak kullanılırlar. Akustik karolar için standart ölçüler 60 cm x 60 cm kare form veya 60 cm x 120 cm dikdörtgen formdur. Sabine emme katsayıları genellikle E400 (400 mm hava boşluklu) tipi bir montaj için verilmektedir [3].

Bazı akustik iyileştirmeler sprey ve/veya sıva ile uygulanabilir. Akustik sprey ve sıvalar standart sıvalar gibi detaylandırılabilir ve boyanabilir özelliktedir. Özel yapıştırma kimyasalları ve süreçleri bu tip malzemelerin emici özellikler kazanmasını sağlar. Bazıları alçı veya alçı duvarına benzer bir görünüm sağlayan alçı tabana sahiptir. Akustik sıvalar, özellikle ince uygulandığında (<2,5 cm kalınlığında) düşük frekans performanlarda kötü emilim özelliği; yüksek frekanslarda ise yüksek emilim özelliği gösterirler [3].

3.2.1.3 Halı, perde ve akustik baffle

Halı yüksek frekanslarda etkili olan gözenekli bir emicidir. Yüksek frekanslı bir emici olduğu için, halı bir oda tasarımında dikkatli bir şekilde kullanılmalıdır. Bas ağırlıklı bir odada mükemmel bir denge sağlayabilir. Ses emilimi, hav ağırlığı ve yüksekliği ile doğru orantılıdır. Kesik hav (cut pile) ilmek havdan (loop pile) daha fazla emilim sağlar. Taban malzemesi, bir halının emilimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Taban ağırlığı arttıkça emilim artar. Hava geçirimsiz taban, taban etkisini önemli ölçüde azalttığı ve dolayısıyla emilim özelliğini de azalttığı için dikkatli kullanılmalıdır [3].

Perdeler de gözenekli emicileridir. Malzemenin cinsi ve kalınlığının yanı sıra, dolgunluk yüzdesi, emicilik özelliklerini etkiler. Dolgunun yüzdesi, perdede ekstra malzeme miktarının bir temsilidir. Örneğin, % 100 dolgunluk, 3.0 m genişliğinde bir

perdenin, 6,0 m genişliğinde bir malzeme parçasından oluştuğu anlamına gelir. Dolgunluk arttıkça emilim de artar [3].

Perdelerin duvardan boşluk ile yerleştirilmesi emilimi artırır, dolgunluk artışının etkisi boşluk etkisine nazaran daha verimli sonuçlar verir.

Akustik baffle, kubbeli stadyumlar, arenalar, spor salonları, fabrikalar ve hatta bazı ibadethaneler gibi çok geniş hacimlerde, çınlamayı ve ekoyu azaltmak için kullanılan yüksek tavan emicileridir. Akustik bölmeler (baffle) tipik olarak 60 cm x 120 cm ebatlarında ve yaklaşık 3 ile 4 cm kalınlıktadır. Emilim, baffle başına sabin olarak belirlenir. Akustik baffle genellikle dikey olarak (zemine dik) asılır, fakat aynı zamanda yatay ve belirli bir açıda da asılabilirler. Baffle malzemenin asılma deseni, hacmin genel akustik performansı üzerinde etkilidir [3].

3.2.1.4 İnsanlar, koltuklar, mobilyalar ve diğer nesneler

Birçok geniş mekânda, insanlar ve oturdukları koltuklar odadaki en etkin akustik faydayı sağlar. Akustik analiz, insanları da içermelidir. Boş ahşap sandalyeler, üzerinde oturan insanlar kadar emici değildir. Oldukça yastıklı bir koltuk, oturmuş bir kişi kadar ses emebilir. Kullanılmadığı zamanlarda katlanan bir koltuk, koltuğun alt tarafında sesi yansıtacak özellikte sert ve plastik bir kaplamaya sahip olabilir. Kapak katlandığında sesin sandalyenin altından geçmesini sağlamak için kaplamanın delinmesi etkili sonuçlar verir [3].

Odaların boş hali ile sandalye, kitap rafı, küçük biblolar vb. mobilyalar yerleştirilmiş hali aynı akustik etkiyi vermez. Evlerimizdeki yaşam alanlarında bile, az sayıda parçanın eklenmesi odanın akustik karakterini değiştirebilir [3]. Mobilyaların konumu, malzemesinin emiciliği, mobilya adedi, mobilya boyutları hacmin emiciliğini, özellikle küçük hacimlerin emiciliğini, etkiler.

3.2.2 Membran Emiciler

Membran emiciler, aynı zamanda panel ve diyafragmatik emiciler olarak da adlandırılırlar, dar bir frekans aralığında sesi emmek için bir zarın rezonans özelliklerini kullanırlar. Bir membran emici oluşturulurken, tipik olarak ahşap, preslenmiş ağaç lifleri, plastik veya diğer sert veya yarı sert malzemelerden oluşan deliksiz, gevşek paneller kullanılır. Sağlam bir destek üzerine hava boşluğu ile monte edildiğinde, gelen ses dalgalarına titreşerek tepki verir. Bu, liflerin bükülmesine neden

olur ve belirli bir miktar sürtünme kaybı ile ses enerjisinin bir kısmının emilmesini sağlar. Panelin kütlesi ve hava bir rezonant sistemi oluşturur. Rezonant sistemlerde, rezonans frekansında en yüksek emilim oluşur [3].

Membran emiciler küçük odalardaki belirli rezonans modlarını kontrol etmek için uygundur. Oda modlarını kontrol etmek için, maksimum modal basınç noktalarına yerleştirilmelidirler. Bir mineral lif paneli gibi gözenekli emicilerin hava boşluğuna eklenmesi, rezonansı azaltır ancak emilim bant genişliğini arttırır [3].

3.2.3 Rezonant Emiciler

Bir rezonant emici, emilim sağlamak için bir malzemenin veya boşluğun rezonans özelliklerini kullanır. Rezonant emiciler hız bileşeni üzerine çalışan gözenekli emicilere zıt olarak basınç bileşeni üzerine çalışırlar. Sesin en yüksek parçacık hızına sahip olduğu noktaya yerleştirilen gözenekli bir emici, en yüksek emilimi sağlayacaktır. En yüksek parçacık basıncına sahip noktaya yerleştirilen bir rezonant emici de en yüksek emilimi sağlayacaktır. En yüksek düşük frekans performansının istendiği ve bu performansın önemli olduğu uygulamalarda bu durum önemli bir parametredir [3].

Bir yüzeyden uzağa yerleştirildiğinde geniş bant özellikli bir gözenekli emici, düşük frekanslı emilimi en üst düzeye çıkarmanın en etkili yöntemidir. En yüksek düşük frekans emilimi için bir rezonant emici yüzeye ya da yüzeyin içine yerleştirilmelidir. Rezonant emiciler belirli bir frekans aralığında etkin olabilmeleri için tasarlanır [3].

Rezonant emicilerin etkin frekansı:

$$f_R = \frac{60}{\sqrt{m' d_L}} \tag{3.3}$$

f_R : etkin frekans, Hz

m' : panel ağırlığı, kg/m^2

d_L : sistem kalınlığı, m

Frekans dağılımının çok düzensiz olmasına neden olan, iyi ayrılmamış güçlü rezonans modları nedeniyle, küçük odalarda düşük frekanslarda akustik iyileştirme gereklidir. Bu olumsuz etkiler genellikle rezonant emiciler kullanılarak iyileştirilebilir [5].

3.2.3.1 Delikli membran emiciler

Membran emicilerin ve Helmholtz rezonatörlerin, içerdikleri hava boşluğunun büyüklüğü emilimde etkilidir. Membran emicileri, rezonatöre çevirmek, zarın yüzeyindeki açıklıkları kesmek veya delmek suretiyle gerçekleştirilebilir. Yüzdeki açıklıklar için yuvarlak delikler kullanıldığında, delikli bir emici oluşturulur [3].

Delikli bir membran emici f_R'sini hesaplamak için, önce etkili kalınlık hesaplanmalıdır. Çapı d olan delikler ve düzenli delik aralığı S (delikler arasında merkezden merkeze mesafe) olan delikler için, denklem 3.4 açık alanın kesirini (ε değerini) verir, [3]:

$$\varepsilon = \frac{\pi}{4}\left(\frac{d}{S}\right)^2 \tag{3.4}$$

Delikli bir emicide etkili kalınlığı hesaplamak için, bir düzeltme faktörü, δ gereklidir. Bu faktör genellikle yaklaşık 0.85'tir, ancak düşük ε değerleri (tipik olarak <0.16) için hesaplanabilir [3]:

$$\delta = 0.8(1-1.4\sqrt{\varepsilon}) \tag{3.5}$$

Daha sonra, bir t kalınlığı için etkin panel kalınlığı t', δ kullanılarak denklem 3.6 ile hesaplanır [3]:

$$t' = t + \delta d \tag{3.6}$$

Sonuç olarak D hava boşluğuna sahip bir panelin f_R değeri [3]:

$$f_R = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{\varepsilon}{t' D}} \tag{3.7}$$

Delikli emicilerin f_R'si genellikle ε'nin değiştirilmesiyle ayarlanır. ε'nin artırılması (daha büyük delikler), D'nin düşürülmesi veya daha ince panellerin kullanılması, f_R'yi artıracaktır. Bu hesaplama kesin olmamakla birlikte tasarım aşamasında bir fikir verir. Boşluğa genellikle kısmen veya tamamen gözenekli emici yerleştirilebilir, emici malzemenin delikli panel ile teması halinde emicinin etkinliğini azalır [3].

Çok küçük delikli (<< 1 mm) son derece ince malzemeler, bir hava boşluğu üzerinde gerilir ve sınır tabaka etkileri (layer effect) ile emilim sağlar. Bu malzemelere mikroperfore denir. Çok ince olduklarından şeffaf malzemeden üretilebilirler. Cam üzerine gerilebilen mikroperfore malzemeler mevcuttur. Mikroperfore folyo ve cam

arasındaki hava boşluğunun derinliğine bağlı olarak emilim katsayıları değişkenlik göstermektedir [3].

3.2.3.2 Helmholtz rezonatörleri

Helmholtz rezonatörleri, akustik uygulamalar için özel emici özelliklere sahiptir. Rezonans frekansında, emilim çok yüksektir. Frekans aralığı çok dardır tipik olarak sadece birkaç Hz genişliğindedir. Helmholtz rezonatörünü kısmen doldurmak için gevşek mineral elyaf gibi emici malzeme kullanıldığında, etkili frekans aralığı genişler [3].

Helmholtz rezonatörünün frekansı denklem 3.8 ile hesaplanır.

$$f_R = \left(\frac{V}{2\pi r}\right)\sqrt{\frac{A_h}{Vh'}} \tag{3.8}$$

A_h : boyun kesit alanı ($\pi r2$), m^2

V : rezonatörün hacm, m^3

h : boyun uzunluğu, m

h' : $h+\delta_{end}$

δ_{end} ≈ 1.7r

Helmholtz rezonatörleri kullanmak bas sesleri yakalama da etkili bir diğer yöntemdir. Tanımlanabilen bir alana ve uzunluğa sahip, açık boyunlu kapalı bir hacim olan Helmholtz rezonatörü, belirli bir rezonans frekansında etkilidir [2].

Bas modlar, parçacık hızının sıfıra düştüğü ve basıncın maksimuma ulaştığı yansıtıcı yüzeylerde (odanın kenarlarında ve köşelerinde) oluştuğundan, rezanatörler bu noktalara yerleştirildiklerinde en etkilidir. Video monitör kutuları, hava emme plenumları, yükseltilmiş zemin platformları ve ekipman muhafaza kutuları gibi doğal olarak oluşan boşluk alanlar, özel alanlara ihtiyaç duymadan emme boşlukları olarak kolayca kullanılabilir. Kaynak konumu, bir odada bas modu oluşumunu kontrol etmenin başka bir yoludur. Sert bir yansıtma yüzeyine yakın (1/6 dalga boyu içinde) bulunan ilk kaynak daha verimli olacaktır, çünkü yakındaki yüzeylerden gelen yansımalara bağlı geometrik yönelim, aynı voltaj girişi için güç çıkışını artırır. Tek katmanlı alçıpan bölmeler, ses basıncında çok fazla artış sağlamaz, ancak sert zeminler basıncı arttırabilir. Dikdörtgen bir odanın köşelerine yerleştirilen kaynak en fazla sayıda oda modunu heyecanlandırır, çünkü bulunduğu konumda basınç maksimumdur. Ancak, tüm modları heyecanlandırmak istenen bir durum değildir

çünkü dinleyici konumu bir mod düğümüne denk gelebilir. Bu durumda kaynağın, temel aksiyel modlara enerji sağlamasını önlemek için, zemin duvar birleşme noktasındaki bir ara noktada konumlandırılması uygundur. Hareket ettirilebilen iki veya daha fazla kaynak kullanılmasıyla, en uygun konum deneysel olarak bulunabilir. Dinleyici pozisyonu, bas düğüm noktalarının hesaplanması ile kontrol edilebilir [2].

3.2.3.3 Lata emiciler

Helmholtz rezonatörler, bir hava boşluğu üzerinde (emici dolgu içeren veya içermeyen) aralıklı çıtalar kullanılarak da yapılabilir. Çıtalar arasındaki yarıkların içindeki hava kütlesi, delikli panel tipine benzer bir rezonant sistemi oluşturmak üzere boşluğun içindeki havanın esnekliği (springiness) ile reaksiyona girer. Aslında denklem 3.7 bir lata emiciye ait f_R'yi hesaplamak için yine kullanılır, ancak ε , δ ve t' için aşağıdaki denklemler kullanılır [3]:

$$\varepsilon = \frac{r}{w+r} \tag{3.9}$$

$$\delta = -\frac{1}{\pi} ln\left[sin\left(\frac{1}{1}\pi\varepsilon\right)\right] \tag{3.10}$$

$$t' = t+2\,\delta\,r \tag{3.11}$$

r : yuva genişliği, m

w : lamel genişliği, m

Değişken boşluk derinliğine sahip bir panel kesiti ve farklı genişliklerde latalar kullanmak emilimin frekans aralığını genişletir.

3.2.4 Emiciliğin etkisi

Düşük frekanslarda emilim yüksek frekanslara göre daha zordur. Dalga boyunun artması ile hacim içerisinde dalga boyuna kıyasla orantılı bir yüzey elde edilmesini zorlaştırır. Özellikle küçük hacimlerde bu durum daha belirgin bir tasarım parametresi olarak karşımıza çıkar. Normal gelme açısındaki bir ses frekansını en etkili şekilde emmek için, emici malzemenin kalınlığı gelen sesin dalga boyunun en az 1/10'u veya ideal olanı dalga boyunun 1/4'ü kadar olmalıdır [3]. Bas tuzakları kullanmak yerine hacmin modal dağılımını düzenlemek daha etkin bir yaklaşımdır.

Emilimin kullanımının bir odanın öznel ve nesnel performans üzerinde güçlü bir etkisi vardır. Çok fazla emilim kullanıldığında, oda çok ölü (yankısız oda) hissedilir. Eğer

çok az emilim kullanılırsa, oda rahatsız edici şekilde canlı (yankılanma odası) hissedilir. Bir malzeme veya sistemin emiciliği frekansa bağlıdır. Emilim genellikle küçük odalarda ayrık yansımaları kontrol etmek veya oda hissini değiştirmek için kullanılır. Canlı ya da ölü oda terimi, çınlama süresinin uzunluğuna dayanmamaktadır. Doğrudan gelen sese ve ilk yansıyan ses alanının zamanlamasına, özellikle ilk 20 ms'de, olan orana dayanmaktadır [3].

3.3 Sesin Yayılması

Şu ana kadar, emici malzemelerden veya oda duvarlarından gelen sesin yansıması speküler kabul edildi. Bu, malzemenin boyutu yeterince büyükse, düzlemsel bir dalganın yansıma açısının geliş açısı ile aynı olduğu anlamına gelir. Bir odadaki dinleme konumunda oluşan ses, hem kaynaktan gelen doğrudan ses hem de odadaki duvarlardan ve nesnelerden yansıyan seslerden oluşur. Emicilerin amacı, ses yansımasının yoğunluğunu ve spektrumunu en uygun dinleme koşullarına ulaşması için ayarlamaktır. Bununla birlikte, özellikle küçük odalardaki speküler yansımalar bu gereksinimi her zaman tam olarak karşılayamaz [5].

Küçük odalarda, direkt ses ile dinleme noktasında oluşan yansıyan ses arasındaki zaman farkı çok azdır, genellikle 10 ms ile 20 ms arasında. Özellikle yansıyan ses güçlü ise, ses renklenmesi ile sonuçlanır. Renklenmeyi önlemek için, erken yansıyan ses, doğrudan gelen sesten 20 dB daha zayıf olmalıdır. Bununla birlikte, bazı emici malzemelerin bu şekilde sesi zayıflatması, odadaki genel akustik enerjinin aşırı azalmasına neden olabilir. Bu durum, sesi emmek yerine yayılım kullanarak düzeltilebilir. Yayılım (difüzyon), gelen sesin birçok farklı yöne yansıtıldığı anlamına gelir. Odadaki toplam enerjiyi korur, ancak doğrudan dinleme noktasına yansıyan ses enerjisini azaltır. Sesin dağılmasına ve yayılmasına neden olmasının yanı sıra, difüzörler ayrıca ses yutma, mod yoğunluğu vb. durumlar üzerinde de etkiye sahiptir [5].

Difüzyon problemlerini, küçük odalarda ve düşük frekanslarda idaresi daha zahmetli ve zordur. Ortalama bir kayıt stüdyosu, kontrol odası veya müzik odası gibi küçük hacimlerdeki sorun, 300 Hz'in altındaki mod aralıklarının dağınık (diffuse) ve yayılmış ses alanından uzak olmasıdır [1]. Difüzör konusunda en bilinen ve öncü çalışmaları Manfred Schroeder yapmıştır. Literatürde difüzörler sıklıkla “Schroeder Difüzörleri” olarak adlandırılırlar [7, 13, 14, 15].

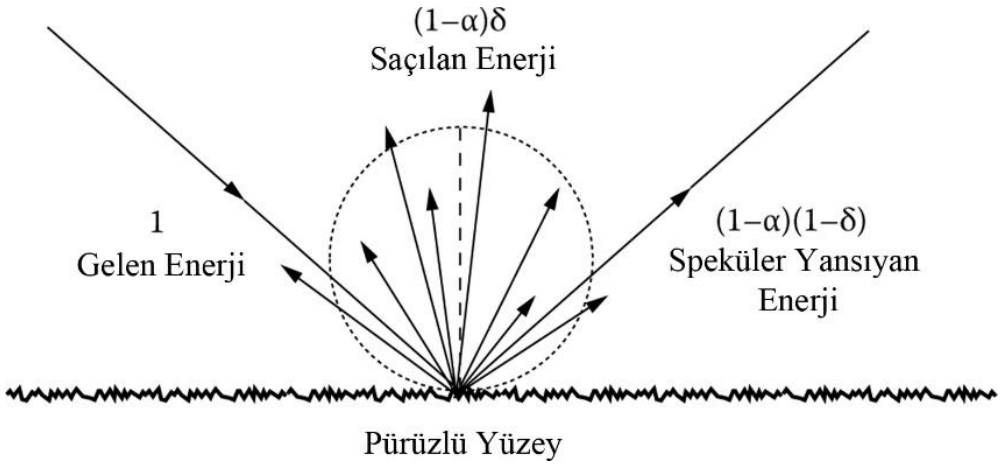
3.3.1 Difüzyon ve ses alanı

Saçılma (scattering) ve yayılma (diffusion) sözcükleri özünde aynı olguyu, sesin, speküler olarak tek yönde yansıması yerine çok yönde yansımasını tanımlar. Difüzörün veya yansıtıcı malzemenin özellikleri iki farklı katsayı ile karakterize edilir: saçılma katsayısı ve difüzyon katsayısı. Difüzörlerin pratik etkinliği, tiplerine, yapılarına, akustik özelliklerine, uygulama amaçlarına, odanın akustik özelliklerine bağlıdır [5].

Bir difüzörün performansı, difüzyon miktarı ve bir yüzey tarafından sağlanan saçılma miktarı olarak ifade edilebilir [3]. Cox ve D'Antonio, özellikle difüzör performansını ölçmek için kullanılan katsayılarla ilgili olarak, difüzyon ve saçılma arasında bir ayrım kurdular [7]. Genel olarak, difüzyon ve difüzyon katsayıları, bir difüzörün yarattığı dağınık ses alanının bütünlüğü ile ilgilidir. Difüzörden yayılan ses alanı kutupsal çizimler ile açıklanır. Daha az lobu olan bir difüzyon polar çıktısı, daha fazla difüzyon ve daha yüksek difüzyon katsayısı anlamında gelir [3].

Saçılma ve saçılma katsayıları, speküler bir şekilde yansıtılamayan enerji miktarı ile ilgilidir. Burada speküler terimi, sesin sert düz bir yüzeyden yansıması durumunda beklenen yansımanın yönünü belirtir. Speküler olmayan bir şekilde yansıyan daha fazla sesin, saçılması daha yüksek olur. Bu nedenle, basit bir açılı duvar, yüksek saçılma düşük difüzyon özelliği gösterir. Çünkü yansıyan ses hala bir lob oluşturacaktır, ancak speküler bir doğrultuda olmayacaktır [3,7].

Saçılan ses enerjisinin ve yansıyan ses enerjisinin gelen ses enerjisine oranı Şekil 3.4'te şematik olarak gösterilmiştir [5]:



Şekil 3.4 : Saçılma,speküler yansıma oranı [5].

Gelen ses enerjisi, speküler yansıma ve saçılan ses enerjisinin toplamına eşittir ve bu toplam 1'dir. Sesin bir yüzeye çarptığı andaki davranışı ve enerjisi denklem 3.12'de görülmektedir.

$$E_{incident} = 1 \quad (3.12)$$

$E_{specular} = (1-\alpha)(1-\delta)$

$E_{scattering} = (1-\alpha)\delta$

$E_{absorption} = \alpha$

$E_{incident} = 1 = E_{specular} + E_{scattering} + E_{absorption}$

α : emme katsayısı

δ : saçılma katsayısı

Difüzyon katsayısının amacı, yansıtılan sesin bütünlüğünü karakterize etmektir. Bu katsayının frekansa bağımlılığını tanımlamak için gerekli veri, saçılma katsayısının ölçümünden elde edilen verilere dayanmaktadır. Saçılma katsayısı verilerinin küçük değişimlerinin ortalamasıdır [5].

Ses alanının bir hacimde dağınık olması yani sesin hacimde yayılması akustik olarak iyi sonuçlar verir. Dağınık ses alanını sağlamak için kaynaktan çıkan sesin homojen yayılması ve ses azalımının üstel olması gerekir.

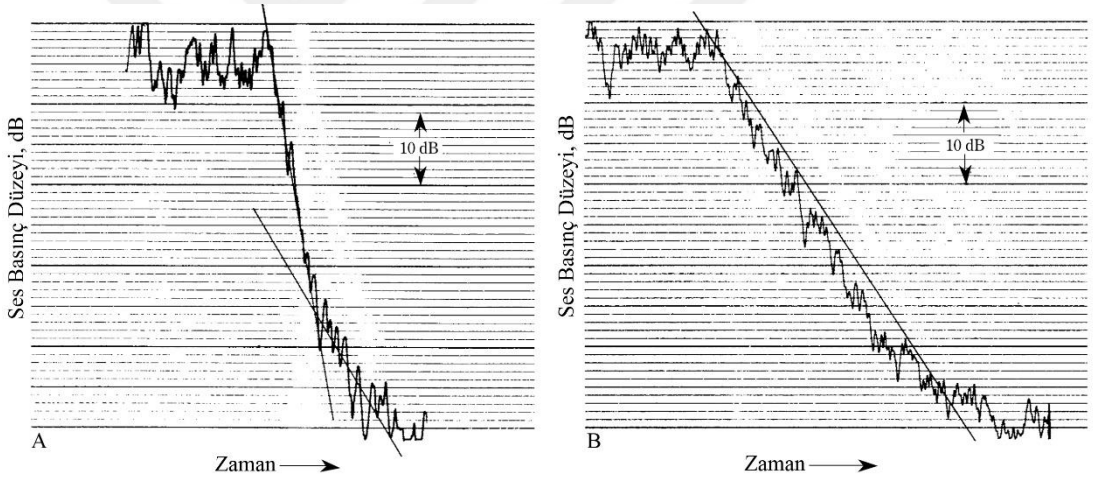
Dağınık ses alanının bir hacimde elde edilmesi için [1]:

- Sabit durum ölçümlerinden elde edilen frekans ve uzamsal düzensizlikler ihmal edilebilir düzeyde olmalıdır.
- Azalım (decay) özelliğinde ani değişimler ihmal edilebilir olmalıdır.
- Azalım (decay) mükemmel bir şekilde üstel olmalı, yani logaritmik ölçekte düz çizgiler olmalıdır.
- Çınlama süresi, odadaki tüm konumlarda aynı olmalıdır.
- Azalım (decay) karakteri temelde farklı frekanslar için aynı olmalıdır.
- Azalım (decay) karakteri, ölçüm mikrofonunun yön özelliklerinden bağımsız olmalıdır.

Bu altı faktör gözlem odaklı bir tespitin sonucudur. Enerji yoğunluğu, enerji akışı, sonsuz sayıda düzlem, dalgaların üst üste binmesi gibi dağınık bir ses alanı tanımında

temel faktörlerdir [1]. Randall ve Ward tarafından önerilen altı özellik bize bir hacmin ses alanının dağınıklığını değerlendirmek için sağlam kanıtlar elde etmenin pratik yollarını gösteriyor [1, 16].

Sekiz oktav için çınlama bozulmasının düzgünlüğünü 63 Hz'den 8 kHz'e kadar karşılaştırabiliriz. Genel olarak, dağınık alan yumuşaklığı frekans arttıkça artar. Bunun nedeni, bir oktav yayılma alanı içindeki mod sayısının frekansla artmasıdır ve mod yoğunluğu arttıkça, ortalama etkileri de artar. Bozulmadaki vuruşlar en çok 63 Hz ve 125 Hz'de olur. Düşük frekanslı çınlama bozunmasındaki bilgi, yayılma derecesine ilişkin bir veri sağlar. Ortalama eğim ve dağınık alan şekli hakkında bilgi veren çınlama süresi ölçüm grafikleri, hacmin ses alanı dağınıklığını değerlendirmede önemli bir veridir. Üstel bir bozunma, seviye-zaman grafiği üzerinde düz bir çizgidir ve eğimi ya saniye başına desibel cinsinden bozunma hızı ya da saniye cinsinden çınlama süresi olarak tanımlanabilir.



Şekil 3.5 : A, Çift eğimli bozulma grafiği. B, İç bükey bozulma grafiği [1].

Şekil 3.5A'da gösterilen 250 Hz oktav gürültü bandının bozunması iki üstel eğime sahiptir. İlk eğim, 0.35 saniyelik bir çınlama süresi ve son eğim, 1.22 saniyelik bir çınlama süresi verir. Seviye yeterince düşük olduğu anda gelişen yavaş bozulma, emici yüzeye yanal açıyla (grazing angle) çarpan sesin veya çok az emilim altında karşılaşılan belirli bir mod veya mod grubudur. Bu durum üstel olmayan bozunma (tipik olmayan bir bozulma türü) olarak ifade edilir. Bir başka bozulma tipi Şekil 3.5B'de gösterilmektedir. Bozulmanın başlangıcını ve sonunu bağlayan düz çizgiden sapmalar oldukça fazladır. Akustik olarak birleştirilmiş boşlukların varlığında oluşan bu bozulma grafiği, karakteristik olarak yukarı doğru içbükeydir ve çoğu zaman düz çizgiden sapmalar daha da büyüktür. Bozunma/düşüş izleri üstel olmayan türde

olduğunda, zamana göre düz bir çizgiden ayrılırlar, gerçek dağınık koşulların geçerli olmadığı sonucu bu grafikten görülebilmektedir [1].

Ses alanının homojen olmaması, çınlama süresinin odada noktadan noktaya değişmesinin bir nedenidir. Bozulma özellikleri tüm frekanslarda aynı karaktere sahipse ve bu karakter yumuşak bozunum (smooth decay) ise, genel bir yayılım söz konusudur [1].

3.3.2 Difüzör Tipleri

Kuadratik rezidü/artık difüzör (QRD) yansıma fazı ızgaraları veya daha genel olarak matematiksel veya sayısal difüzörler olarak bilinen difüzör ailesinin bir formudur. QRD gibi sayısal difüzörler, Manfred Schroeder'in öncü çalışmasına dayanmaktadır. Sayısal difüzörler, bir sayı teorisi dizisi ile derinlikleri belirlenen eşit genişliteki yarıkların ve kuyuların periyodik bir dizisini içerir [3].

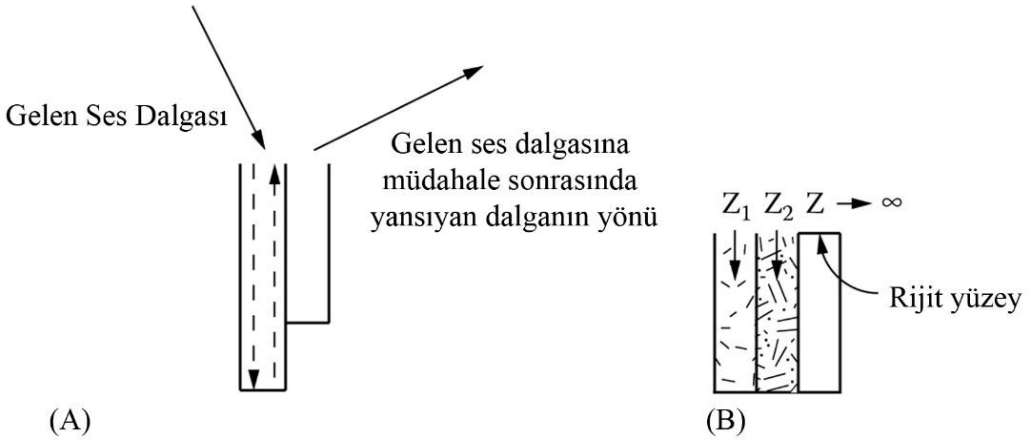
Kuyu derinliklerini belirlemek için psödorandom veya ilkel kök gibi diğer sekanslar da kullanılabilir. Difüzör performansı kullanılan diziye bağlıdır [5].

3.3.2.1 Matematiksel (sayısal) difüzörler

Sayısal olarak ifade edilen difüzörler, 1975 yılında yaygın ses yansıması üzerine iki makale yayınlayan Manfred Schroeder tarafından geliştirilmiştir [2, 3].

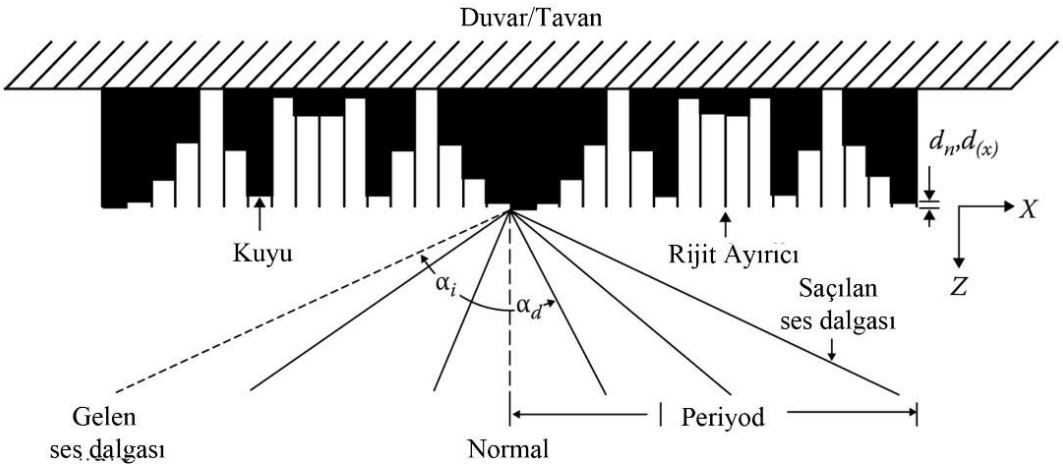
Geniş bir frekans aralığında 180° 'lik bir açı üzerinde bir düzlem ses dalgasını saçacak olan dar, yaklaşık çeyrek dalga boyu derinlikli rezonatörlerden oluşan bir hat dizisine sayısal difüzör denir [5].

Temel prensip şematik olarak Şekil 3.6A' da gösterilmektedir. İki kuyu aynı genişliğe ancak farklı derinliğe sahiptir ve bu nedenle, tabanlarından yansıyan sesin tepe noktalarında farklı fazlar (faz kayması) oluşturur. İki dalga karışır ve ortaya çıkan dalga, gelen ses dalgasının iki kuyuya ulaştığındaki açısından farklı bir açıyla yayılır. Şekil 3.6B'de gösterilen benzer bir fikir, farklı empedanslara sahip, yansıtılan dalgaların fazlarını etkileyen iki dar akustik malzeme şeridini göstermektedir [5].



Şekil 3.6 : (A) Farklı kuyu derinliği ile, (B) farklı empedans özelliği ile faz kaymasının sağlanması [5].

Kuyuların sıralanması ile oluşturulan Schroeder tipi bir difüzör örneği Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : Difüzör kesiti [5].

İnce ve rijit çeperler ile ayrılan kuyular her birinin genişliği W, ($W=0.137\lambda_0$),tasarım dalga boyu, λ_0, n kuyusunun derinliği d_n, olarak ifade edilir [5].

İnce, sert, rijit yüzeylerle ayrılan farklı derinlikteki N kuyudan oluşur. Her kuyunun genişliği, $W = \lambda_0 / 2$ değerinden daha küçüktür; f_0 freansından daha yüksek frekanslarda çapraz modların bulunmasını önlemek için kuyular yeterince dar olmalıdır [5].

Sesin yayılacağı en uzun dalga boyu λ_0 olarak tanımlanır. Bu dalga boyu maksimum kuyu derinliğini belirler. Difüzörün bir periyodunun toplam genişliği kuyu sayısı kere kuyu genişliğidir (NW). N sayısı, periyod sayısı ve bunların frekans aralığı difüzör yayılım modeli ve diğer özellikleri etkiler. Kuyuların bireysel derinliği d_n [5]:

$$d_n = n^2_{\mathrm{mod}N} \frac{\lambda 0}{2N} \quad (3.13)$$

n : kuyunun sayısı.

λ_0 : difüzörün en düşük frekansının dalga boyu.

N : bir difüzör periyodundaki kuyuların sayısıdır.

Bazı kuyuların maksimum derinliği, en düşük tasarım frekansının yaklaşık çeyrek dalga boyunda olabilir. Bu 100 Hz için yaklaşık 0.75 m, 500 Hz için yaklaşık 15 cm'dir. Bu nedenle, QRD'ler, düşük frekanslar için pratik olarak kullanılamaz [5].

Kuyuların derinlik dizilerinin belirlenmesinde farklı matematiksel yaklaşımlar kullanılabilir. Kuadratik Artık Difüzörleri bir bölme işleminde kalan olarak elde edilen sayı dizisi üzerine kurulur. Derinlik dizisi 0 kalan ile başlar ve 0 kalana tekrar ulaşılınca bir periyod tamamlanmış olur.

Difüzör derinlik dizisi denklem 3.14 üzerinden geliştirilmiştir [1,3]:

Kuyu Derinlik Faktörü (Well Depth Factor) = n^2 mod p (3.14)

p :asal sayı

n :0'dan büyük bir tamsayı

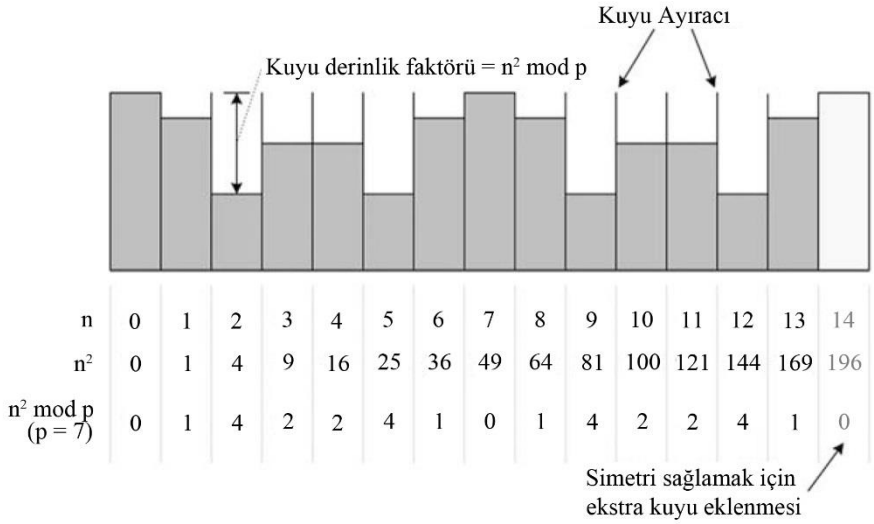
Denklemdeki "mod" matematiksel işlem olan modülodur. Mod işleminde birinci sayı ikinci sayıya bölünerek bir kalan elde edilir. Kuyu derinlik faktörleri, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi elde edilir.

Örneğin, n = 5 ve p = 7 olarak alalım. 25'in 7'ye bölümünden bölüm 3 ve kalan 4 olarak hesaplanır.

Kuyu Derinlik Faktörü(Well Depth Factor) = n^2 mod p

$= 25 \bmod 7$

$= 4$

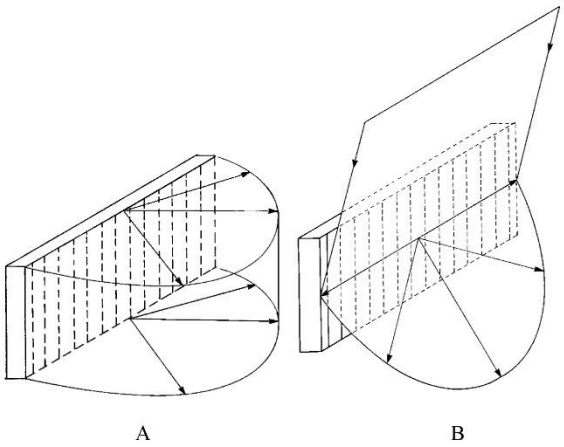


Şekil 3.8 : p = 7 asal sayı QRD'nin iki periyodu [3].

Ayırıcılar olmadan difüzörün etkinliği azalır. Bölücülerin yokluğunda; basamaklı faz kaymaları, dik açıdan farklı açılarda gelen ses dalgaları için karışık olma eğilimindedir [1].

Etkin difüzyon için maksimum frekans, kuyuların genişliği tarafından belirlenir; Etkin difüzyon için minimum frekans, kuyu derinliği tarafından belirlenir [3]. Maksimum kuyu derinliği, yayılacak en uzun dalga boyu tarafından belirlenir. Kuyu genişliği, en kısa dalga boyunun yaklaşık yarım dalga boyu oranındadır [1].

QRD ve sayısal difüzörler dağınık ses modeli açısından tek veya iki boyutlu olabilir. Bir dizi dikey veya yatay kuyudan oluşan QRD'ler, sırasıyla yatay veya dikey yönlerde sesi dağıtır. Başka bir deyişle, kuyular tavan-taban yönünde uzanırsa, yayılma yanal olarak meydana gelecektir ve ortaya çıkan difüzyon modeli bir silindire benzeyecektir. Şekil 3.9 silindir ve küre modeli difüzyonun şematik gösterimidir [3].

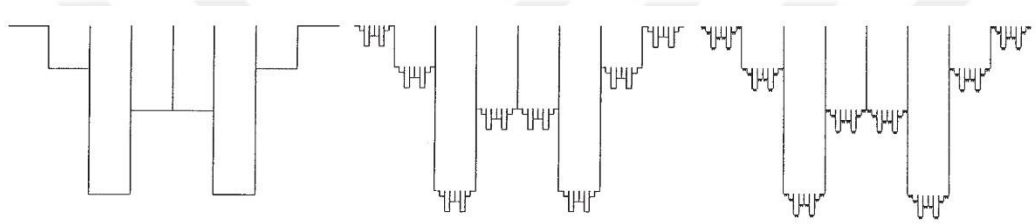


Şekil 3.9 : Kuyu yönüne göre değişen yayılma modelleri [1].

Daha karmaşık sayısal difüzörler, hem yatay hem de dikey olarak derinlik (veya yükseklik) bakımından farklılık gösteren kuyu dizileri (çoğu zaman yükseltilmiş bloklar veya kare şekilli çöküntüler) kullanır. Bu difüzörlere çarpan ses, küresel bir difüzyon modeli sergileyecektir [3].

3.3.2.2 Fraktal difüzörler

Düşük frekans limiti temel olarak kuyu derinliği ile belirlenir ve yüksek frekans limiti genel olarak kuyu genişliği ile belirlenir [1, 3, 5]. Etkili bant genişliğini arttırmak için kendi kendine benzerlik ilkesi ile fraktallar uygulanır. Bunlar, Şekil 3.10'da gösterildiği gibi, difüzörler içindeki difüzörler içindeki difüzörlerdir. Fraktal difüzör'ün tamamını oluşturmak için üç boyutlu kuadratik kalıntı difüzör gerekir [1].



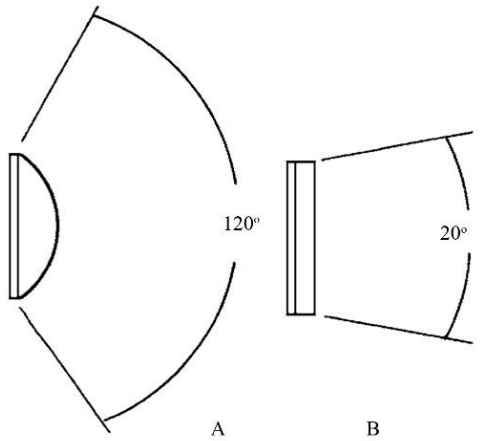
Şekil 3.10 : Fraktal difizör [1].

Fraktal Difüzör düşük frekanslı bir difüzörün içine yerleştirilmiş yüksek frekanslı fraktal ses difüzörlerinden oluşan iki veya üç boyutlu bir sistemdir.

3.3.2.3 Polisilindirik difüzörler

En etkili yayma elemanlarından biri ve göreceli olarak kolay yapılabilecek olanlardan biri, silindirin dışbükey bir kesiti olan polisilindirik difüzördür (poly). Kontrplak veya suntadan yapılan, silindirik bir yüzeye çarpan ses üç şekilde davranır; yayılabilir, emilebilir veya yansıtılabilir. Bu tür silindirik elemanlar, küçük odalarda emme ve difüzyona ihtiyaç duyulan düşük frekans aralığında emici olarak işlev görür. Şekillendirilen kısım, diyafram hareketinden dolayı, Şekil 3.11A'da gösterildiği gibi 120 ° 'lik bir açı boyunca eşit olarak sesi yayar. Benzer bir yassı eleman sesi yaklaşık 20 ° gibi (Şekil 3.11B) daha dar bir açıda yayar. Bu nedenle, uygun yansıma, emilim ve yayılım özellikleri silindirik yüzeyin kullanımını desteklemektedir. Bu tür difüzörlerin boyutları kritik değildir, ancak etkili olmaları için boyutlarının düşünülen sesin dalga boyu ile karşılaştırılabilir olması gerekir. 1000 Hz'de sesin dalga boyu 34.4 cm, 100 Hz'de yaklaşık 3.34 m. Bir poli eleman 90 veya 120 cm arasında 1000 Hz'de

etkili olacaktır, etkisi 100 Hz'de çok daha düşük olacaktır. Genel olarak, 15 ila 45 cm derinlikli poly ve 5 ila 15 cm'lik taban kalınlığı etkili bir akustik çözüm verir [1].



Şekil 3.11 : Polisilindirik difüzörün (A) ve düz panelin (B) ses yansıtma açıları [1].

Panellerin hacimde rastgele olarak dağıtılması önemlidir. Aynı uzunluk ve derinliğe sahip elemanlarla dolu bir duvar, difüzörler kadar etkili olmayabilir. Düzen belirli bir frekansı diğer frekanslardan çok farklı bir şekilde etkileyen, ideal difüzörün yapması gerekenin tersi gibi davranmasına neden olur [1].

3.3.2.4 Hacim difüzörleri

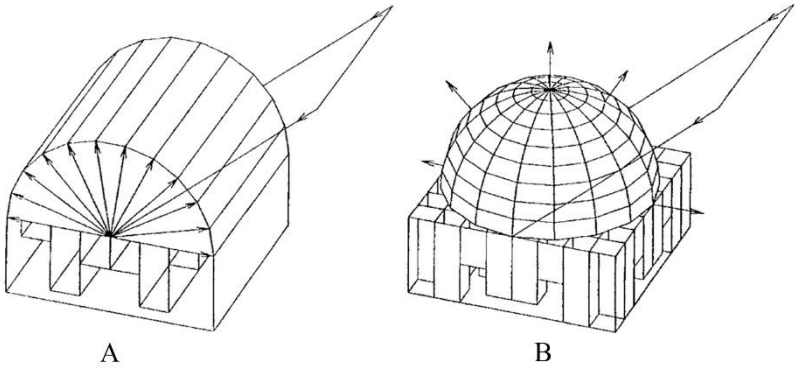
Odadaki nesnelere, mobilyalara, aydınlatma armatürlerine, sanat eserlerine, insanlara vb. gelen ses enerjisi bir dereceye kadar emilir ve bir dereceye kadar yansıtılır. Hangi frekansların emildiği ve sesin nasıl yansıdığı, nesnenin geniş anlamda akustik yapısına, empedansına, geometrisine ve nesnenin odadaki bir duvara uzak veya yakın olmasına bağlıdır. Açık rezonatörler (örneğin, Helmholtz rezonatör şişeleri ve çeyrek dalga boyu tüpleri) sesi yaymada etkilidir. Rezonatör kritik olarak ayarlandığında, emilen ve dağıtılan enerji aynı olacaktır. Rezonatör ağzı dalga boyuna göre küçük olması gerektiğinden, enerjinin rezonatör ağzı ile yeniden düzenlenmesi hemen hemen çok yönlü olacaktır. Difüzörlerin sayısı çok olduğunda (ancak hacimleri V'ye göre daha küçük) odanın dağınık alanındaki ses enerjisinin çoğu saçılan enerji olmaktadır. Aynı zamanda difüzörler, spesifik olarak yansıyan enerjiyi azaltmada, ses emilimi kadar etkili olabilmektedir [5].

Sayısal difüzörlerin yanı sıra, difüzyon bir yüzey düzensizliğinden de sağlanabilir. Teoride, bu yüzeyler ideal difüzyon sağlayamaz. Bir yüzeyin herhangi bir

randomizasyonu bir dereceye kadar speküler yansımayı kırdığı için, bu beklenmedik bir durum değildir. Tek sınırlama, anlamlı difüzyon frekans aralığı olacaktır. Daha önce tartışılan kuyu genişlik ve derinlik kuralları, genel anlamda olsa da, difüzörlerin resmi bir sayı teorisi algoritması kullanılarak tasarlanmadığı için geçerli olmayacaktır. Rastgele difüzyonun yararı, günlük materyallerin ve nesnelerin önemli bir difüzyon sağlayabilmesidir. Örneğin, kitap rafları, depolama rafları, dekoratif döşeme veya alçı işleri, mobilyalar, demirbaşlar ve diğer süslemeler difüzyon sağlayabilir [3].

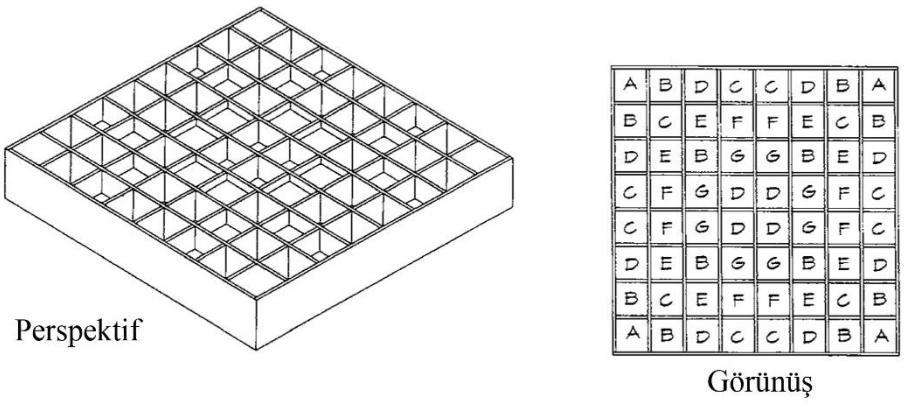
3.3.2.5 Üç boyutlu difüzyon

Yatay veya düşey yönde kuyu dizisine sahip difüzörler, tek boyutlu olarak adlandırılır, çünkü ses Şekil 3.12A'da gösterildiği gibi yarım silindir şeklinde yayılır. Şekil 3.12B'de gösterildiği gibi yarım küre kapsamının istendiği durumlarda çift yönlü kuyulara sahip difüzörler kullanılmalıdır [1].



Şekil 3.12 : Tek ve üç boyutlu difüzyon modelleri [1].

Yatay ve düşey yerleştirilmiş kuyulardan oluşan ızgara sistemi, Şekil 3.13'te gösterildiği gibi simetrik bir 64 kare hücre dizisinden oluşur. Bu hücrelerin derinliği, n=7 kuadratik kalıntı sayısı teorisine dayanır [1].



Şekil 3.13 : Izgara sistem difüzör [1].

3.3.2.6 Akustik beton bloklar

Akustik Beton Bloklar, yalnızca taşıyıcılık ve ses yalıtımı için gereken kütleyi sağlamakla kalmaz, aynı zamanda bloklardaki yarıklar ve boşluklar tarafından oluşturulan Helmholtz rezonatörleri vasıtasıyla düşük frekanslı emilim sağlar. Bloklar, iletim kaybı, düşük frekanslı emme ve ses yayılımı özelliklerine sahiptir.. Beton bloklar, bölücülerle ayrılmış, farklı derinliklerde kısmi bir sekans içeren yüzey yapısına sahiptir [1].

3.3.3 Difüzyon uygulamaları

Emilim gibi, difüzyon prensiplerini uygularken hacmin büyüklüğünde önemli farklılıklar göz önünde bulundurulmalıdır. Difüzyon uzak alanda etkin olma eğilimindedir. Bir difüzörün yakın alanında, saçılma etkileri tipik olarak daha az belirgindir ve bazı uygulamalarda düz bir yansıtıcı yüzeyden daha az etkilidir [3].

Geniş alanlar için, difüzyon genellikle bir alanın tavanında veya arka duvarında kullanılır. Bu odadaki dinleyiciyi saran ses enerjisinin yayılmasının sağlar. Çınlama süresinde azalma olacaktır, ancak azalma aynı alanda benzer bir emici uygulandığı durumdaki kadar şiddetli olmayacaktır. Buna ek olarak, tipik bir dinleyici, çınlamanın azaltıldığını, bozunmanın (decay) düzeldiğini, anlaşılabilirliğin geliştiğini ve difüzyon uygulandıktan sonra odanın genel olarak daha iyi duyulduğunu fark etmeme eğilimindedir [3].

Küçük alanlar için, difüzyon kullanma kararı daha zordur. D'Antonio ve Cox, difüzörlerin tam faydasının dinleyicinin yayılan yüzeyden yaklaşık 3 m uzakta bir minimum çalışma mesafesi olduğu zaman gerçekleştiğini ifade eder [7]. Bu yaklaşım difüzörlerin hacimde yerleştirilmesinde bir tasarım kriteri olarak kabul edilebilir. Küçük odalarda emilime yönelmek ve ses enerjisini azaltmak yerine yayılım olayına yönelmek daha iyi sonuçlar verebilir.

Küçük odalarda yaygın olarak kullanılan difüzyon uygulamaları, arka duvar ve tavanda yapılmaktadır (geniş alanlar gibi). Difüzyon, odayı akustik olarak çok fazla öldürmeden küçük bir odadan yansıtıcı eserler çıkarmak için kullanılır [3].

Difüzyona ek olarak, ses kontrolü yansıma (reflection), kırınım (diffraction) veya bükülme (refraction) ile yeniden yönlendirilebilir. Kırınım, bir nesnenin etrafında, bir duvarın arkasından geçen tren sesinin duyulmasında olduğu gibi, büküldüğünde

gerçekleşir. Tren gürültüsünden gelen düşük frekanslar, duvarın yüksekliğine göre büyük dalga boylarına sahiptir ve bu sayede duvarın üzerinden geçerler [3].

Bükülme, nesne içermeyen tek akustik yönlendirme şeklidir. Akustik bükülme, sesin ortamdaki hızında oluşan değişikliklerden kaynaklanan ses dalgasının bükülmesidir. Bir odada sıcaklık farkları olduğunda akustik bükülme meydana gelir. Sesin hızı havanın sıcaklığına bağlı olduğundan, akustik dalga bir sıcaklık gradyanından geçtiğinde, soğuk havaya doğru bükülür. Bu, tavanda bulunan havalandırma deliklerinden gelen soğuk havanın bulunduğu bir odada, geniş odalarda iç mekânlarda meydana gelebilir, sıcaklık dengeye ulaşıncaya kadar ses yukarı doğru bükülür [3].

3.3.4 Difüzörlerin modifikasyonu ve ses emme davranışları

Sayısal tür difüzörlerin (Schroeder difüzörleri) temel uygulama alanı büyük hacimler ve orta frekans aralığıdır. Boyutlarından dolayı küçük odalar için pratik değildir. Küçük odaların akustik tasarımı ve iyileştirmesi hem düşük hem de yüksek frekanslarda gerekli olabilir. Küçük odalardaki en düşük modal frekanslar, difüzörlerin frekans aralığının altındadır. Modların neden olduğu problemler, odaya yeterli düşük frekans sönümlemesi eklenerek azaltılır. Difüzörlerin frekans aralığını düşük frekanslara doğru genişletmek mümkündür [5]. Optimizasyon için kuyuları ayıran kuyu ayıraçları ve kuyu dibi üzerinde uygulamalar yapılır.

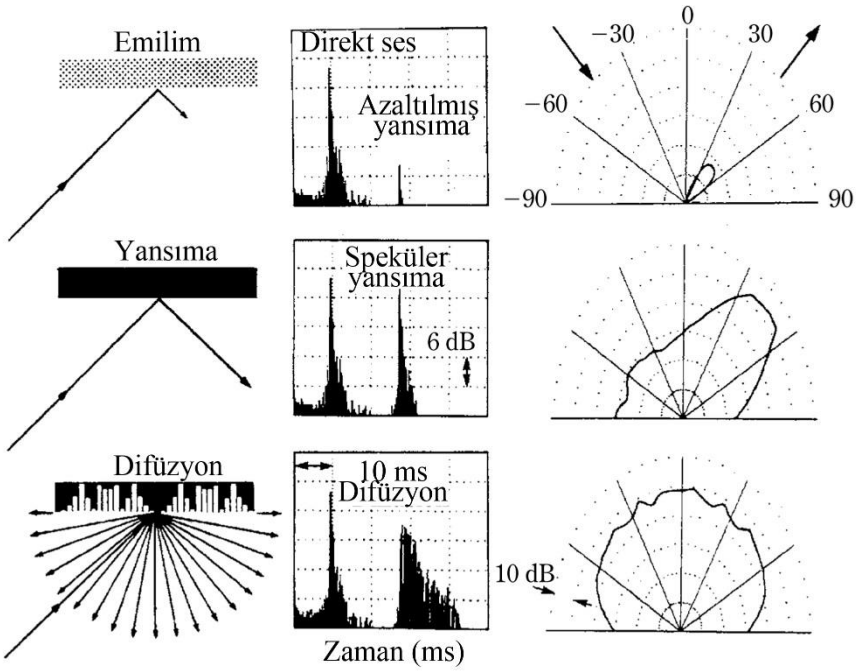
Kuyu ayıracı olmayan difüzörler sesi kuyu ayıracı olan difüzörlerden daha iyi yaymaktadır [5]. Kuyuları ayıran ayraçların kaldırılması difüzörün etkin frekans aralığını genişletebilir. Kuyuların alt kısımlarını bir Helmholtz rezonatörü veya bir membranla kapatıp sonlandırarak difüzör kuyusunun derinliğini azaltmak, difüzörün genişletilmiş düşük frekanslı difüzyon yeteneğine sahip olmasına; ancak orta ve yüksek frekanslardaki performansının daha kötü olmasına sebep olur [5].

Difüzörlerin akustik özelliklerini iyileştirme yöntemlerinden biri de kuyuyu elektronik olarak kontrol edilen bir hoparlör ile değiştirmektir. Elektronik rezonatörler 3 boyutlu difüzörler için uygundur çünkü hoparlör boyutu yaklaşık olarak tipik bir difüzör hücresinin kesit boyutuna eşittir. Düşük frekanslı bir difüzör, elektronik olarak rastgele fazlanmış frekanslar yayan bir hoparlör dizisi ile oluşturulabilir [5].

Ses etkin bir alan tasarlanırken, üç temel kriter vardır: emilim, yansıma ve difüzyon. Geçmişte, hacimde çok fazla yansıma olması yönünde bir yaklaşım vardı. Ancak bu yaklaşımda hacimde difüzyon çok azdı. Tasarımcının görevini yerine getirebilmesi

için yalnızca emilim ve sınırlı sayıda geometrik parametre mevcuttur. Emilim, yansıma ve difüzyon artık en azından potansiyel olarak daha iyi bir denge durumundadır [1].

Emilim, yansıma ve difüzyonun üç fiziksel prensibinin olay sesi üzerindeki etkileri, Şekil 3.14'te karşılaştırılmıştır. Bir emicinin yüzeyine çarpan ses büyük ölçüde emilir; ancak küçük bir kısmı yansıtılır. Sert, yansıtıcı bir yüzeye düşen aynı ses dalgası, yansıtıcı yüzeydeki kayıplarla azalmış olsada, yüzeye düşen sesle neredeyse aynı yoğunlukta bir yansıma oluşturur [1]



Şekil 3.14 : Emilim, yansıma ve difüzyonun fiziksel prensiplerinin karşılaştırılması [1].

Kutupsal diyagram, yansıma açısı etrafında konsantre olan enerjiyi gösterir. Kutupsal alanın genişliği, dalga boyunun ve yansıtan yüzeyin boyutunun bir özelliğidir. Kuadratik kalıntı tipi bir difüzörün üzerine düşen ses dalgası, sesi silindirik yayılım modelinin yarı kesiti boyunca dağıtır. Dağınık enerji katlanarak düşer. Düşük frekansta açılı gelen tüm sesler için sonuçlar kuyu derinliğine bağlıdır. Üst frekans, periyod başına kuyu sayısı ile doğru orantılıdır ve kuyu genişliği ile ters orantılıdır [1].

4. KÜÇÜK ODALARIN AKUSTİK AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Mimari ve matematiksel oranlar, mimarlık tarihi boyunca iyi ve güzel tasarımın belirlenmesinin ve tanımlanmasının nesnel bir unsur olarak ifade etmede kullanılan bir parametredir. Mimarlar tarafından görsel algı temelinde belirlenmiş oranların akustik olarak karşılıklarının incelenmesi, akustik açıdan bu oranların nasıl sonuçlar vereceği sorusuna cevap bulmak ve bir tasarım pratiğinin oluşturulması amacıyla bu oranların incelemesi yapılmıştır.

Tez çalışmasında, müzik sesi (<100 Hz.) ve konuşma sesi üzerinde etkili olmakla birlikte müzik sesi temelinde şekillenen, belirli oranlardaki hacimler bilgisayar benzetimi aracılığıyla değerlendirilmiştir. Küçük hacimlerin akustik incelemesinde ve tasarımında; büyük hacimlerden farklı olarak ışın akustiği teorisi değil, dalga akustiği teorisi uygulanmalıdır. Bu bağlamda çalışmada dalga akustiği teorisini destekleyen ve hesaplama yöntemi olarak bu teoriyi kullanan COMSOL Multiphysic yazılımı kullanıldı. Çalışma için öncelikle hacimler harici bir modelleme yazılımında (Rhinoceros 5.0) geometrik olarak oluşturuldu. Geometriler COMSOL Multiphysic yazılımına aktarılıp hesaplama için gerekli düzeyde modellendiği ve hesaplamaya uygunluğu yazılımın gerekleri (yüzeylerin Mesh olarak işlenmesi, ses yayılımını sağlaması ve hesaplama için hacmin içerisinde ortam malzemesi olarak hava atanması, frekans aralığının ve mod frekansı sayısının belirlenmesi) doğrultusunda kontrol edildi ve gerekli bilgiler girildi.

Hacimlerin belirlenmesinde literatürdeki mimari ve akustik oran türleri kullanılmıştır. Çalışmanın birinci aşamasında 3 adet mimari/görsel oranlı, 3 adet akustik oranlı ve birim küp olmak üzere 7 farklı oran üzerinde çalışıldı. Bazı tasarım parametreleri sabit tutulmuş, etkisi değerlendirilecek olan tasarım parametreleri ise değiştirilmiştir. Sabit parametreler: hacim, çınlama süresi. Etkisi incelenen parametreler: oda oranları, yüzey ve şekil değişiklikleri. Bu aşamada elde edilen sonuçlar doğrultusunda modal karakteristik olarak en kötü sonucu veren birim küp hacim kontrol hacmi olarak belirlendi. Çalışmanın ikinci aşamasında küp hacimde yüzey ve şekil değişiklikleri yapılarak modal karakteristiğin değişimi incelenmiştir.

Küçük odalar sesin dalga boyu ile hacmin boyutlarının kıyaslanabilir olduğu ve modların etkin olduğu bir hacim türüdür. Odanın müzik pratiği ve eğitimi amacıyla kullanılacağı kabulü ile düşük frekans seslerin önemi artmaktadır.

Müzik bölümünün işlevi sadece müzik öğretmektir. Bu nedenle, bölüm içindeki odalar birbirlerinden tamamen yalıtıldıktan sonra, oda akustiği ilk tasarım konusudur. Denge, tonlama, konuşmanın anlaşılabilirliği ve dinamik renk tonu kontrolünü içeren konular öğretilirken, öğretmenler ve öğrenciler yanlışlıkların yetersiz performanstan mı yoksa kötü bir akustik ortamdan mı kaynaklandığını algılayamazlar. Bu nedenle, uygun akustik koşullar, müzikte tatmin edici bir eğitim deneyiminin gerçekleşmesi için bir ön koşul olarak düşünülmelidir. Prova odaları genellikle bireysel ve küçük gruplar tarafından kullanılacak şekilde iki türdür.

Modların etkisi, oda oranlarının başlangıçta iyi kritik edilmesine bağlı olarak tasarımın başlangıcında önemli ölçüde azaltılabilir. Genel yaklaşım olarak birbirinin katı ve tam sayı katlarının kullanımı tasarımın modal olarak zayıf kalmasına sebep olur; ancak üretim kolaylığı sağlar. Tam sayı olarak üretilmiş hacmin akustik uygulamalar ile yeniden boyutlandırılmasına imkân verecek esnekliğe sahip olması gereklidir. Araştırma kapsamında kullanılan oda oranları, literatürde önceden çalışılmış ve belirlenmiş oda oranları üzerinden incelenmektedir.

4.1 Küçük Odaların Tasarımı ve Değerlendirme Kabulleri

Literatür araştırması sonucunda belirlenen 7 adet oda boyutu, eşit hacimde olacak ve belirlenen oranları sağlayacak şekilde oluşturulmuştur. Bu oranlar mimaride genel olarak kullanılan ve/veya akustik çalışmalar sonucu elde edilen oda oranlarıdır. Çizelge 4.1 bu oda oranlarını göstermektedir. Hacimlerin mod sayıları ve frekansları boyutları üzerinden hesaplanarak belirlenmiştir. Hacimler içerisinde ilk aşama modal karakteristik incelemesi yapıldıktan sonra küp hacim köşe ve yüzey değişiklikleri ile modların değişimi tekrardan incelenmiştir. Çalışılan hacimlerin dış ortam ve komşu hacimlerden yeteri kadar yalıtıldığı kabul edilerek akustik tasarımlarına ilişkin olarak çalışmalar yapılmıştır.

Hacimlerdeki mod analizleri ilk olarak en yüksek enerjiye sahip olan aksiyel modlar üzerinde yapılmaktadır. Ardından teğet ve oblik modlar incelenmektedir.

Çizelge 4.1 : Oda oranları ve oran türleri

Yükseklik	Genişlik	Uzunluk	Oran Türü
H	W	L	
1	2	3	Harmonik
1	1.26	1.6	Altın Oran
5	3	8	European
4	3	6	Alberti
1	1	1	Birim Küp
5	2	3	Alberti
7	4	9	Alberti

Çizelge 4.2 bu oda oranlarını yükseklik boyutuna göre eşitlenmiş olarak oda oranlarını göstermektedir.

Çizelge 4.2 : Yükseklik boyutuna göre eşitlenmiş oda oranları

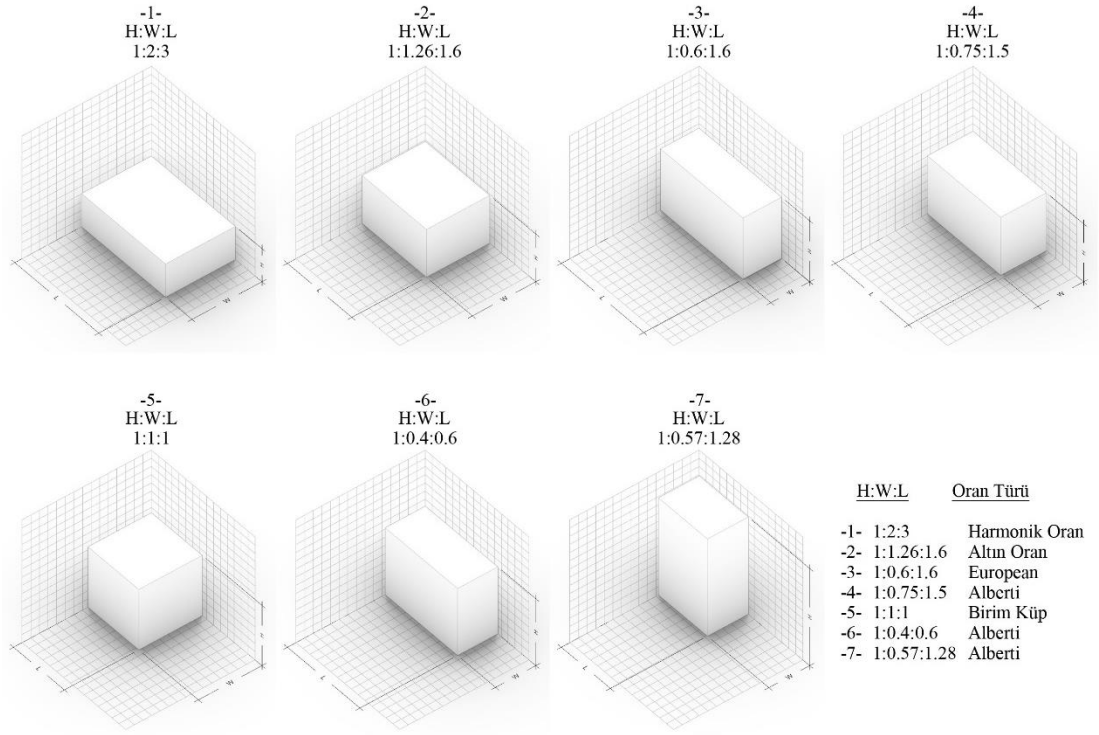
Yükseklik	Genişlik	Uzunluk	Oran Türü
H	W	L	
1	2	3	Harmonik
1	1.26	1.6	Altın Oran
1	0.6	1.6	European
1	0.75	1.5	Alberti
1	1	1	Birim Küp
1	0.4	0.6	Alberti
1	0.571429	1.285714	Alberti

Çizelge 4.3 sabit hacimde oda boyutlarını gösterir. Şekil 4.1 bu odaların üç boyutlu model gösterimidir.

Çizelge 4.3 : Eşit hacim altında oda boyutları

Yükseklik (m)	Genişlik (m)	Uzunluk (m)	Hacim (m^3)
H	W	L	V
4.05480	8.10960	12,.6440	400
5.83252	7.34898	9.33204	400
7.46901	4.48140	11.95041	400
7.08439	5.31329	10.62659	400
7.36806	7.36806	7.36806	400
11.85631	4.74252	7.11379	400
8.16560	4.66606	10.49863	400

Mimaride yaygın olarak kullanılan oranlar ile akustik tasarım uzmanları tarafından önerilen oranların modal özellikleri bakımından kıyaslanması, hacmin mod bölgesindeki davranışının belirlenmesi birim küp olarak tasarlanan tüm boyutları eşit hacim ile kıyaslanması ve birim kübün ses yayılımının ve mod özelliklerinin yüzey ve köşe uygulamaları ile değişiminin incelenmesi çalışmanın temelini oluşturur.



Şekil 4.1 : Çalışılan oda boyutları.

4.2 Küçük Oda Oranlarının Değerlendirilmesi

Belirlenen oda boyutlarının ilk 30 aksiyel mod frekansı, mod sayısı ve modlar arasındaki mesafe değerleri hesaplanmıştır. Bu hacimlerin akustik benzetim ve görselleştirmeleri COMSOL Multiphysic yazılımında gerçekleştirilmiştir. Modlar arasındaki mesafe Gilford ve Bonello kriterlerine göre incelenmiş ve çizelgelerde renklenme yok ise (-) işareti ile renklenme var ise (+) işareti ile ifade edilmiştir.

Oda boyutlarının küçük hacim akustiği parametreleri içerisinde ve modal bölge karakteristiğine uygun olarak değerlendirilebilmesi için denklem 2.9 ile kritik frekansı 100 Hz kabul edilip tersine işlem ile oda hacmi hesaplanmıştır. Çınlama süresi "2.2.3 Çınlama" başlığı altında tartışılan ve Çizelge 2.3'te ifade edilen değerler ve literatür araştırmasına dayalı olarak 1 s. olarak tayin edilmiştir. Bu durumda f_c=100 Hz. RT=1 s. değerleri denklem 2.9'a uygulandığında hacim, V=400 m^3 olarak hesaplanır. Tez çalışması kapsamında genel bir küçük odanın akustiği incelenmiştir. Çalışma her biri, 400 m^3 hacimli ve farklı yüzey alanlarına sahip birinci aşamada 7 farklı hacmi; ikinci aşamada 8 farklı hacim incelenmiştir. Hacimlerin geometrisi Şekil 4.1'de gösterilmektedir.

Hacimlerin benzetimi, küçük hacim akustiğinde etkili olan, sesin dalga teorisine göre çalışan COMSOL Multiphysic yazılımında yapıldı. Yazılımın Pressure Acoustics, Frequency Domain (acpr) fizik hesaplama birimi kullanılarak mod frekansları ve basınç değerleri elde edildi. Frekans ve basınç seviyesi değerleri birleştirilerek oda tepkisi grafikleri oluşturuldu. Müzik üzerindeki etkileri göstermek için, 16 Hz. ile 100 Hz. bölgesinde modlara karşılık gelen frekanslar hesaplandı. Mod gösterimleri, ilgili mod frekansı için mutlak ses basıncı (Pa) ve ses basınç seviyesi (dB) değerlerini gösterir. Modelde duvarların, zeminin ve tavanın tüm sınırlarının mükemmel bir şekilde rijit olduğu varsayılır. Bu, odanın yüzeylerine sönümleme özellikleri hakkında hiçbir verinin girilmediğini ifade eder; ancak basınç dağılımı makul derecede doğrudur. Hacim içerisindeki basınç dağılımı 0 Pa ile 1 Pa aralığındaki bir skalada ifade edilir. 0 Pa hacim içerisindeki basınç minimumunu (0 basınç noktasını) gösterir. Mod dalgalarının birbirini güçlendirmesi sonucunda 1 Pa değerinden büyük basınç değerleri de görülür. Negatif basınç değerleri basıncın pozitif basınç değerine göre ters yönde oluştuğunu ifade eder. Negatiflik durumu basıncın konumunun doğrultusunu ifade eder.

Modlara ait görseller Comsol Multiphysic yazılımı kullanılarak yapılan benzetimin sonucunda elde edilir. Modların frekans değerleri ve basınç değerleri benzetim yoluyla ile elde edilir. Modların frekans değerleri ayrıca bağıntılar ile kontrol amaçlı olarak hesaplandı ve tablolaştırıldı. Frekans tepki eğrisi, benzetim sonucunda elde edilen ses basıncı seyiyesi değerleri ile bu değerlere karşılık gelen frekans değerlerinin dışarı aktarılıp Excel yazılımında yeniden işlenerek grafik haline getirilmesi ile oluşturulur. Eğrilerin üzerindeki değerler frekans eksenine ait değeri ifade eder. Frekans tepki eğrisi grafikleri her hacim için 1 Pa değerinin dB türünden karşılığı değerden başlar.

Bu değerin ses basınç seviyesi cinsinden karşılığı denklem 4.1 ile 93.97 dB olarak hesaplanır [8].

$$SPL = 20 \log_{10} (P/P_0) \quad (4.1)$$

SPL : ses basınç düzeyi, dB
P : ses basıncı, Pa
P_0 : duyulan en küçük ses basıncı, Pa ($2x10^{-5}$ Pa)

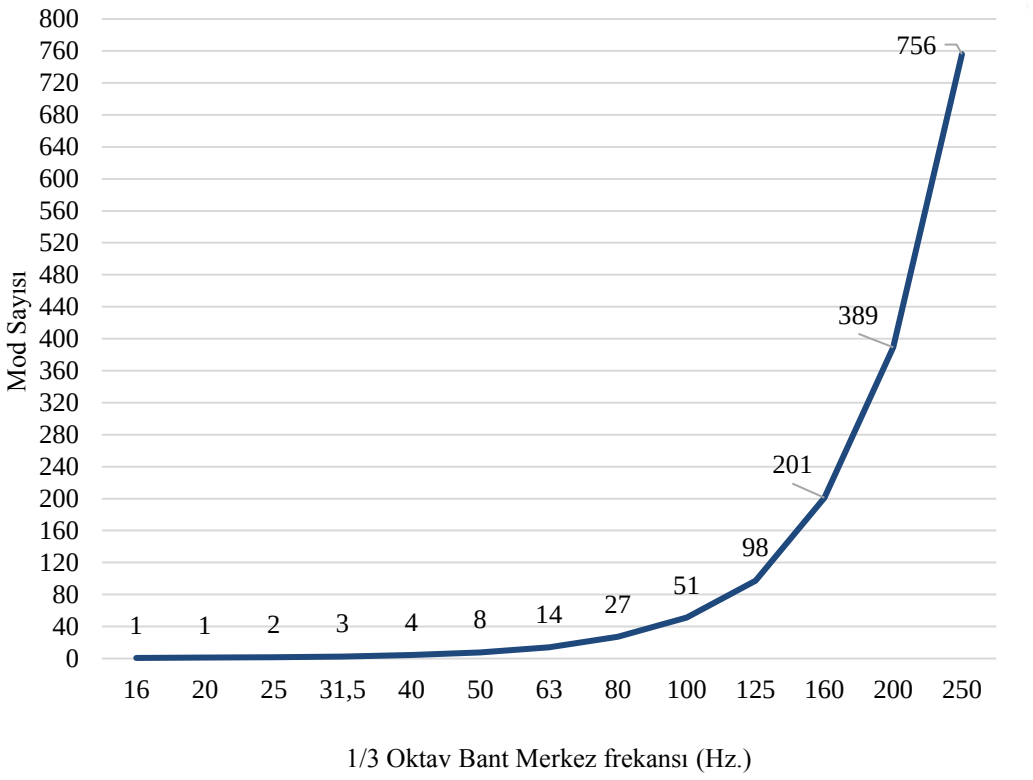
Sesin hacim içerisindeki hızı 343 m/s olarak, yoğunluğu 1.2 kg/m^3 olarak belirlenmiştir.

4.2.1 Birim kübün değerlendirilmesi, 1:1:1

Kontrol ve kıyas amacıyla, modal özelliklerinin olumsuzluğu nedeniyle tüm yüzey boyutları eşit bir hacim seçilerek kontrol birimi olarak atanmıştır. Bu hacmin aksiyel modları denklem 2.6 ile hesaplanmıştır. Hacmin mod sayısı denklem 2.7'ye göre hesaplanır. Modlar arasındaki mesafe denklem 2.8 ile hesaplanır.

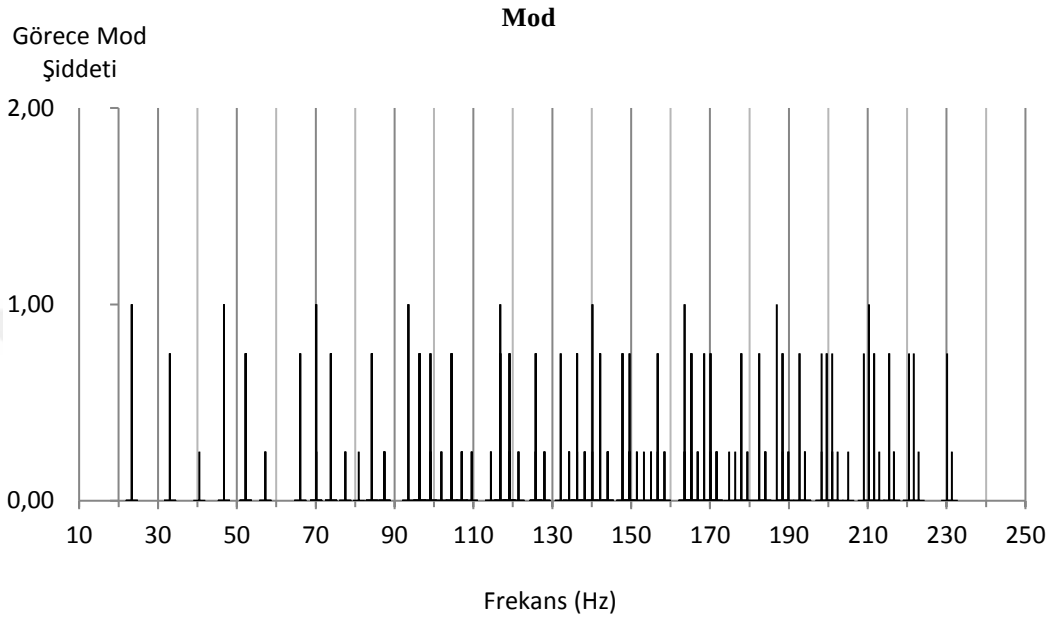
Gilford tarafından ifade edilen mod aralığı kriterine göre aksiyel modlar arasındaki mesafe 20 Hz.'den fazla olmamalıdır. Küp hacimde bu mesafe iki en düşük frekanslı aksiyel mod aynı frekansta oluştuğundan 0 Hz. olarak gözlemlenmektedir. Bonello kriterleri açısından incelendiğinde modlar arasındaki mesafe; ilgili modun frekansının %5'i kadar olmalıdır. Küp hacimde hacimdeki en düşük frekanslı aksiyel mod için 23.3 x 5/100 = 1.165 Hz. olarak hesaplanır. Yani ilk aksiyel mod ile bir sonraki mod arasındaki mesafe yaklaşık 1 Hz. olmalıdır. Küp hacim Gilford ve Bonello tarafından ifade edilen mod aralığı kriterlerini sağlamamaktadır.

Modal yoğunluk frekans arttıkça artar. 31.5 Hz. frekansındaki ve 16-20 Hz aralığındaki sabit seyir Şekil 4.2 'de görülmektedir. Hacmin modal yoğunluğu 31.5 Hz.'den sonra düzenli bir artış gösterir. 200 Hz. de en yüksek artış eğimi gözlemlenir.



Şekil 4.2 : 1:1:1 oranlı hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı.

Şekil 4.3 hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarına ait modal yoğunluğunu ve dağılımını göstermektedir. Modların yansımalardan kaynaklı enerji düşüşleri ve farkları üzerinden modların ifadesi için bir ölçek oluşturulmuştur. Modlar düşey eksende farklı görece mod şiddetleri ile ifade edilirler. Aksiyel mod=1, teğet mod=0.75 ve oblik mod=0.25 değeri ile ifade edilir.



Şekil 4.3 : 1:1:1 oranlı hacmin modal yoğunluk grafiği.

Şekil 4.3'teki ve Çizelge 4.4'teki verileri incelersek, sadece bir boyut (eksen) tarafından desteklenen tekil frekans yoktur. Örneğin, 23.3 Hz hacmin tüm boyutları tarafından desteklenir. Tüm aksiyel mod frekansları hacmin 3 boyutu tarafından desteklenir. Yine 131 Hz modu da üç kez meydana gelir ve her üç boyut (eksen) tarafından desteklenir. Bu odada 23.30 Hz, 46.60 Hz, 69.90 Hz, 93.20 Hz ve 116.50 Hz frekansları akustik olarak sorun oluşturabilecek frekanslardır. Spektrum boyunca modların oldukça iyi bir dağılımı vardır. Modlar arasındaki farkın 0,0,2 ile 3,0,0 arasındaki 23.3 Hz'lik modal boşluk gibi ve 2,0,0 ile 0,2,0 arasındaki mod çakışması büyük akustik kusurlar vardır. Modların birbirine mesafeleri bakımından küp şeklindeki hacim Bonello kriterini sağlamamaktadır. Modlar arasındaki mesafe hacmin boyutlarıyla ilişkili bir sayıdır. Boyutlar aynı olduğundan mesafe sürekli olarak kendini tekrarlar. Frekansla birlikte artan mod sayısına rağmen küp hacim modal özellikleri bakımından en kötü hacim biçimidir.

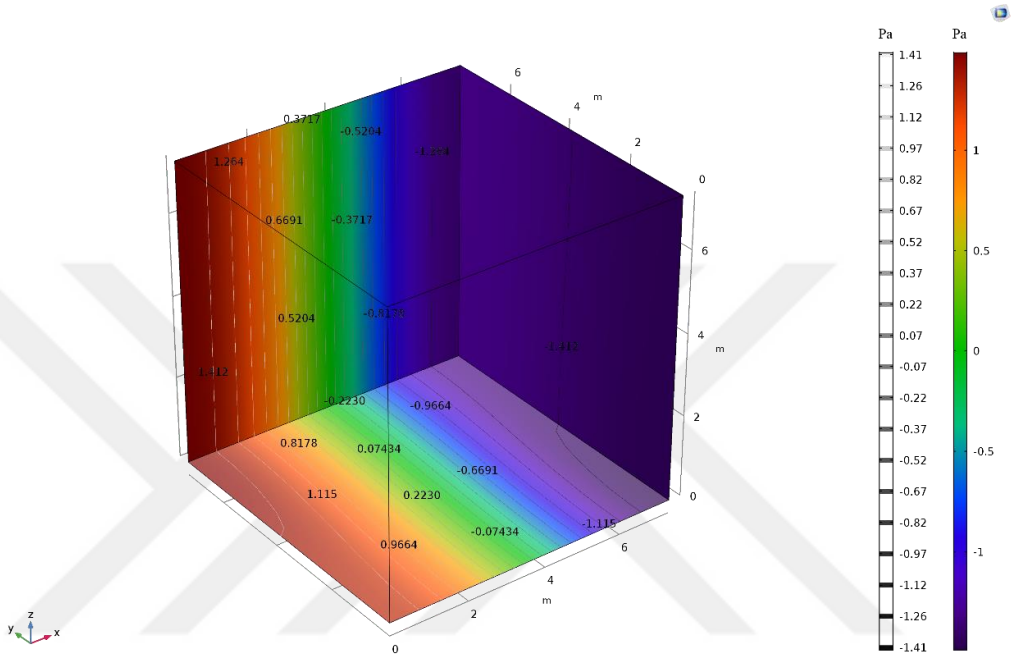
1:1:1 oranlarında ve 7.36:7.36:7.36 m boyutlarındaki küp şeklindeki hacmin aksiyel mod frekansları Çizelge 4.4'te gösterilmektedir.

Hacmin en (W), boy (L), yükseklik (H) boyutlarının ilk aksiyel frekansları sırasıyla f_W=23.30 Hz, f_L=23.30 Hz, f_H=23.30 Hz frekanslarında oluşmaktadır.

Çizelge 4.4 : 1:1:1 oranlarına sahip hacmin ilk 30 aksiyel mod frekansları

Mod Sayısı	Tam Sayı			Mod Frekansı	Artan Sırada Dizilim	Mod Mesafeleri	Renk.	
	p(L)	q(W)	r(H)				Gilford	Bonello
f_1	1	0	0	23.3016304	23.30163043	0	-	+
f_2	0	1	0	23.3016304	23.30163043	0	-	+
f_3	0	0	1	23.3016304	23.30163043	23.30163043	+	-
f_4	2	0	0	46.6032609	46.60326087	0	-	+
f_5	0	2	0	46.6032609	46.60326087	0	-	+
f_6	0	0	2	46.6032609	46.60326087	23.30163043	+	-
f_7	3	0	0	69.9048913	69.9048913	0	-	+
f_8	0	3	0	69.9048913	69.9048913	0	-	+
f_9	0	0	3	69.9048913	69.9048913	23.30163043	+	-
f_{10}	4	0	0	93.2065217	93.20652174	0	-	+
f_{11}	0	4	0	93.2065217	93.20652174	0	-	+
f_{12}	0	0	4	93.2065217	93.20652174	23.30163043	+	-
f_{13}	5	0	0	116.508152	116.5081522	0	-	+
f_{14}	0	5	0	116.508152	116.5081522	0	-	+
f_{15}	0	0	5	116.508152	116.5081522	23.30163043	+	-
f_{16}	6	0	0	139.809783	139.8097826	0	-	+
f_{17}	0	6	0	139.809783	139.8097826	0	-	+
f_{18}	0	0	6	139.809783	139.8097826	23.30163043	+	-
f_{19}	7	0	0	163.111413	163.111413	0	-	+
f_{20}	0	7	0	163.111413	163.111413	0	-	+
f_{21}	0	0	7	163.111413	163.111413	23.30163043	+	-
f_{22}	8	0	0	186.413043	186.4130435	0	-	+
f_{23}	0	8	0	186.413043	186.4130435	0	-	+
f_{24}	0	0	8	186.413043	186.4130435	23.30163043	-	-
f_{25}	9	0	0	209.714674	209.7146739	0	-	+
f_{26}	0	9	0	209.714674	209.7146739	0	+	+
f_{27}	0	0	9	209.714674	209.7146739	23.30163043	-	-
f_{28}	10	0	0	233.016304	233.0163043	0	-	+
f_{29}	0	10	0	233.016304	233.0163043	0	+	+
f_{30}	0	0	10	233.016304	233.0163043			

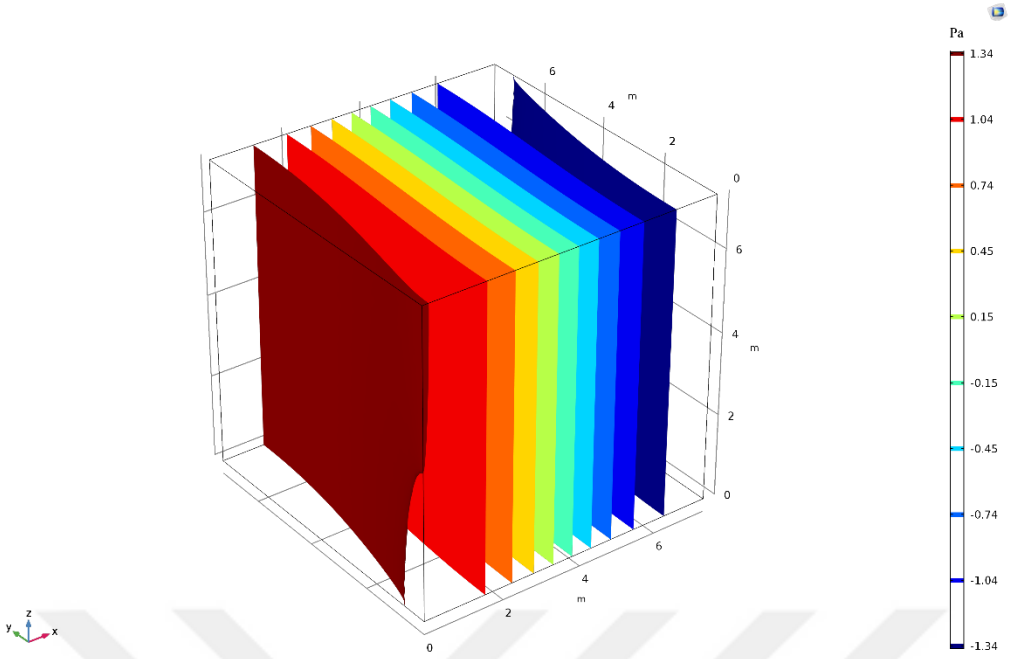
Hacmin ilk aksiyel modu f_1=23.3 Hz de oluşmaktadır. Tüm boyutlar eşit olduğundan bu mod tüm eksenlerde kendini tekrar etmektedir. Plan düzleminde, karşılıklı iki yz yüzeyi arasında oluşan birinci aksiyel mod Şekil 4.4'te, 3 boyutlu görseli Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Şekil 4.4'te gösterim basınç değeri (Pa) üzerinden, minimum (0 Pa) ve maksimum (1 Pa) olarak ifade edilir. Eksi basınç değerleri hacmin orta ekseni orjin kabul edildiğinde basıncın konumunun zıt yönde olduğunu ifade eder.



Şekil 4.4 : Hacimde oluşan birinci aksiyel mod (yz yüzeylerinde) f_1=23.3 Hz. in ses basıncı (Pa).

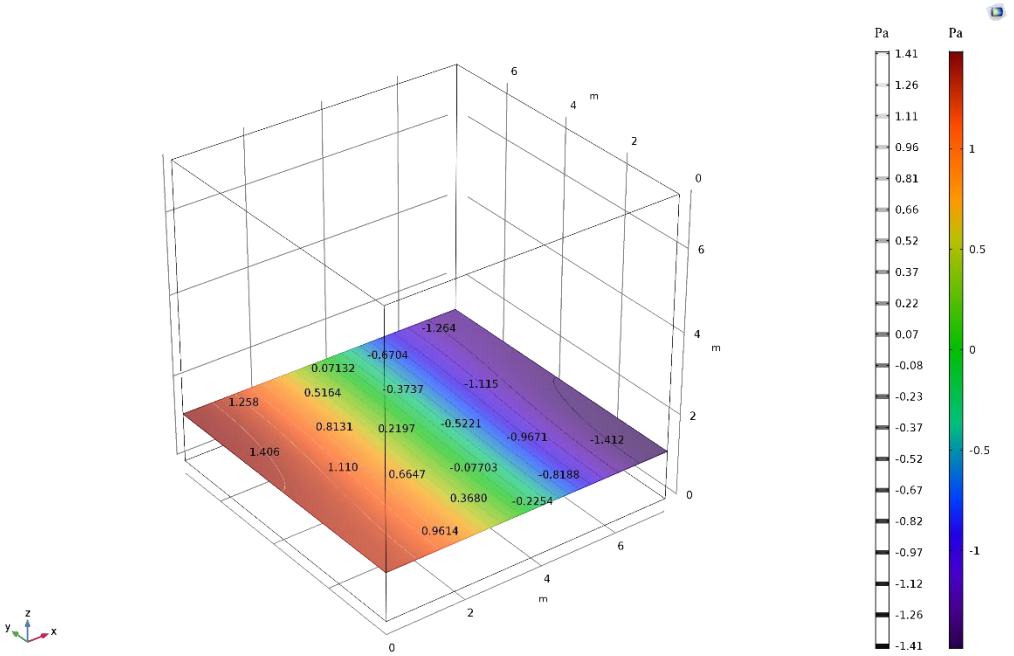
Şekilde gösterilen mod yan duvarlar arasında oluşmaktadır. Her karşılıklı duvar çifti için mod basınç değerleri eğri yönlerinin değişmesi, hacmin tüm boyutları eşit olduğundan, koşuluyla aynıdır. Hacmin kenarlarında mod maksimumu okunmakta, ortasında ise mod minimumu gözlenmektedir. Ses yayılımının eşit olmadığı ve belirgin basınç farklarının oluşumu açıkça görülür. Aksiyel modlar hacmin karşılıklı yüzeyler arasında oluşur bu sebeple yüzeylere paralel basınç maksimumları ve minimumları gözlemlenir. Hacim küp olduğundan karşılıklı yüzeylerin aksiyel modları birbirinin aynı olarak oluşur.

Aksiyel modlar daha az yüzeyde yansıma olayı gerçekleştirdiğinden enerjileri fazladır. Hacmin tam ortasında 0 basınç noktası, paralel olarak tavan, döşeme ve duvar yüzeylerinde de kendini tekrarlar. Bu noktada konumlandırılacak bir dinleyici hacmin yüzeye yakın noktalarına nazaran sesi farklı basınç düzeyinde duyacaktır.



Şekil 4.5 : f_1=23.3 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa).

Bu hacim içerisinde oluşan modlar oldukça fazla ve basınç yönünden kuvvetlidirler. Mod analizi açısından küp biçimli bir hacim oldukça olumsuz sonuçlar verir. Hacmin köşe noktalarında oluşan basınç maksimumları ve ortasında oluşan basınç minimumu tüm yüzeylerin eşit olması nedeniyle 6 kez tekrarlanır. Modun h=1.2 m farazi alıcı konumu düzlemindeki ses basınç değerleri Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6 : f_1=23.3 Hz. aksiyel modunun h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu.

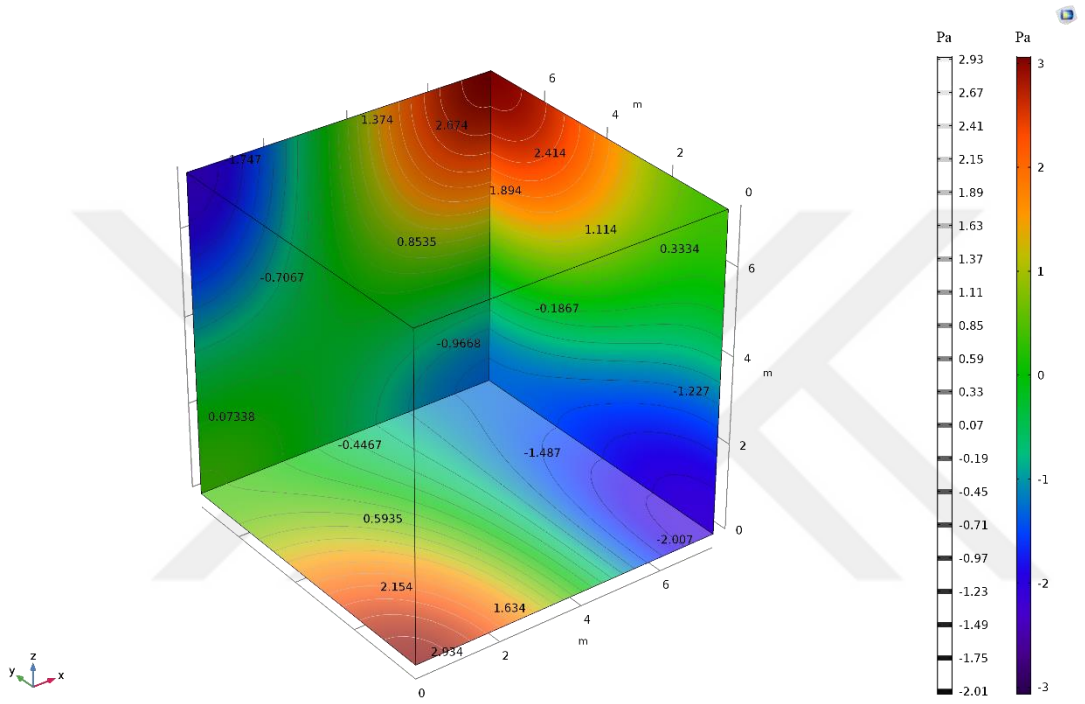
Şekil 4.5 sadece Şekil 4.4'ün ifadesinde kullanılan renklerin bir dilimlenme halini ifade eder. Yükseklik eksenindeki (z ekseni) ses basınç değerlerini ifade etmez.

1:1:1 oranlarında, küp şeklindeki hacmin aksiyel, teğet ve oblik mod frekansları Çizelge 4.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.5 : 1:1:1 oranlarına sahip hacmin ilk 4 aksiyel,teğet ve oblik mod frekansları.

Mod Sayısı	Tam Sayı			Mod Frekansı	Artan Sırada Dizilim	Mod Mesafeleri	Renk.	
	p(L)	q(W)	r(H)				Gilford	Bonello
f_1	1	0	0	23.3016304	23.30163043	0		+
f_2	0	1	0	23.3016304	23.30163043	0		+
f_3	0	0	1	23.3016304	23.30163043	9.651851351		-
f_4	1	1	0	32.9534818	32.95348179	0		+
f_5	0	1	1	32.9534818	32.95348179	0		+
f_6	1	0	1	32.9534818	32.95348179	7.406126026		-
f_7	1	1	1	40.3596078	40.35960781	6.243653057		-
f_8	2	0	0	46.6032609	46.60326087	0		+
f_9	0	2	0	46.6032609	46.60326087	0		+
f_{10}	0	0	2	46.6032609	46.60326087	19.3037027		-
f_{11}	2	2	0	65.9069636	65.90696357	0		+
f_{12}	0	2	2	65.9069636	65.90696357	0		+
f_{13}	2	0	2	65.9069636	65.90696357	3.997927732		-
f_{14}	2	2	2	80.7192156	69.9048913	0		+
f_{15}	3	0	0	69.9048913	69.9048913	0		+
f_{16}	0	3	0	69.9048913	69.9048913	10.81432432		-
f_{17}	0	0	3	69.9048913	80.71921562	12.48730611		-
f_{18}	3	3	0	98.8604454	93.20652174	0		+
f_{19}	0	3	3	98.8604454	93.20652174	0		+
f_{20}	3	0	3	98.8604454	93.20652174	5.65392362		-
f_{21}	3	3	3	121.078823	98.86044536	0		+
f_{22}	4	0	0	93.2065217	98.86044536	0		+
f_{23}	0	4	0	93.2065217	98.86044536	17.64770682		-
f_{24}	0	0	4	93.2065217	116.5081522	0		-
f_{25}	4	4	0	131.813927	116.5081522	0		-
f_{26}	0	4	4	131.813927	116.5081522	4.570671263		+
f_{27}	4	0	4	131.813927	121.0788234	10.73510371		-
f_{28}	4	4	4	161.438431	131.8139271			

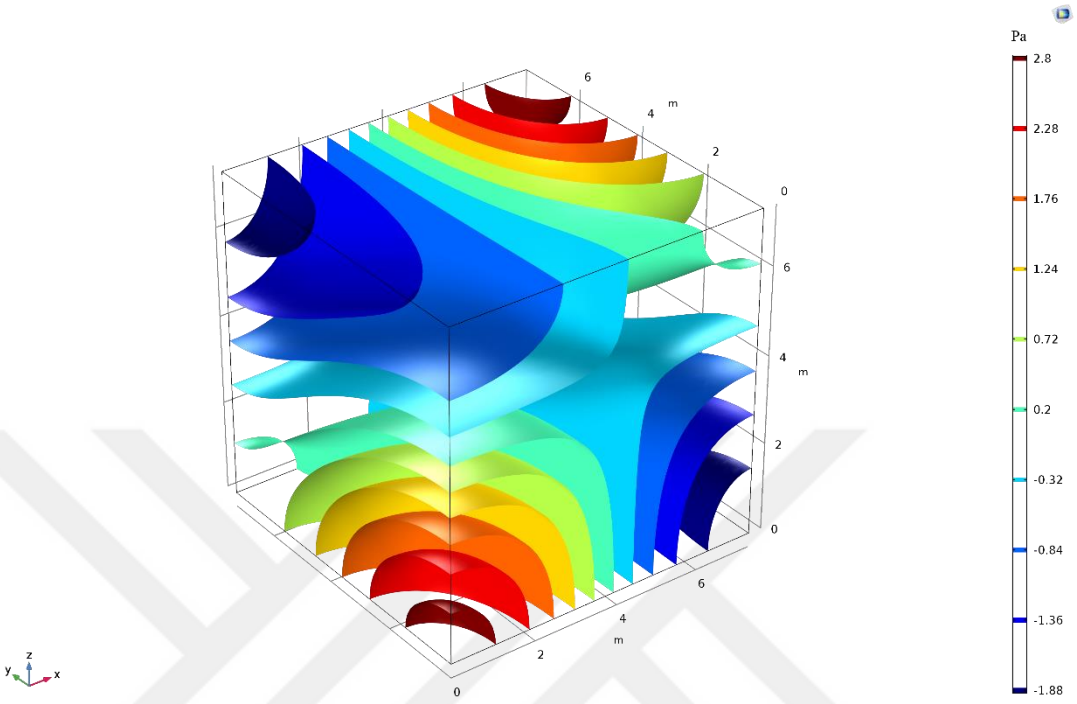
Tüm aksiyel, teğet ve oblik modlar hacim, birbirinin tam katı ve eşit yüzey oranlarına sahip olduğundan birbirlerinin tam sayı katları olarak oluşmaktadır. Bu oda boyutuna bağlı olarak hep aynı frekans ve katlarında mod oluştuğunu gösteririr. Şekil 4.7 küp hacmin ilk teğet modunun ses basınç dağılımını gösterir. 4 duvar yüzeyini dolaşan dalganın oluşturduğu ses yayılımının tabana da etkisi olmaktadır. Duvar yüzeylerinin kendi içinde ses basıncının yayılımını görüyoruz. 4 köşe birleşiminde ses basıncının yükseldiği görülmektedir.



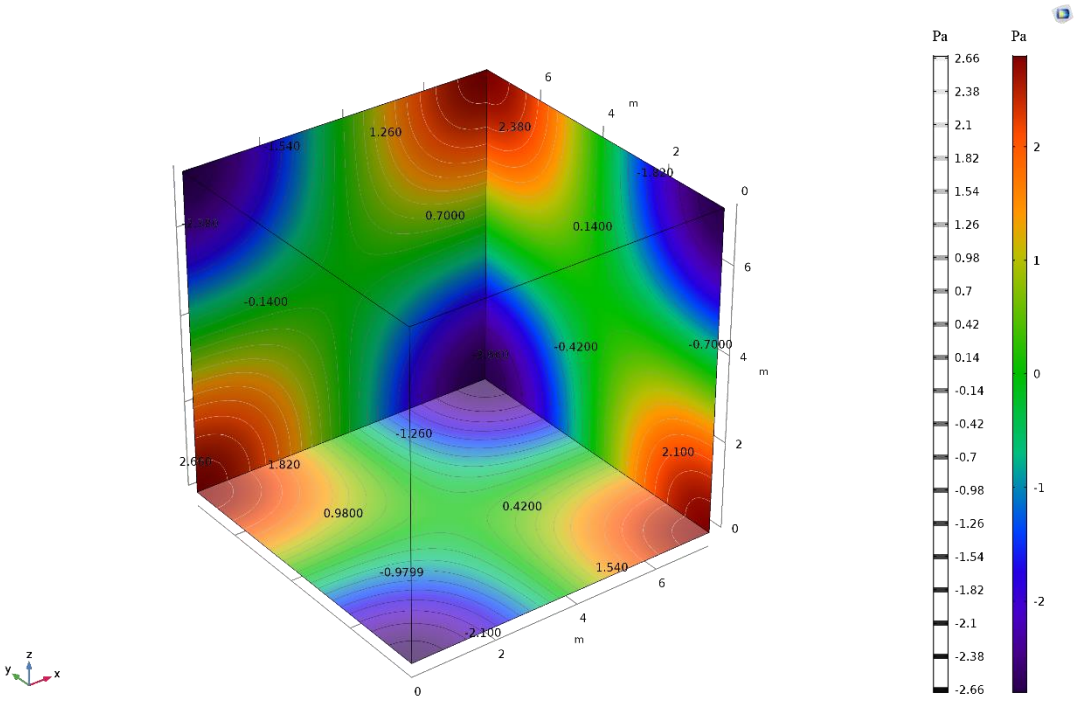
Şekil 4.7 : f_4=32.95 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

Hacmin köşe noktalarında oluşan basınç maksimumu, köşelerde oluşan teğet modu ifade eder. Teğet mod hacmin karşılıklı dört köşesinde oluşur. Teğet modlar hacmin hacmin dört yüzeyi (yz ve xz yüzeyleri) tarafından desteklenir. Hacmin köşe noktalarında basınç maksimumu görülür. Karşılıklı iki çift yüzeyde oluştuğundan yansıma olayı daha fazla tekrarlanır ve modun enerjisi her yansıma sonunda azalır. Köşeyi oluşturan iki yüzeyin kesişimde oluşan mod üçüncü yüzeye doğru genişleme gösterir. Üç yüzeyin katılımı ile köşede f_7=40.35 Hz. de oblik mod oluşur. Köşeyi tam kapsayan bir görünümdedir. Oblik modlar tüm yüzeylerden (yz, xz ve xy yüzeylerinde) yansımalar sonucunda oluştuğundan enerjileri en düşük mod sınıfıdır. Hacmin genel mod karakteristiği genel olarak aksiyel modlar üzerinden incelenmesinin sebebi çok fazla enerjiye sahip olmaları ve karşılıklı ilk yansımalar

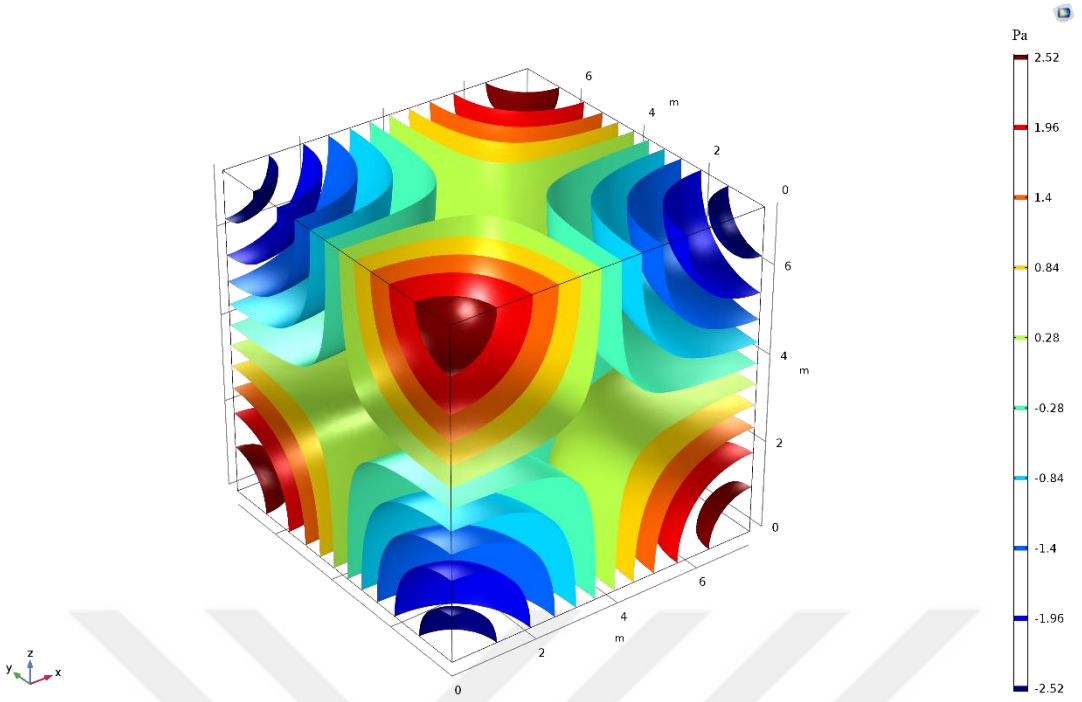
sonucunda oluşmalarıdır. Şekil 4.8 f_4=32.95 Hz. teğet modunun 3 boyutlu gösterimidir. Şekil 4.9 f_7=40.35 oblik modunun plan düzleminde (yz, xz ve xy yüzeylerinde) gösterimidir. Şekil 4.10 oblik modun 3 boyutlu gösterimidir.



Şekil 4.8 : f_4=32.95 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden 3 boyutlu gösterimi.

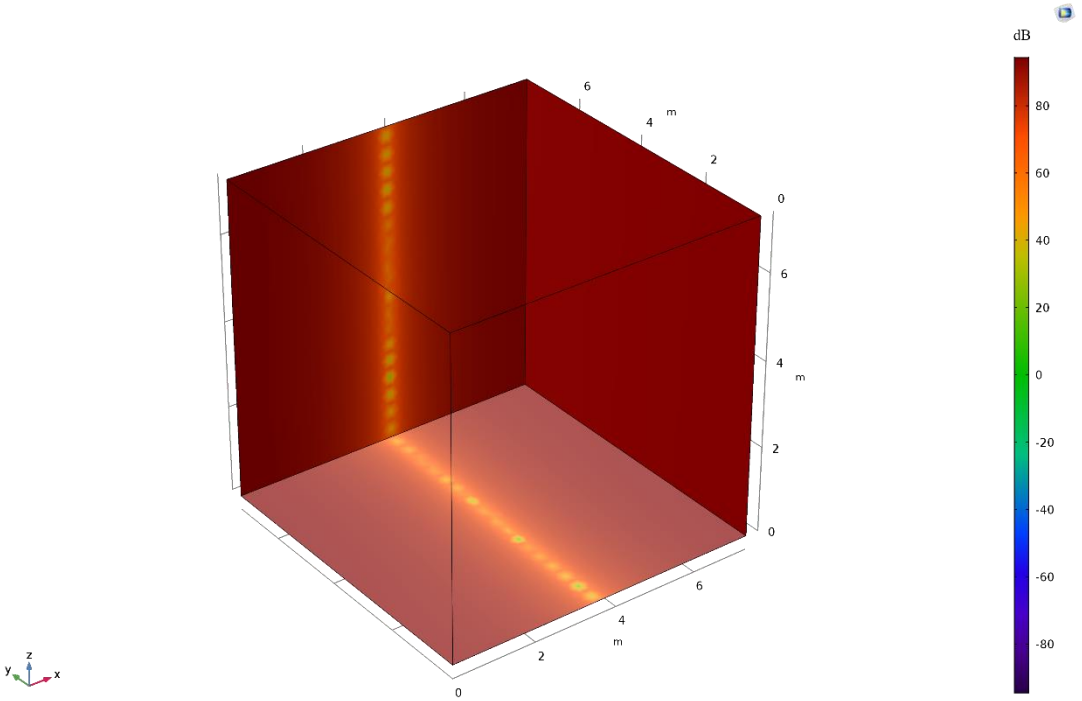


Şekil 4.9 : f_7=40.35 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeylerinde) ses basıncı (Pa) cinsinden plan düzleminde gösterimi.



Şekil 4.10 : f_7=40.35 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeylerinde) ses basıncı (Pa) cinsinden 3 boyutlu gösterimi.

Bu noktada sadece aksiyel modları dikkate aldık. Üç tip mod, aksiyel, teğet ve oblik enerji düzeyinde farklılık gösterir.

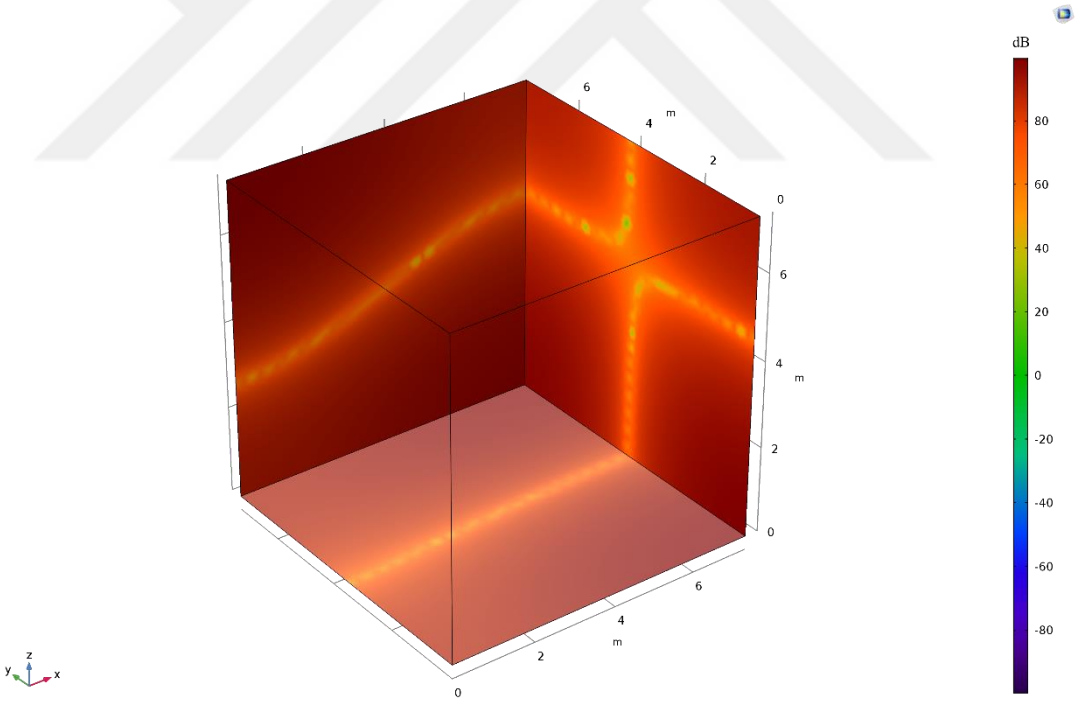


Şekil 4.11 : f_1=23.30 Hz. aksiyel modunun (yz yüzeylerinde) ses basınç düzeyi (dB).

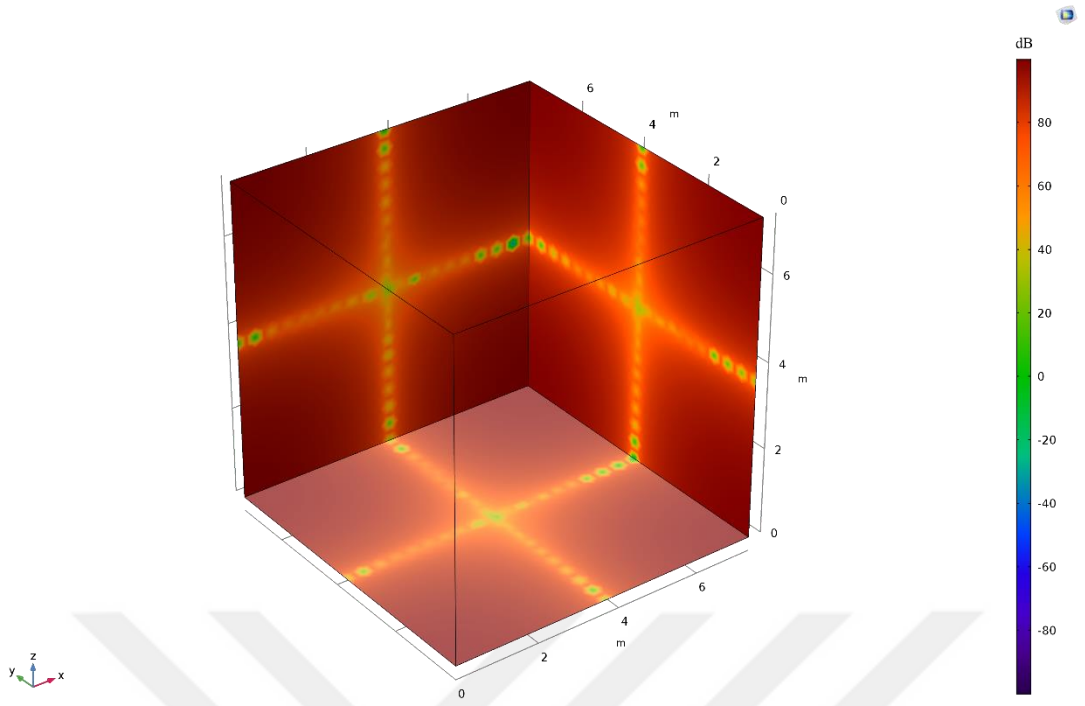
Aksiyel modlar en yüksek enerjiye sahiptir, çünkü en kısa mesafede ve en az yüzeyde yansıma sonucunda oluşurlar. Bir odada teğet modlar, dört yüzeyden yansımalar ve oblik modlar altı yüzeyden yansımalar sonucunda oluşur. Yansımanın artması, yansımadan kaynaklanan enerji kayıplarını arttırır. Aynı şekilde, gidilen mesafe arttıkça, mesafe ile ses basınç seviyesini azalımı artar.

Ses basınç seviyesi temelinde , aksiyel dalgaları 0 dB olarak kabul edersek, teğet dalgalar -3 dB ve oblik dalgalar –6 dB'dir. Mod gücündeki bu fark, önemli akustik özelliklere sahip odalarda daha da belirgin olacaktır. Pratikte, aksiyel modları hesaplamak ve dikkate almak kesinlikle gereklidir. Teğet modlar aksiyel modlardan sonra ikinci derecede en yüksek enerjiye sahiptirler. Eğik (oblik) modlar, küçük odalara, odanın akustik performansına önemli bir katkıda bulunabilecek kadar enerjiye nadiren erişebilirler.

Şekil 4.11, 4.12, 4.13 küp hacmindeki ilk aksiyel, teğet ve oblik modların sırasıyla ses basınç düzeyini gösterir.



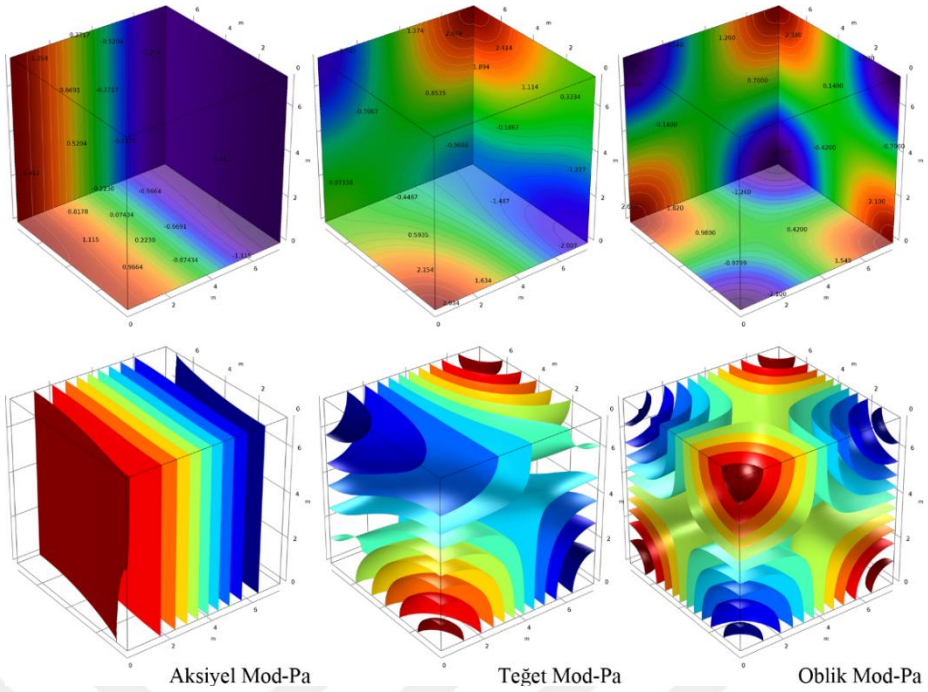
Şekil 4.12 : f_4=32.95 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeylerinde) ses basınç düzeyi (dB).



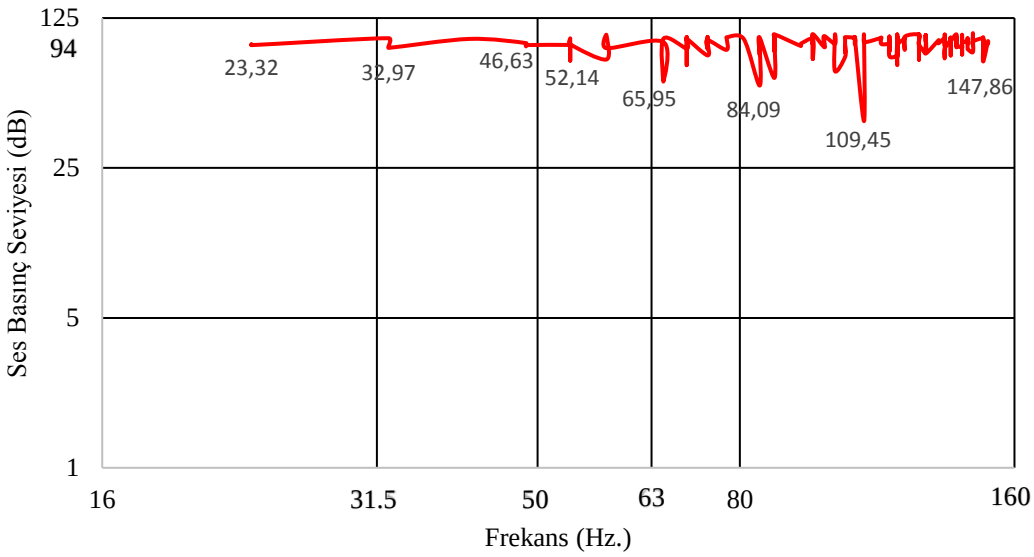
Şekil 4.13 : f_7=40.35 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeylerinde) ses basınç düzeyi (dB).

Küp hacim tüm yüzey oranları içerisinde en kötü modal özelliklere sahiptir. Yüzey boyutları birbirinin tam katı olmasının yansı sıra eşittir. Bu eşitlik oluşan bir aksiyel ve teğet modun üç kere toplamda altı kere ikili olarak tekrarlanması anlamına gelir. Mod sayısının fazla olması ve hacmin orta noktalarında basınç minimumu oluşturması bu hacmin akustik olarak tercih edilmemesi sonucunu doğurur. Ancak modlarının hesaplanması ve yerlerinin belirlenmesi yüzey oranları farklı hacimlere göre daha kolaydır.

Bu durumda küp hacim, modların tespit edilmesi ve tüm frekanslarının belirlenilip hacmin akustik incelemesinin yapılması amacıyla kullanılabilir mi? Bir hacmin önce nötr hale getirilip ardından ihtiyaçları doğrultusunda akustik iyileştirme yapılması yaklaşımı, mod analizinde bir hacmin önce küp biçimine getirilip etkili modlarının tespiti ile bu mod frekanslarına yönelik akustik iyileştirme yaklaşımı geliştirilebilir. Küp hacmin yüzeylerine uygunalabilecek yüzey şekillendirme işlemleri ile ses yayılımı homojen hale getirilebilir ve olay modlar ortadan kaldırılabilir. Modların davranışları konusunda diğer oda hacimleri de incelendikten sonra bu yaklaşımın tutarlılığı ve uygulanabilirliği tekrar tartışılabilir.



Şekil 4.14 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) gösterimleri.



Şekil 4.15 : 1:1:1 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi.

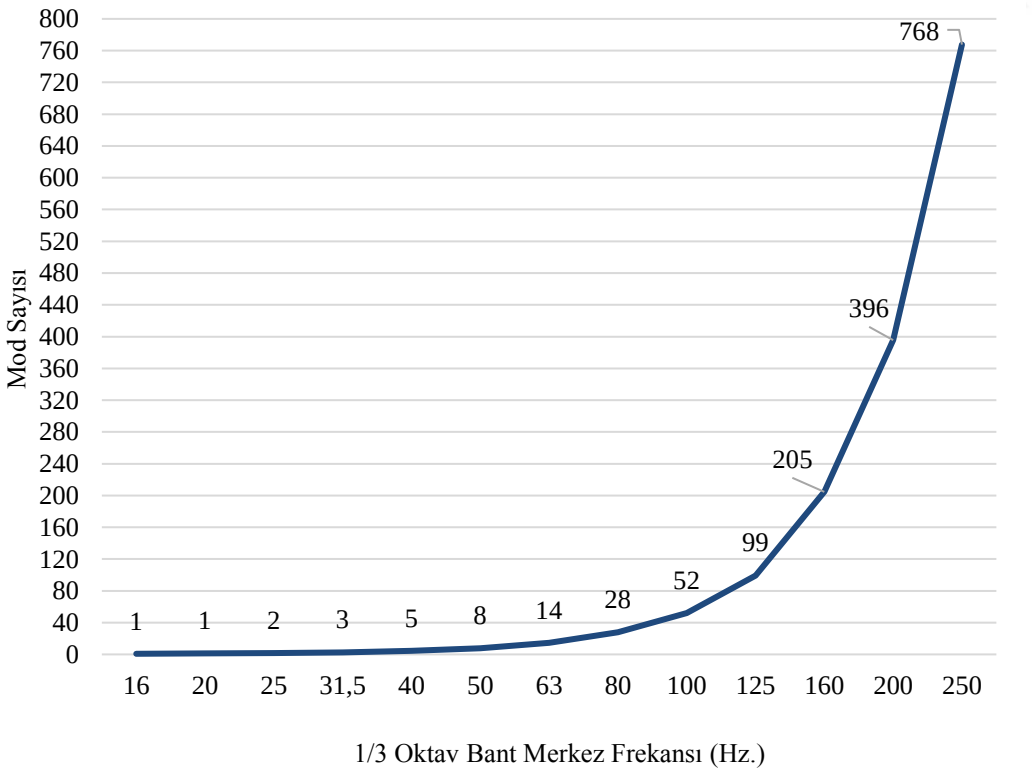
1:1:1 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, ilk aksiyel mod frekansı olan 23.3 Hz. değerinin tam katlarında ses basıncı düzeyinde ani düşüşler oluşturduğu görülür. Spektrum boyunca 16 Hz. ile 63 Hz. arasında oluşan tepe ve vadi noktaları düzensiz ve seyrektir. 63 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 106.33 dB ile 41.21 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir.

4.2.2 Harmonik oranın değerlendirilmesi, 1:2:3

Bu hacmin aksiyel modları denklem 2.6 ile hesaplanmıştır. Hacmin mod sayısı denklem 2.7'ye göre hesaplanır. Modlar arasındaki mesafe denklem 2.8 ile hesaplanır.

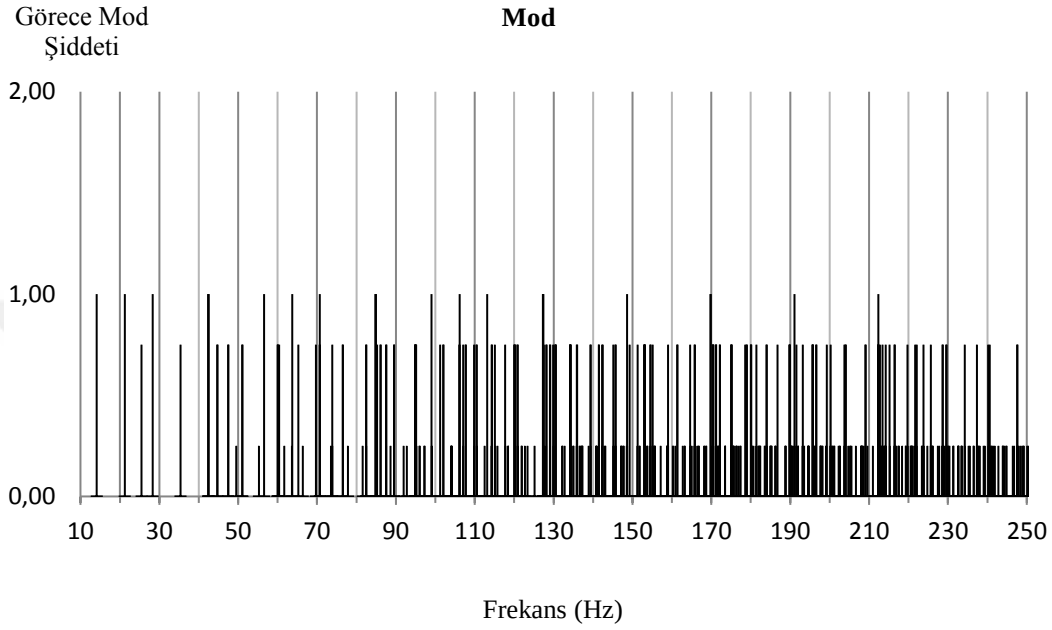
Gilford tarafından ifade edilen mod aralığı kriterine göre aksiyel modlar arasındaki mesafe 20 Hz.'den fazla olmamalıdır. 1:2:3 oranlarına sahip hacimde bu mesafe 7 Hz. olarak hesaplanmaktadır. Bonello kriterleri açısından incelendiğinde modlar arasındaki mesafe; ilgili modun frekansının %5'i kadar olmalıdır. Hacimdeki en düşük frekanslı aksiyel mod için 14.1 x 5/100 = 0.705 Hz. olarak hesaplanır. Yani modlar arasında yaklaşık 1 Hz. kadar mesafe olmalıdır. Olay hacimde frekanslar arasında 7 Hz. mesafe bulunmaktadır. Dikdörtgen prizma şeklindeki hacim Gilford ve Bonello tarafından ifade edilen mod aralığı kriterlerini sağlamamaktadır.

Modal yoğunluk frekans arttıkça artar. Spektrum boyunca mod sayısı Şekil 4.16'da görüldüğü gibi artmaktadır. Hacmin modal yoğunluğu 31.5 Hz.'den sonra düzenli bir artış gösterir. 16 Hz ile 20 Hz arasında modal karakterin sabit olduğu frekansa bağlı olarak artış göstermediği görülmektedir. Düşük frekanslardaki bu durum dışında hacimin spektrum boyunca düzgün bir modal dağılımı mevcuttur.



Şekil 4.16 : 1:2:3 oranlı hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı.

Şekil 4.17 hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarına ait modal yoğunluğunu ve dağılımını göstermektedir. Modların yansımalardan kaynaklı enerji düşüşleri ve farkları üzerinden modların ifadesi için bir ölçek oluşturulmuştur. Modlar düşey eksende farklı görece mod şiddetleri ile ifade edilirler. Aksiyel mod=1, teğet mod=0.75 ve oblik mod=0.25 değeri ile ifade edilir.



Şekil 4.17 : 1:2:3 oranlı hacmin modal yoğunluk grafiği.

Şekil 4.17'deki ve Çizelge 4.6'daki verileri incelersek, sadece bir boyut (eksen) tarafından desteklenen tekil frekanslar mevcuttur. Hacimde yükseklik ekseninin (H) ilk aksiyel modu f_3=42.34 Hz. genişlik ekseninin (W) ikinci aksiyel modu olan f_5=42.34 Hz. ve uzunluk ekseninin üçüncü modu olan f_7=42.31 Hz ile çakışmaktadır. Bu durum oda oranlarının birbirinini sıralı tam katı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu oranlar sonucunda ortaya çıkan bu tür çakışık modlar odanın bu frekans değerinde akustik olarak zayıflamasına sebep olur. Bu odada 42.34 Hz, 84.69 Hz, 127.03 Hz, frekansları akustik olarak sorun oluşturabilecek frekanslardır. Bu frekanslar hacimde birden fazla kez oluşmaktadır. Spektrum boyunca modların dağılımı oldukça (50 Hz. üzerinde) düzgündür. Modlar arasındaki farkın 2,0,0 ile 0,2,0 arasındaki 7 Hz. lik mesafe diğer modlar arasında 14 ve 21 Hz. olarak görülmektedir. Yine boyutların sıralı kat olması dolayısıyla modlar arasındaki mesafe birbirinin katları olarak oluşur. Modların birbirine mesafeleri bakımından hacim Bonello kriterini sağlamamaktadır. Frekansla birlikte artan mod sayısına rağmen hacim modal özellikleri bakımından uygun şartları sağlamaz.

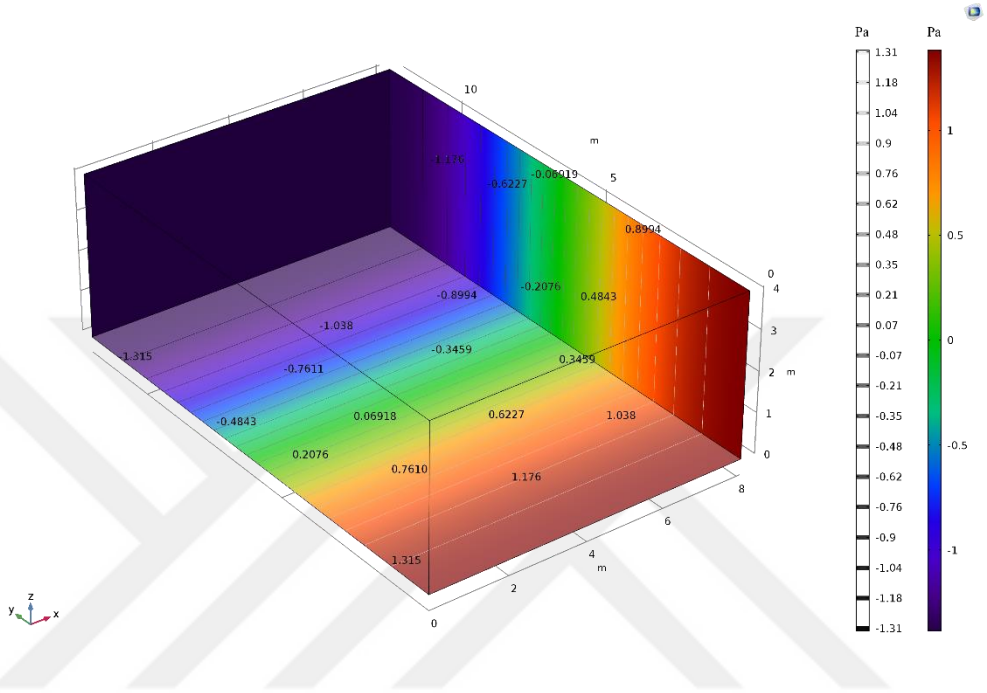
1:2:3 oranlarında ve 12.16:8.10:4.05 m boyuttlarındaki dikdörtgen prizma şeklindeki hacmin aksiyel mod frekansları Çizelge 4.6'da gösterilmektedir.

Hacmin en (W), boy (L), yükseklik (H) boyutlarının ilk aksiyel frekansları sırasıyla f_W=21.17 Hz, f_L=14.10 Hz, f_H=42.34 Hz frekanslarında oluşmaktadır.

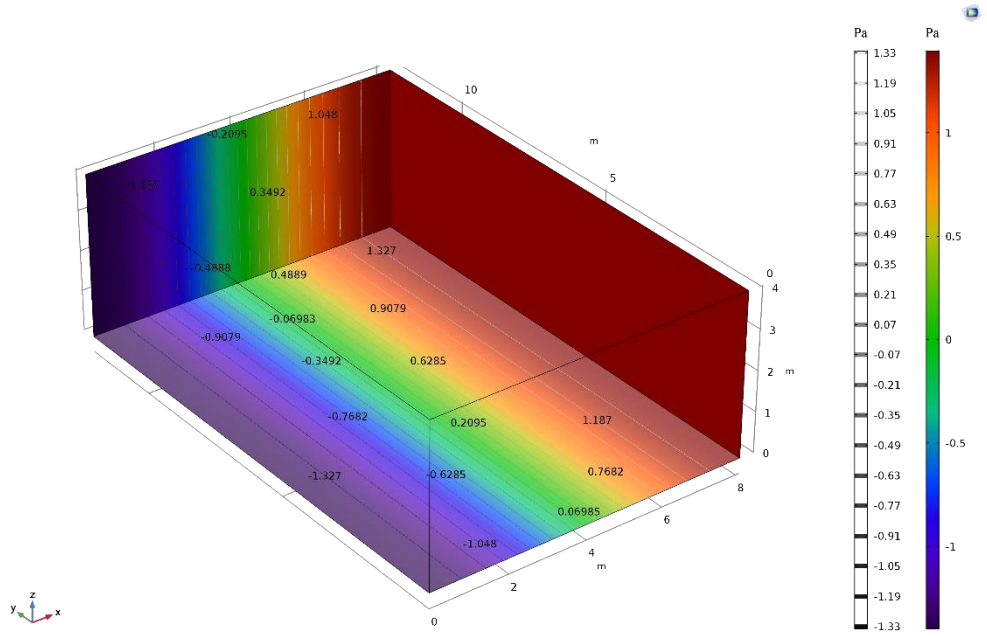
Çizelge 4.6 : 1:2:3 oranlarına sahip hacmin ilk 30 aksiyel mod frekansları

Mod Sayısı	Tam Sayı			Mod Frekansı	Artan Sırada Dizilim	Mod Mesafeleri	Renk.	
	p(L)	q(W)	r(H)				Gilford	Bonell
f_1	1	0	0	14.1036184	14.10361842	7.069221085	-	-
f_2	0	1	0	21.1728395	21.17283951	7.034397336	-	-
f_3	0	0	1	42.345679	28.20723684	14.10361842	-	-
f_4	2	0	0	28.2072368	42.31085526	0.034823749	-	+
f_5	0	2	0	42.345679	42.34567901	0	-	+
f_6	0	0	2	84.691358	42.34567901	14.06879467	-	-
f_7	3	0	0	42.3108553	56.41447368	7.104044834	-	-
f_8	0	3	0	63.5185185	63.51851852	6.999573587	-	-
f_9	0	0	3	127.037037	70.51809211	14.10361842	-	-
f_{10}	4	0	0	56.4144737	84.62171053	0.069647498	-	-
f_{11}	0	4	0	84.691358	84.69135802	0	-	+
f_{12}	0	0	4	169.382716	84.69135802	14.03397092	-	-
f_{13}	5	0	0	70.5180921	98.72532895	7.138868583	-	-
f_{14}	0	5	0	105.864198	105.8641975	6.964749838	-	-
f_{15}	0	0	5	211.728395	112.8289474	14.10361842	-	-
f_{16}	6	0	0	84.6217105	126.9325658	0.104471248	-	+
f_{17}	0	6	0	127.037037	127.037037	0	-	+
f_{18}	0	0	6	254.074074	127.037037	13.99914717	-	-
f_{19}	7	0	0	98.7253289	141.0361842	7.173692333	-	-
f_{20}	0	7	0	148.209877	148.2098765	21.17283951	+	-
f_{21}	0	0	7	296.419753	169.382716	0	-	+
f_{22}	8	0	0	112.828947	169.382716	21.17283951	+	-
f_{23}	0	8	0	169.382716	190.5555556	21.17283951	+	-
f_{24}	0	0	8	338.765432	211.7283951	0	-	+
f_{25}	9	0	0	126.932566	211.7283951	42.34567901	+	-
f_{26}	0	9	0	190.555556	254.0740741	42.34567901	+	-
f_{27}	0	0	9	381.111111	296.4197531	42.34567901	+	-
f_{28}	10	0	0	141.036184	338.7654321	42.34567901	+	-
f_{29}	0	10	0	211.728395	381.1111111	42.34567901	+	-
f_{30}	0	0	10	423.45679	423.4567901			

Hacmin ilk aksiyel modu f_1=14.1 Hz de oluşmaktadır. Boyutlar birbirinin sıralı dizi katları olduğundan modlar arasında bir kat ilişkisi vardır. Modlar n=7 asal sayısının katları ile ilişkilidirler. Plan düzleminde, karşılıklı xz yüzeyleri arasında oluşan birinci aksiyel mod ile yz yüzeyleri arasında oluşan ikinci aksiyel mod Şekil 4.18'de ve Şekil 4.19'da, 3 boyutlu görseli Şekil 4.20'de ve Şekil 4.21'de gösterilmektedir.

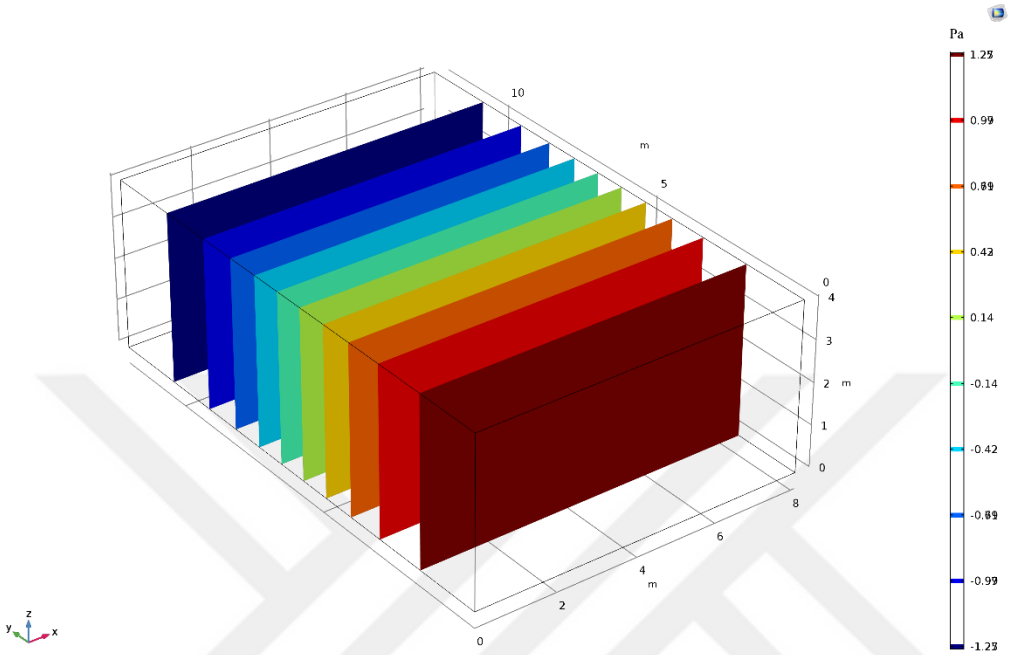


Şekil 4.18 : Plan düzleminde oluşan birinci aksiyel mod (xz yüzeyleri) f_1=14.1 Hz. in ses basıncı (Pa).

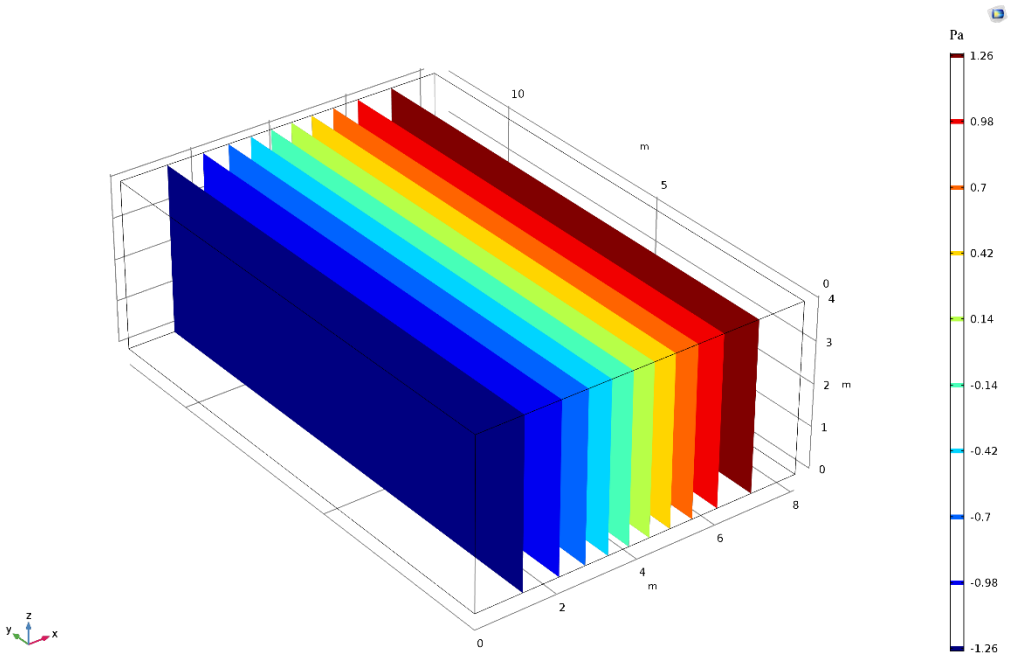


Şekil 4.19 : Plan düzleminde oluşan ikinci aksiyel mod (yz yüzeyleri) f_2=21.1 Hz. in ses basıncı (Pa).

Şekil 4.18'de ve Şekil 4.20'de gösterilen mod hacmin xz (en) ekseninde oluşmaktadır. Hacmin kenarlarına paralel mod maksimumu okunmakta, hacmin ortasında ise mod minimumu gözlenmektedir. Ses yayılımının eşit olmadığı ve basınç farkının hacmin ortasında kenarlar doğru oluştuğu gözlemlenir.



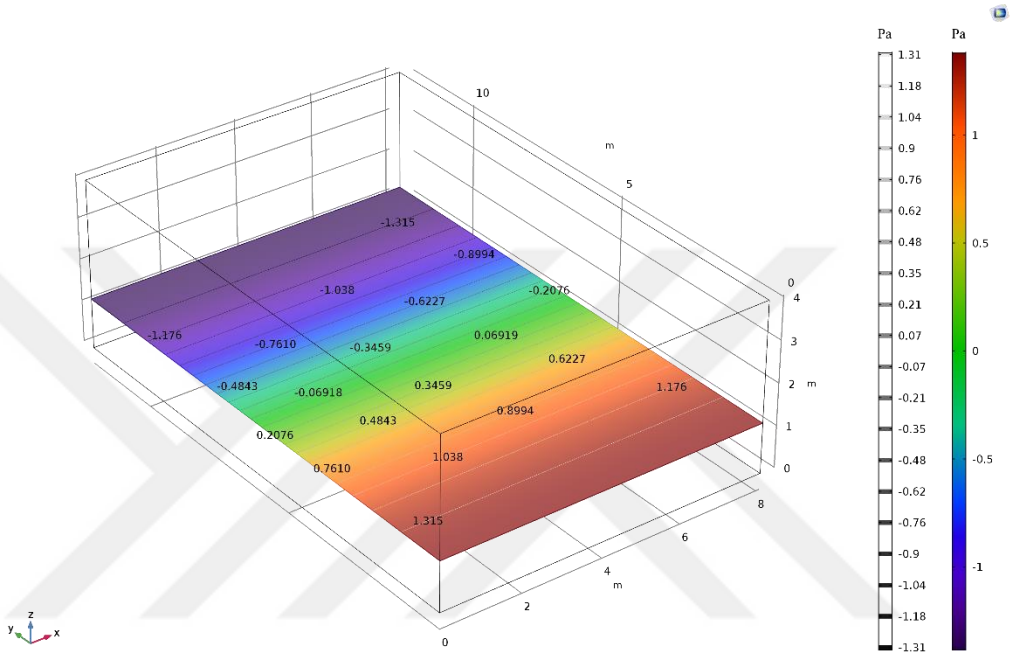
Şekil 4.20 : f_1=14.1 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).



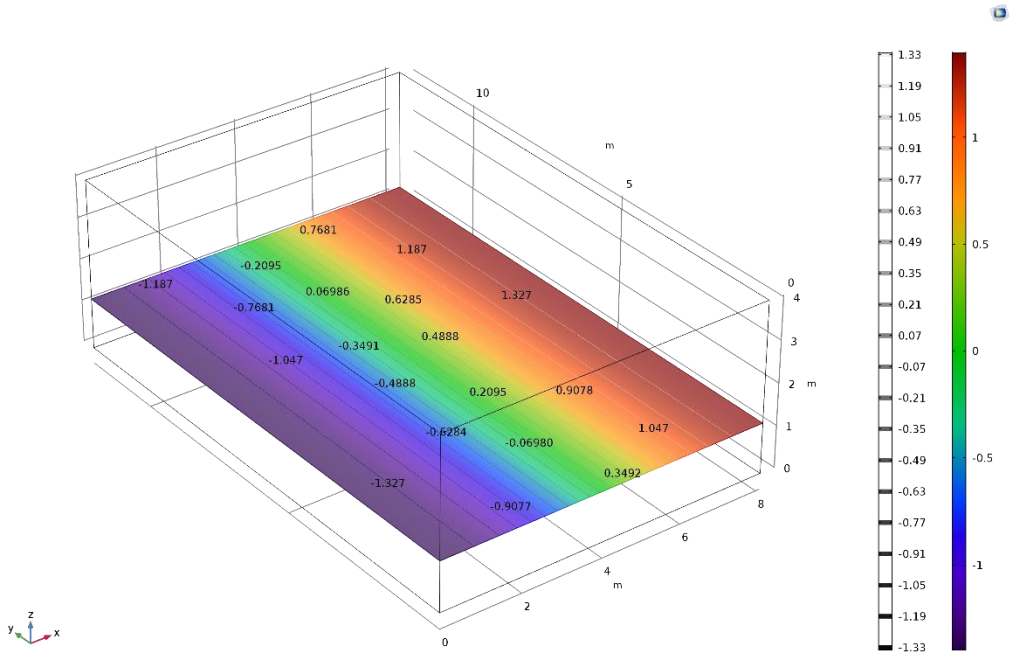
Şekil 4.21 : f_2=21.1 Hz. aksiyel modunun (yz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).

Şekil 4.19 ve Şekil 4.21'de hacmin yz (boy) ekseni üzerinde oluşan ikinci aksiyel modu gösterir. Birinci modun dağılımında gözlenen durum, hacmin ortasında basınç minimumu oluşumu bu modda da gözlemlenir. İki mod farazi olarak kesiştirildiğinde hacmin tam orta noktasında 0 basınç alanı oluşur.

Modun h=1.2 m farazi alıcı konumu düzlemindeki ses basınç değerleri Şekil 4.22'de gösterilmektedir.



A



B

Şekil 4.22 : f_1=14.1 Hz. aksiyel modunun (A) ve f_2=21.1 Hz. aksiyel modunun (B) h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu.

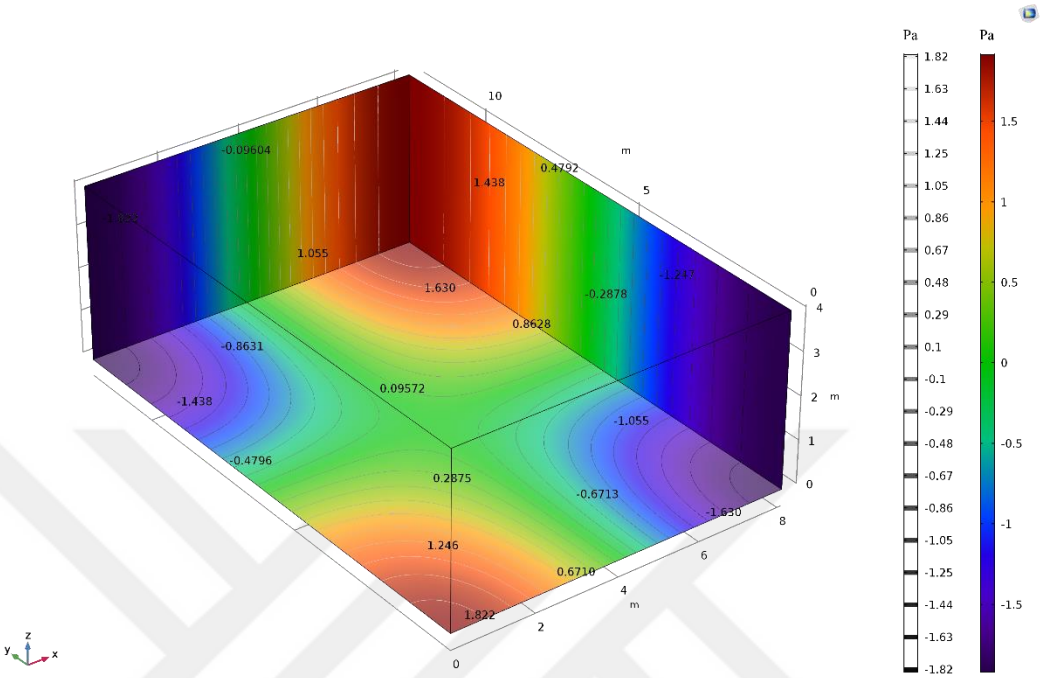
Şekil 4.20 sadece Şekil 4.19'un ifadesinde kullanılan renklerin bir dilimlenme halini ifade eder. Yükseklik eksenindeki (z ekseni) ses basınç değerlerini ifade etmez.

1:2:3 oranlarındaki hacmin, aksiyel, teğet ve oblik mod frekansları Çizelge 4.7'de gösterilmektedir.

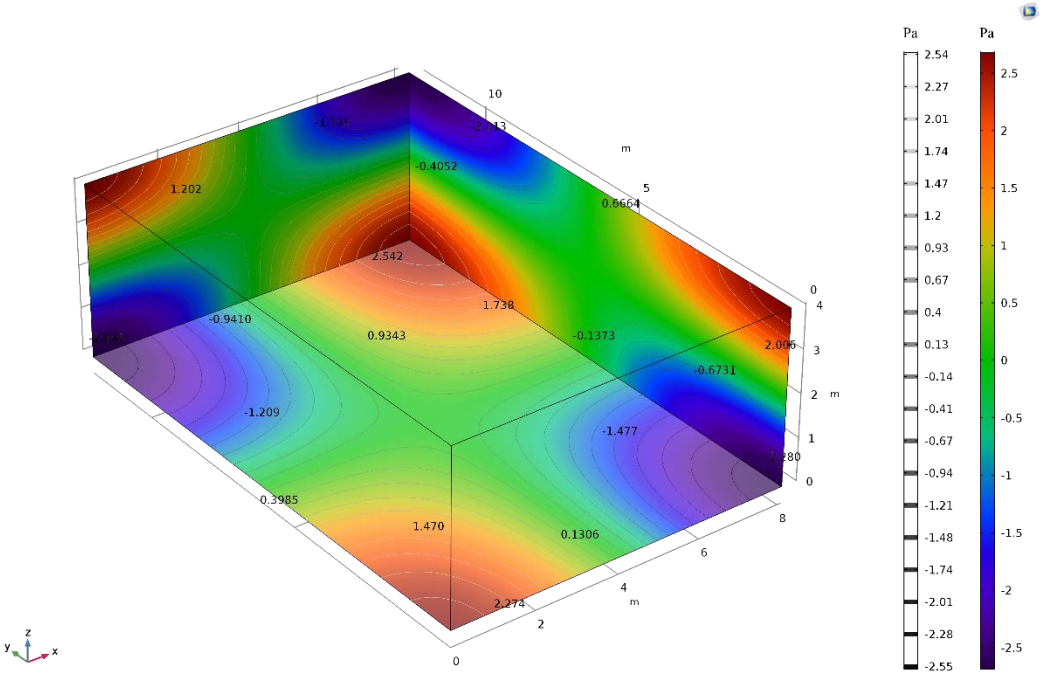
Çizelge 4.7 : 1:2:3 oranlarına sahip hacmin ilk 4 aksiyel,teğet ve oblik mod frekansları.

Mod Sayısı	Tam Sayı			Mod Frekansı	Artan Sırada Dizilim	Mod Mesafeleri	Renk.	
	p(L)	q(W)	r(H)				Gilford	Bonello
f_1	1	0	0	14.1036184	14.10361842	7.069221085		-
f_2	0	1	0	21.1728395	21.17283951	4.267309576		-
f_3	0	0	1	42.345679	25.44014908	2.76708776		-
f_4	1	1	0	25.4401491	28.20723684	14.10361842		-
f_5	0	1	1	47.3439084	42.31085526	0.034823749		+
f_6	1	0	1	44.6325955	42.34567901	0		+
f_7	1	1	1	49.3999769	42.34567901	2.286916516		-
f_8	2	0	0	28.2072368	44.63259553	2.711312884		-
f_9	0	2	0	42.345679	47.34390841	2.056068474		-
f_{10}	0	0	2	84.691358	49.39997689	1.480321278		-
f_{11}	2	2	0	50.8802982	50.88029816	5.53417552		-
f_{12}	0	2	2	94.6878168	56.41447368	7.104044834		-
f_{13}	2	0	2	89.2651911	63.51851852	6.999573587		-
f_{14}	2	2	2	98.7999538	70.51809211	5.802355141		-
f_{15}	3	0	0	42.3108553	76.32044725	8.30126328		-
f_{16}	0	3	0	63.5185185	84.62171053	0.069647498		+
f_{17}	0	0	3	127.037037	84.69135802	0		+
f_{18}	3	3	0	76.3204472	84.69135802	4.573833032		-
f_{19}	0	3	3	142.031725	89.26519106	5.422625769		-
f_{20}	3	0	3	133.897787	94.68781682	4.037512122		-
f_{21}	3	3	3	148.199931	98.72532895	0.074624825		+
f_{22}	4	0	0	56.4144737	98.79995377	2.960642557		+
f_{23}	0	4	0	84.691358	101.7605963	4.103601202		+
f_{24}	0	0	4	169.382716	105.8641975	6.964749838		-
f_{25}	4	4	0	101.760596	112.8289474	14.10361842		-
f_{26}	0	4	4	189.375634	126.9325658	0.104471248		+
f_{27}	4	0	4	178.530382	127.037037	0		+
f_{28}	4	4	4	197.599908	127.037037	0.163708374		+

Tüm aksiyel, teğet ve oblik modlar hacim, birbirinin tam katı oranlara sahip olduğundan birbirleri ile ilişkilidir. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 hacmin ilk teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modunu gösterir.

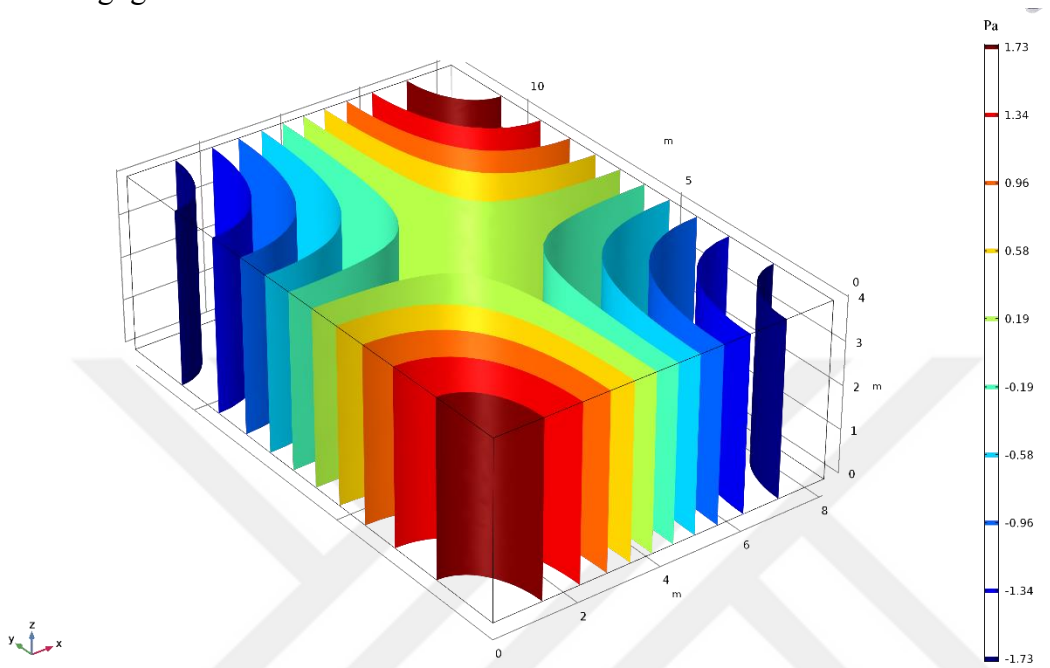


Şekil 4.23 : f_4=25.44 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

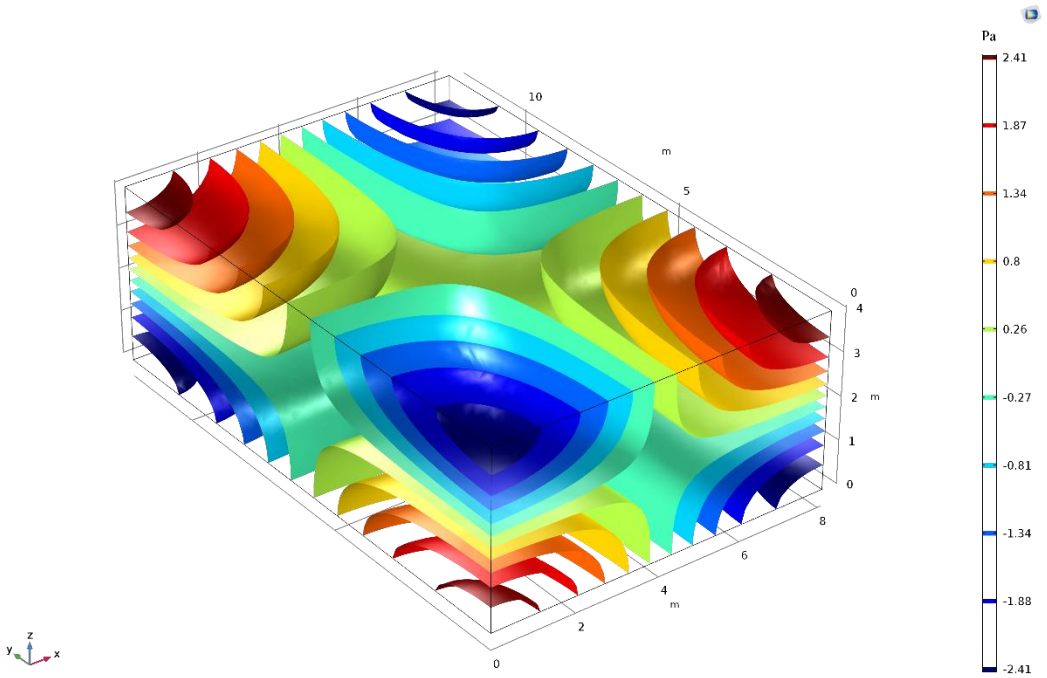


Şekil 4.24 : f_7=49.39 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 hacmin ilk teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modunun 3 boyutlu gösterimidir. 4 duvar yüzeyini dolaşan dalganın oluşturduğu ses yayılımının tabana da etkisi olmaktadır. Duvar yüzeylerinin kendi içinde ses basıncının yayılımını görüyoruz. 4 köşe birleşiminde ses basıncının yükseldiği görülmektedir.



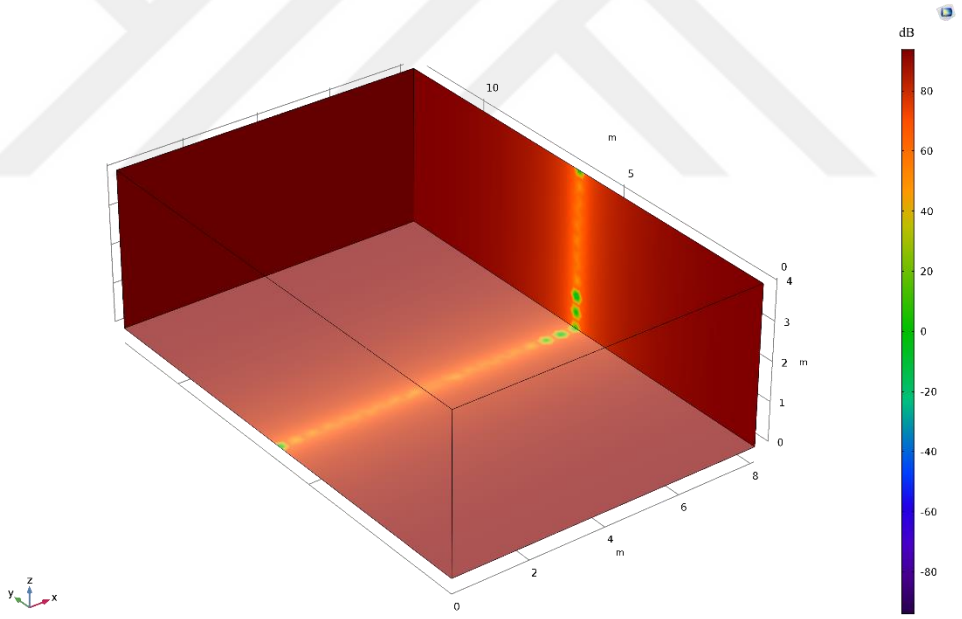
Şekil 4.25 : f_4=25.44 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).



Şekil 4.26 : f_7=49.39 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).

Hacmin köşe noktalarında ve yüzeylerinde oluşan basınç minimumu ve maksimumu noktaları ses yayılımının düzgün olmadığını göstermektedir. Köşegen üzerindeki karşılıklı köşeler basınç maksimumu oluşurken bu köşelerin arasında kalan yüzeyin orta noktasında köşelerde basınç minimumu oluşmaktadır.

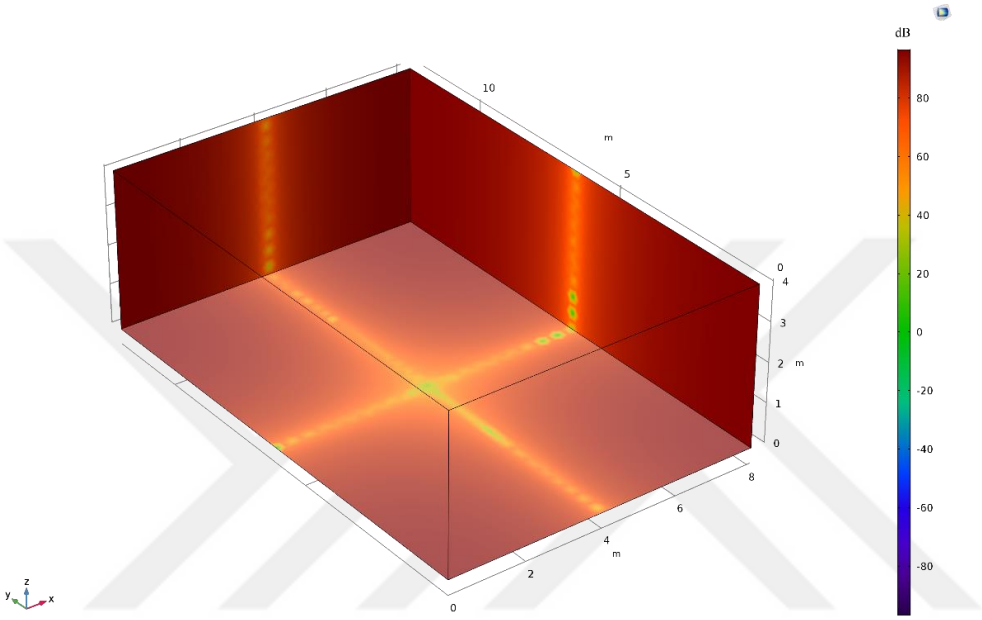
Üç yüzeyin katılımı ile köşede f_7=49.39 Hz. frekansında oblik mod oluşur. Köşeyi tam kapsayan bir görünümdedir. Tüm modlar birlikte düşünüldüğünde hacmin merkezinde bir 0 basınç noktası oluştuğu görülür. Bu noktanın merkezde oluşmasının sebebi hacmin oranlarının birbirinin tamsayı katları olmasıdır. Hacim sürekli olarak belirli bir asal sayının katlarındaki dizi frekanslarda rezonansa girmekte ve durağan dalgalar üretmektedir. Bu durum hacmin tüm yüzeylerinin üzerinde görülür. Bu tip bir hacmin kullanıldığı varsayılır ise merkezde bir dinleyici olacağı tahmin edilebilir ve bu dinleyici sesi iyi bir şekilde algılayamayacaktır. Aksiyel modlar karşılıklı duvar çifti yüzeylerde, teğet modlar birbirine dik açılı duvar çifti yüzeylerin köşe kesişimlerinde, oblik modlar birbirine dik açılı üç yüzeyin köşe kesişiminde oluşur.



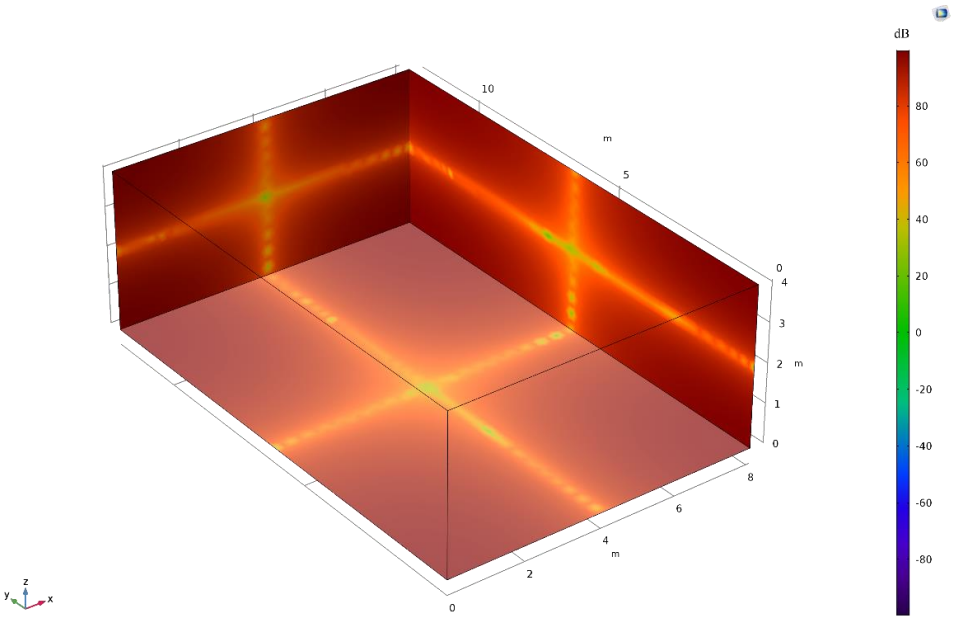
Şekil 4.27 : f_1=14.1 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).

Şekil 4.27, 4.28, 4.29 hacmindeki ilk aksiyel, teğet ve oblik modların sırasıyla ses basınç düzeyini gösterir. Desibel cinsinden ses basınç düzeyi üzerinden ifade edilir ise; f_1=14.1 aksiyel modu hacmin uzun kenarının orta noktasından kısa kenara paralel uzanan bir 0 basınç çizgisi oluşturur. f_2=21.1 aksiyel modu kısa kenarın orta noktasından uzun kenara paralel uzanan bir 0 basınç çizgisi oluşturur. f_4=25.44 teğet

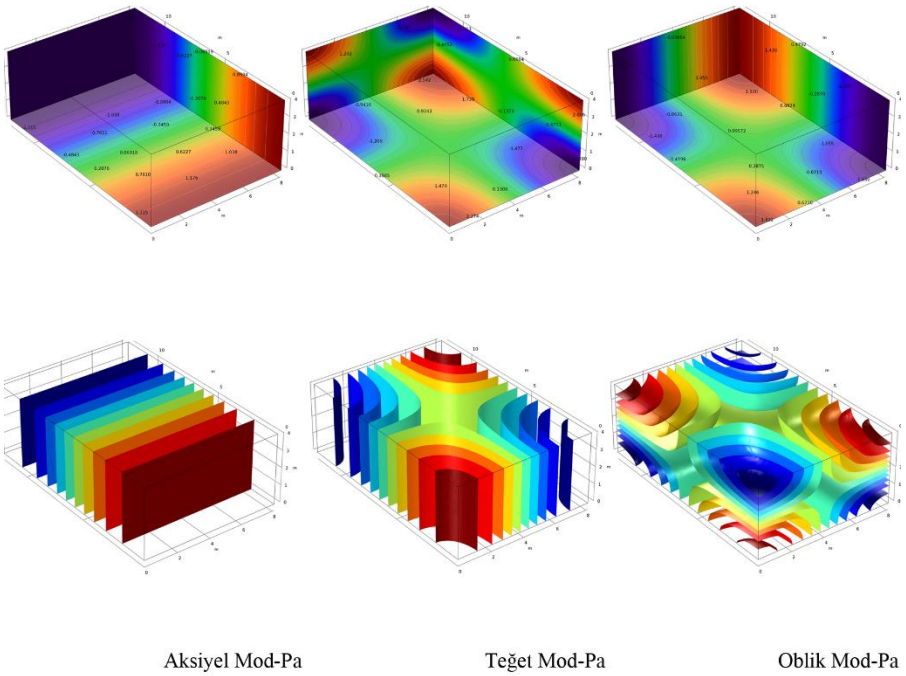
modu birinci ve ikinci aksiyel modların aynı düzlemde kesişimi biçiminde, kısa ve uzun kenarların orta noktalarından; kısa ve uzun kenarlara paralel iki adet 0 basınç çizgisi oluşturur. Bu çizgiler hacmin merkez noktasında kesişir. f_7=49.39 oblik modu tüm yüzeylerin en ve boy çizgilerine paralel ve orta noktalarında kesişen ve bunu hacmim üç yüzeyinde de tekrar eden bir 6 adet 0 basınç çizgisi oluşturur. Bu çizgiler üzerindeki basınç dağılımı yüzey merkezlerinden kenarlarına doğru artan basınç şeklindedir.



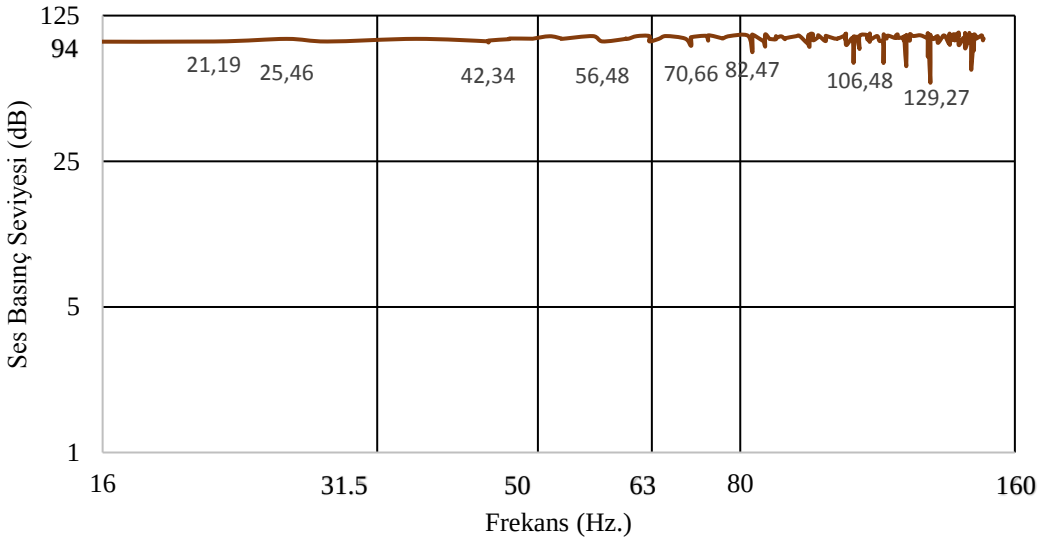
Şekil 4.28 : f_4=25.44 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).



Şekil 4.29 : f_7=49.39 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).



Şekil 4.30 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) gösterimleri.



Şekil 4.31 : 1:2:3 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi.

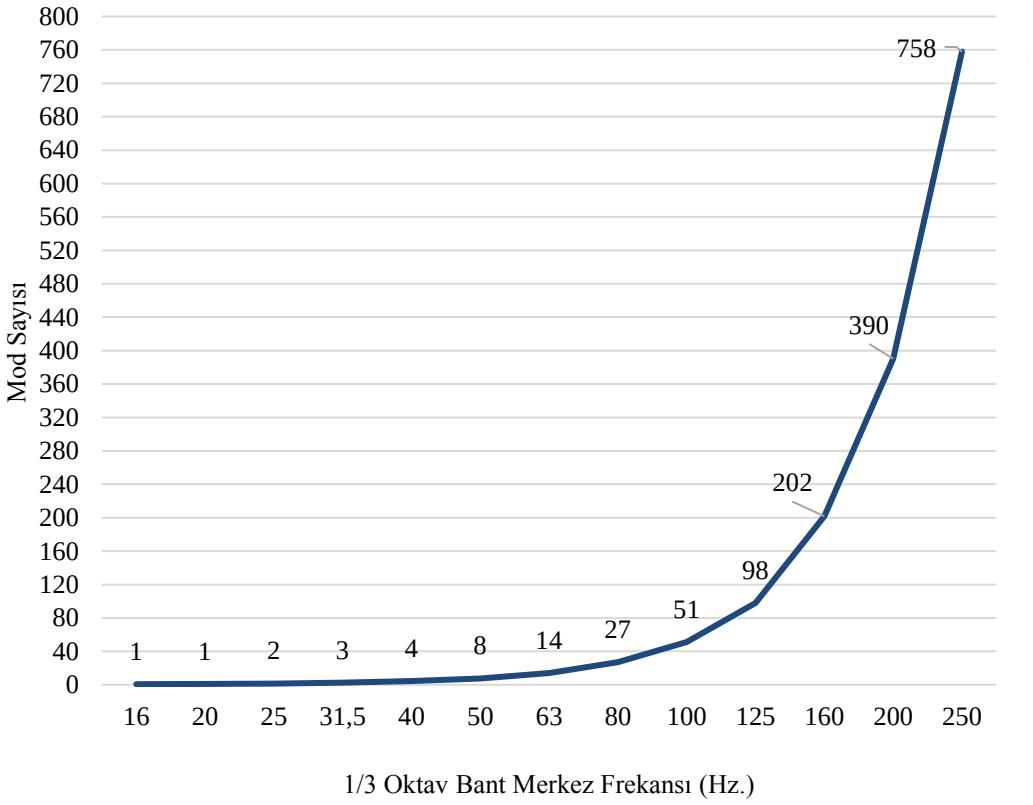
1:2:3 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekans değerlerinde vadi ve tepe noktaları oluşturmaz. 40 Hz. üzerinde ses basınç düzeyinin tepe ve vadiler oluşturduğu görülür. Spektrum boyunca 16 Hz. ile 50 Hz. arasında oluşan tepe ve vadi noktaları düze yakın bir seyirdedir. 63 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır ve tepe ve vadi noktaları daha belirgin olmaktadır. Frekans tepki eğrisi küp hacme göre nispeten daha düzenlidir. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 99.19 dB ile 59.49 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir.

4.2.3 Altın oranın değerlendirilmesi, 1:1.26:1.6

Bu hacmin aksiyel modları denklem 2.6 ile hesaplanmıştır. Hacmin mod sayısı denklem 2.7'ye göre hesaplanır. Modlar arasındaki mesafe denklem 2.8 ile hesaplanır.

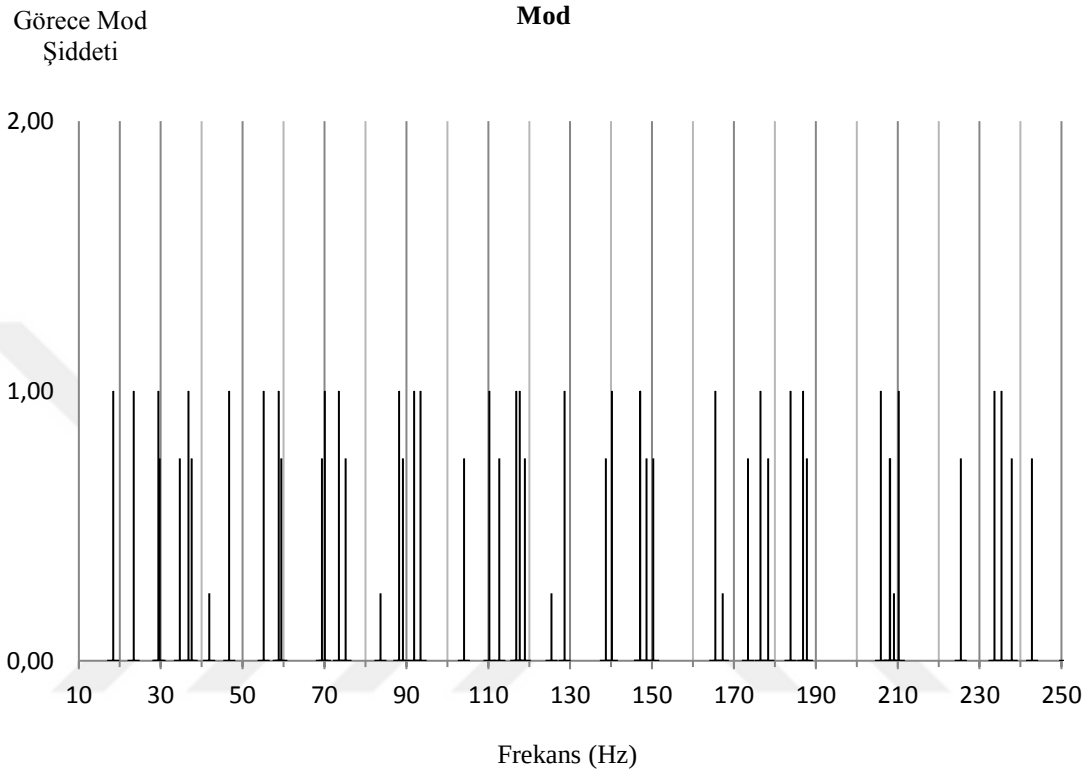
Gilford tarafından ifade edilen mod aralığı kriterine göre aksiyel modlar arasındaki mesafe 20 Hz.'den fazla olmamalıdır. 1:2.26:1.6 oranlarına sahip hacimde bu mesafe 4 Hz.ile 29 Hz. arasında frekanslara göre değişen bir skalada hesaplanmaktadır. Bonello kriterleri açısından incelendiğinde modlar arasındaki mesafe; ilgili modun frekansının %5'i kadar olmalıdır. Hacimdeki en düşük frekanslı aksiyel mod için bu 18.38 x 5/100 = 0.919 Hz. olarak hesaplanır. Yani modlar arasında yaklaşık 1 Hz. kadar mesafe olmalıdır. Olay hacimde frekanslar arasında 4 Hz. mesafe bulunmaktadır. Dikdörtgen prizma şeklindeki hacim Gilford ve Bonello tarafından ifade edilen mod aralığı kriterlerini sağlamamaktadır.

Modal yoğunluk frekans arttıkça artar. 16 Hz ve 20 Hz frekansları arasındaki sabit seyir dışında frekans arttıkça artmaktadır. Frekansa bağlı mod sayısı Şekil 4.32'de görülmektedir. Hacmin modal yoğunluğu 25 Hz.'den sonra düzenli bir artış gösterir.



Şekil 4.32 : 1:2.26:1.6 oranlı hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı.

Şekil 4.33 hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarına ait modal yoğunluğunu ve dağılımını göstermektedir. Modların yansımalardan kaynaklı enerji düşüşleri ve farkları üzerinden modların ifadesi için bir ölçek oluşturulmuştur. Modlar düşey eksende farklı görece mod şiddetleri ile ifade edilirler. Aksiyel mod=1, teğet mod=0.75 ve oblik mod=0.25 değeri ile ifade edilir.



Şekil 4.33 : 1:2.26:1.6 oranlı hacmin modal yoğunluk grafiği.

Şekil 4.33'teki ve Çizelge 4.8'deki verileri incelersek, sadece bir boyut (eksen) tarafından desteklenen tekil frekanslar mevcuttur. Hacimde tüm eksenlerin frekansları birbirinden farklı olarak oluşur. Bu durum oda oranlarının birbirinin tam katı olmamasından kaynaklanır. Spektrum boyunca modların dağılımı düzensizdir. Spektrum grafiği belirli frekanslarda sıklaşırken belirli frekans aralıklarında hiç mod göstermez ve seyrelir. Frekans bölgelerindeki modlar kendi içerisinde 2 veya 3'lü gruplar olarak birbirine yakın oluşur. Ancak bu grupların birbirleri ile arasındaki mesafeler oldukça fazladır. Modlar arasındaki mesafe 30 Hz ile 210 Hz arasında azdır. 30 Hz frekans bölgesinde f_3=29.41 Hz ve f_4=29.72 Hz modları birbirine çok yakındır. Spektrum boyunca modlar arası mesafe düzensizlik gösterir. 70 Hz ve 110 Hz frekans bölgelerinde birbirine çok yakın modlar gözlemlenirken, 60-70 Hz, 90-110 Hz, 190-210 Hz frekans aralıklarında büyük boşluklar görülür. Modların birbirine mesafeleri

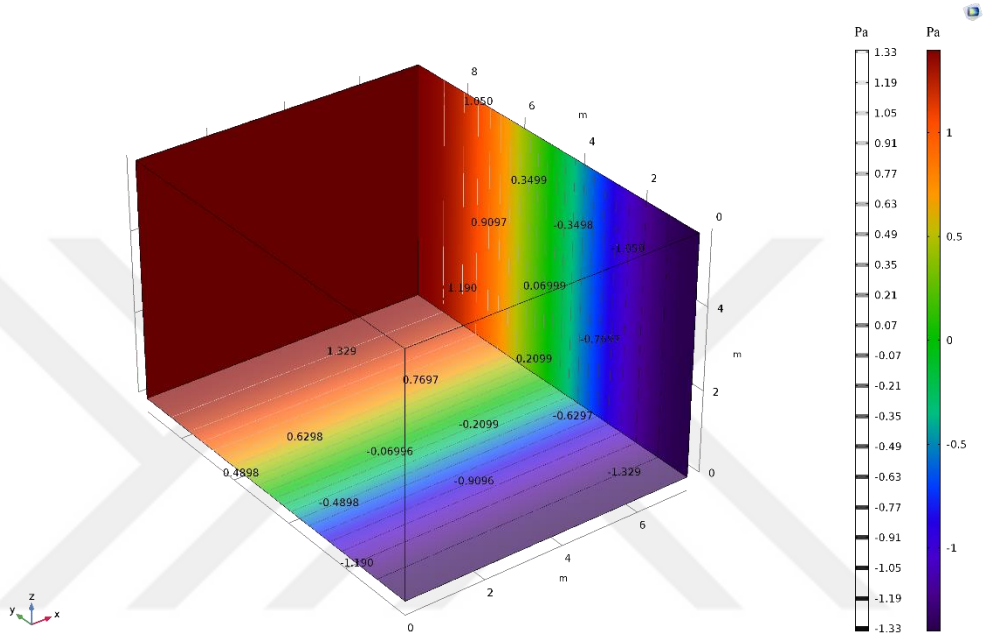
bakımından hacim Bonello kriterini sağlamamaktadır. Frekansla birlikte artan mod sayısına rağmen hacim modal özellikleri bakımından uygun şartları sağlamaz.

1:2.26:1.6 oranlarındaki dikdörtgen prizma şeklindeki hacmin aksiyel mod frekansları Çizelge 4.8'de gösterilmektedir.

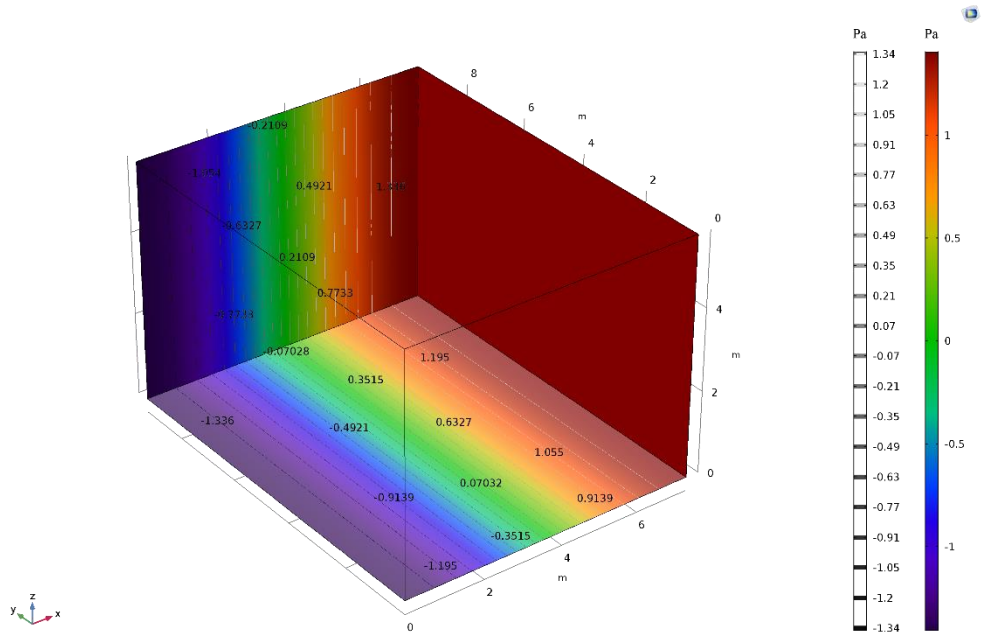
Çizelge 4.8 : 1:2.26:1.6 oranlarına sahip hacmin ilk 30 aksiyel mod frekansları

Mod Sayısı	Tam Sayı			Mod Frekansı	Artan Sırada Dizilim	Mod Mesafeleri	Renk.	
	p(L)	q(W)	r(H)				Gilford	Bonello
f_1	1	0	0	18.3815648	18.38156484	4.983557771	-	-
f_2	0	1	0	23.3651226	23.36512262	6.05168699	-	-
f_3	0	0	1	29.4168096	29.41680961	7.346320084	-	-
f_4	2	0	0	36.7631297	36.76312969	9.967115542	-	-
f_5	0	2	0	46.7302452	46.73024523	8.414449302	-	-
f_6	0	0	2	58.8336192	55.14469453	3.688924677	-	-
f_7	3	0	0	55.1446945	58.83361921	11.26174864	-	-
f_8	0	3	0	70.0953678	70.09536785	3.430891531	-	+
f_9	0	0	3	88.2504288	73.52625938	14.72416944	-	-
f_{10}	4	0	0	73.5262594	88.25042882	3.657395406	-	+
f_{11}	0	4	0	93.4604905	91.90782422	1.55266624	-	+
f_{12}	0	0	4	117.667238	93.46049046	16.8288986	-	-
f_{13}	5	0	0	91.9078242	110.2893891	6.536224011	-	-
f_{14}	0	5	0	116.825613	116.8256131	0.841625343	-	+
f_{15}	0	0	5	147.084048	117.6672384	11.00371549	-	-
f_{16}	6	0	0	110.289389	128.6709539	11.51978178	-	-
f_{17}	0	6	0	140.190736	140.1907357	6.861783062	-	+
f_{18}	0	0	6	176.500858	147.0525188	0.031529271	-	+
f_{19}	7	0	0	128.670954	147.084048	16.47181028	-	-
f_{20}	0	7	0	163.555858	163.5558583	1.878225291	-	+
f_{21}	0	0	7	205.917667	165.4340836	11.06677403	-	-
f_{22}	8	0	0	147.052519	176.5008576	7.314790813	-	+
f_{23}	0	8	0	186.920981	183.8156484	3.105332481	-	+
f_{24}	0	0	8	235.334477	186.9209809	18.99668631	-	-
f_{25}	9	0	0	165.434084	205.9176672	4.368436304	-	+
f_{26}	0	9	0	210.286104	210.2861035	23.36512262	+	-
f_{27}	0	0	9	264.751286	233.6512262	1.683250686	-	+
f_{28}	10	0	0	183.815648	235.3344768	29.41680961	+	-
f_{29}	0	10	0	233.651226	264.7512864	29.41680961		
f_{30}	0	0	10	294.168096	294.1680961			

Hacmin ilk aksiyel modu f_1=18.38 Hz de oluşmaktadır. Hacmin karşılıklı uzun kenarları (boy ekseni) arasında ilk mod oluşmaktadır. Plan düzleminde, karşılıklı xz yüzeyleri arasında oluşan birinci aksiyel mod ile yz yüzeyleri arasında oluşan ikinci aksiyel mod Şekil 4.34'te ve Şekil 4.35'te, 3 boyutlu görseli Şekil 4.36'da ve Şekil 4.37'de gösterilmektedir. Şekil 4.34'te gösterim basınç değeri (Pa) üzerinden, minimum (0 Pa) ve maksimum (1 Pa) olarak ifade edilir. Eksi basınç değerleri hacmin orta ekseni orjin kabul edildiğinde basıncın konumunun zıt yönde olduğunu ifade eder.

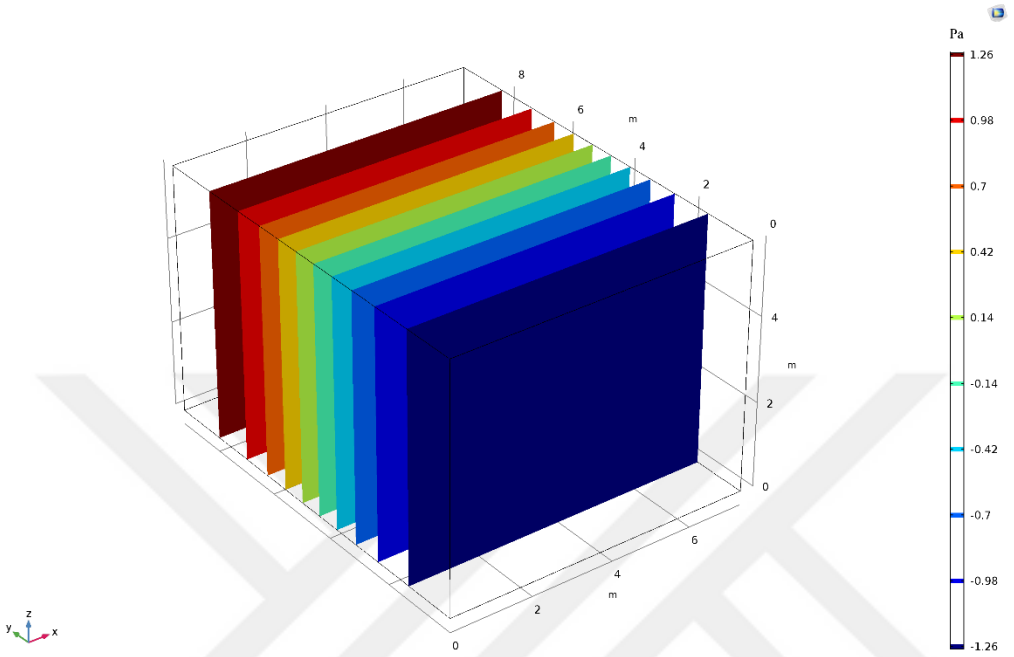


Şekil 4.34 : Plan düzleminde oluşan birinci aksiyel mod (xz yüzeyleri) f_1=18.38 Hz. in ses basıncı (Pa).

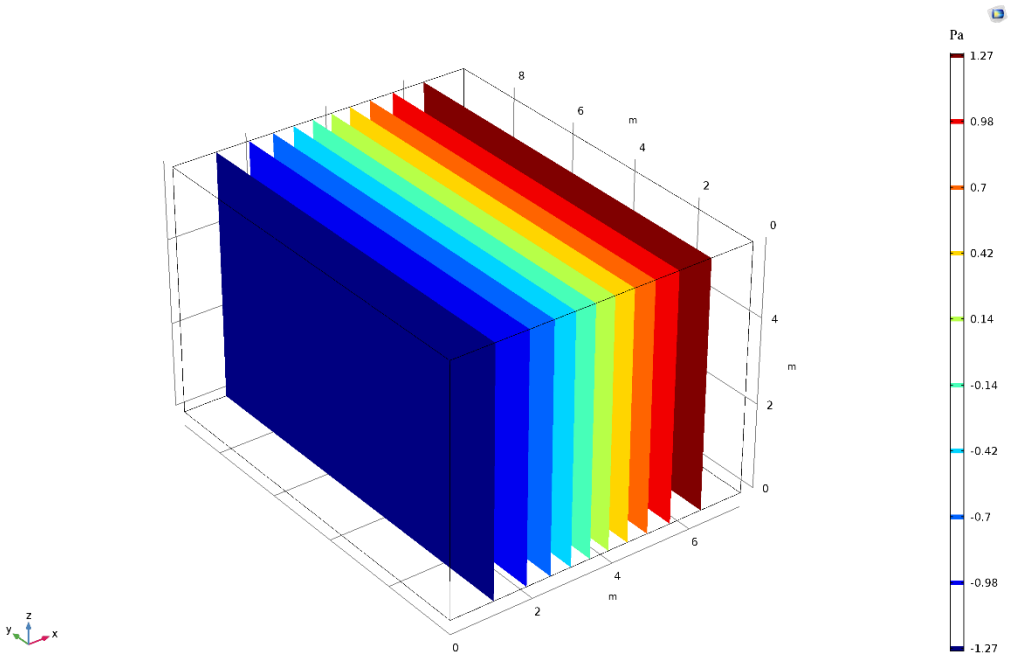


Şekil 4.35 : Plan düzleminde oluşan ikinci aksiyel mod (yz yüzeyleri) f_2=23.36 Hz. in ses basıncı (Pa).

Şekil 4.34'te ve Şekil 4.36'da gösterilen mod hacmin boy ekseninde oluşmaktadır. Hacmin kısa kenarına paralel mod basınç dağılımı gözlenir. Hacmin en eksenine paralel olarak oluşan ses basıncı merkezden kenarlara doğru artan bir basınç gösterir. Merkezde basınç minimumu kenarlarda basınç maksimumu oluşturur.



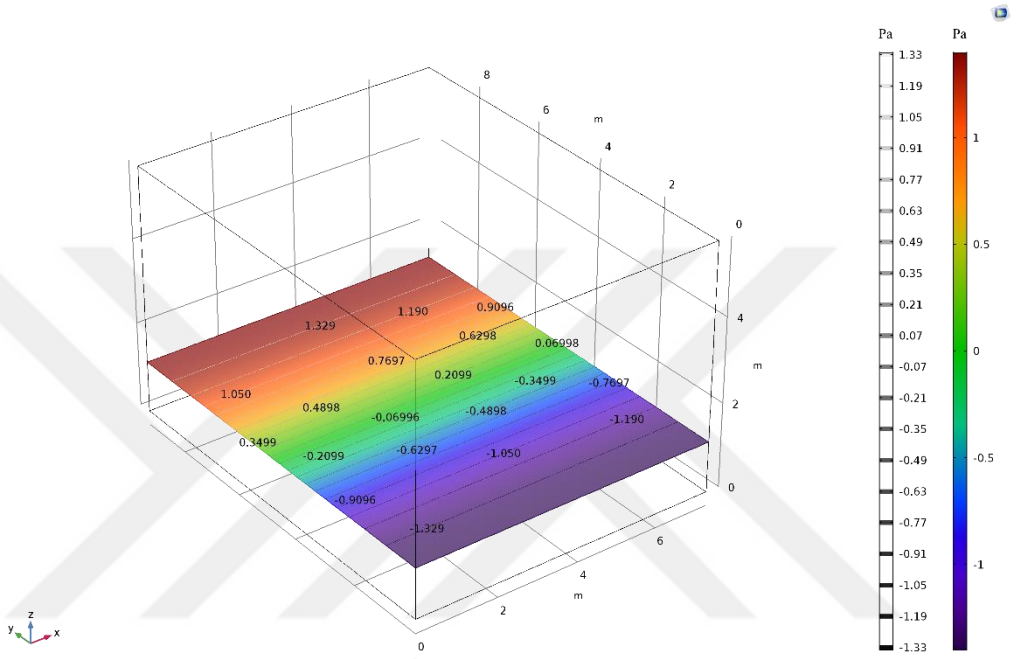
Şekil 4.36 : f_1=18.38 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).



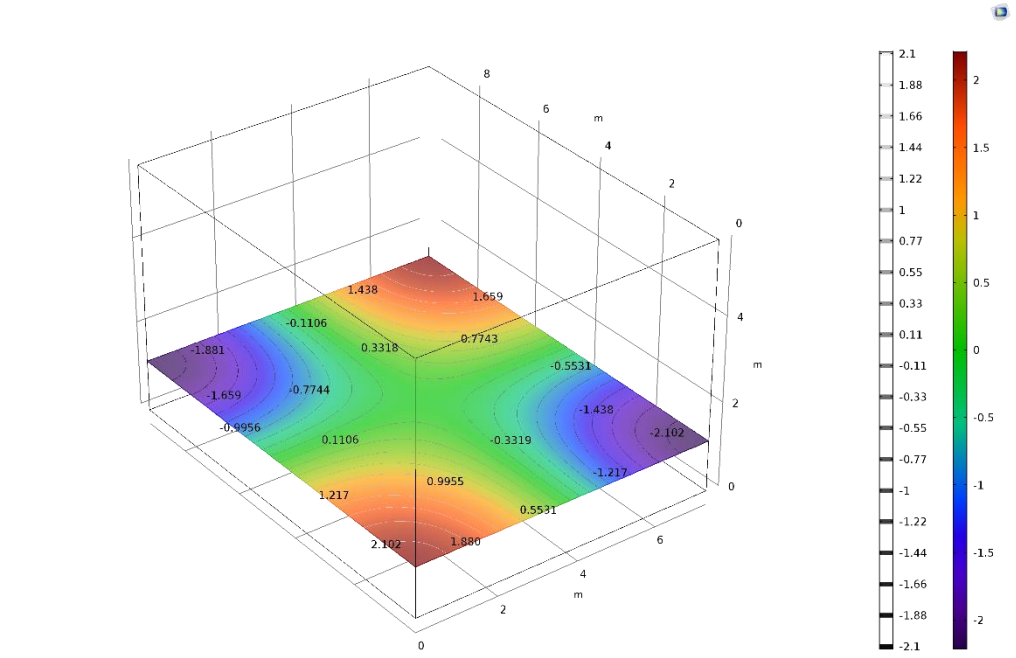
Şekil 4.37 : f_2=23.36 Hz. aksiyel modunun (yz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).

Şekil 4.35 ve Şekil 4.36 hacmin en ekseni üzerinde oluşan, uzun kenarına paralel ikinci aksiyel modu gösterir. Birinci modun dağılımında gözlenen durum, hacmin ortasında basınç minimumu oluşumu bu modda da gözlemlenir. İki mod farazi olarak kesiştirildiğinde hacmin tam orta noktasında 0 basınç alanı oluşur.

Modun h=1.2 m farazi alıcı konumu düzlemindeki ses basınç değerleri Şekil 4.38'de gösterilmektedir.



A



B

Şekil 4.38 : f_1=18.38 Hz. aksiyel modunun (A) ve f_7=41.82 Hz. oblik modunun (B) h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu.

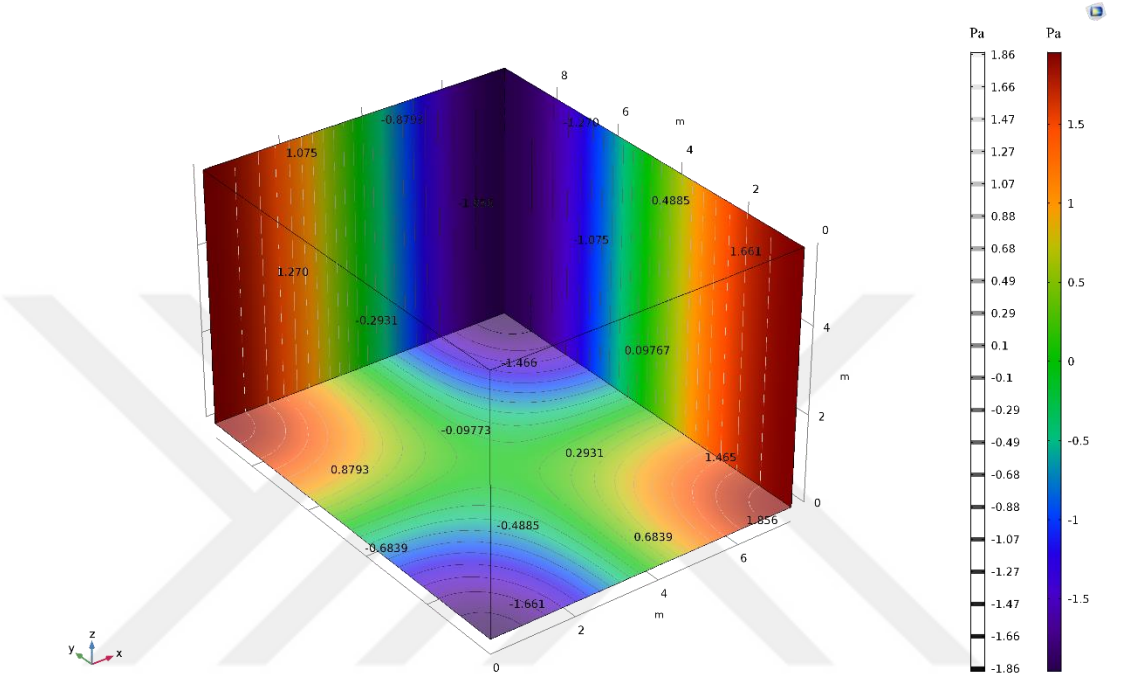
Şekil 4.36 sadece Şekil 4.34'ün ifadesinde kullanılan renklerin bir dilimlenme halini ifade eder. Yükseklik eksenindeki (z ekseni) ses basınç değerlerini ifade etmez.

1:2.26:1.6 oranlarındaki hacmin, aksiyel, teğet ve oblik mod frekansları Çizelge 4.9'da gösterilmektedir.

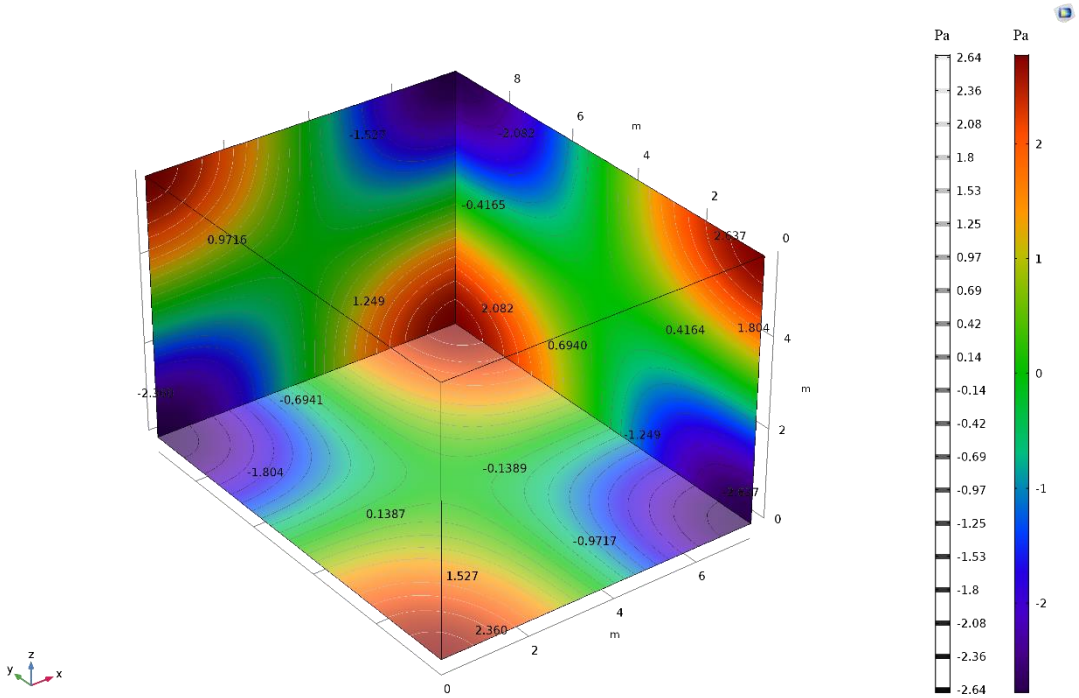
Çizelge 4.9 : 1:2.26:1.6 oranlarına sahip hacmin ilk 4 aksiyel,teğet ve oblik mod frekansları.

Mod Sayısı	Tam Sayı			Mod Frekansı	Artan Sırada Dizilim	Mod Mesafeleri	Renk.	
	p(L)	q(W)	r(H)				Gilford	Bonello
f_1	1	0	0	18.3815648	18.38156484	4.983557771		-
f_2	0	1	0	23.3651226	23.36512262	6.05168699		-
f_3	0	0	1	29.4168096	29.41680961	0.312147339		+
f_4	1	1	0	29.7289569	29.72895694	4.958657755		-
f_5	0	1	1	37.5669754	34.6876147	2.07551499		-
f_6	1	0	1	34.6876147	36.76312969	0.803845731		+
f_7	1	1	1	41.822955	37.56697542	4.255979621		-
f_8	2	0	0	36.7631297	41.82295504	4.907290191		-
f_9	0	2	0	46.7302452	46.73024523	8.414449302		-
f_{10}	0	0	2	58.8336192	55.14469453	3.688924677		-
f_{11}	2	2	0	59.4579139	58.83361921	0.624294677		+
f_{12}	0	2	2	75.1339508	59.45791389	9.91731551		-
f_{13}	2	0	2	69.3752294	69.3752294	0.72013845		+
f_{14}	2	2	2	83.6459101	70.09536785	3.430891531		+
f_{15}	3	0	0	55.1446945	73.52625938	1.607691462		+
f_{16}	0	3	0	70.0953678	75.13395084	8.511959242		-
f_{17}	0	0	3	88.2504288	83.64591008	4.604518735		+
f_{18}	3	3	0	89.1868708	88.25042882	0.936442016		+
f_{19}	0	3	3	112.700926	89.18687083	2.72095339		+
f_{20}	3	0	3	104.062844	91.90782422	1.55266624		+
f_{21}	3	3	3	125.468865	93.46049046	10.60235363		-
f_{22}	4	0	0	73.5262594	104.0628441	6.226544971		-
f_{23}	0	4	0	93.4604905	110.2893891	2.411537193		-
f_{24}	0	0	4	117.667238	112.7009263	4.124686819		-
f_{25}	4	4	0	118.915828	116.8256131	0.841625343		+
f_{26}	0	4	4	150.267902	117.6672384	1.248589355		+
f_{27}	4	0	4	138.750459	118.9158278	6.553037346		-
f_{28}	4	4	4	167.29182	125.4688651	3.202088789		-

Tüm aksiyel, teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modlar hacmin altın oranına bağlı olarak farklı artışlar gösteririr. Şekil 4.39 ve Şekil 4.40 hacmin ilk teğet ve oblik modunu gösterir. 4 duvar yüzeyini dolaşan dalganın oluşturduğu ses yayılımının tabana da etkisi olmaktadır. Duvar yüzeylerinin kendi içinde ses basıncının yayılımını görüyoruz. 4 köşe birleşiminde ses basıncının yükseldiği görülmektedir.

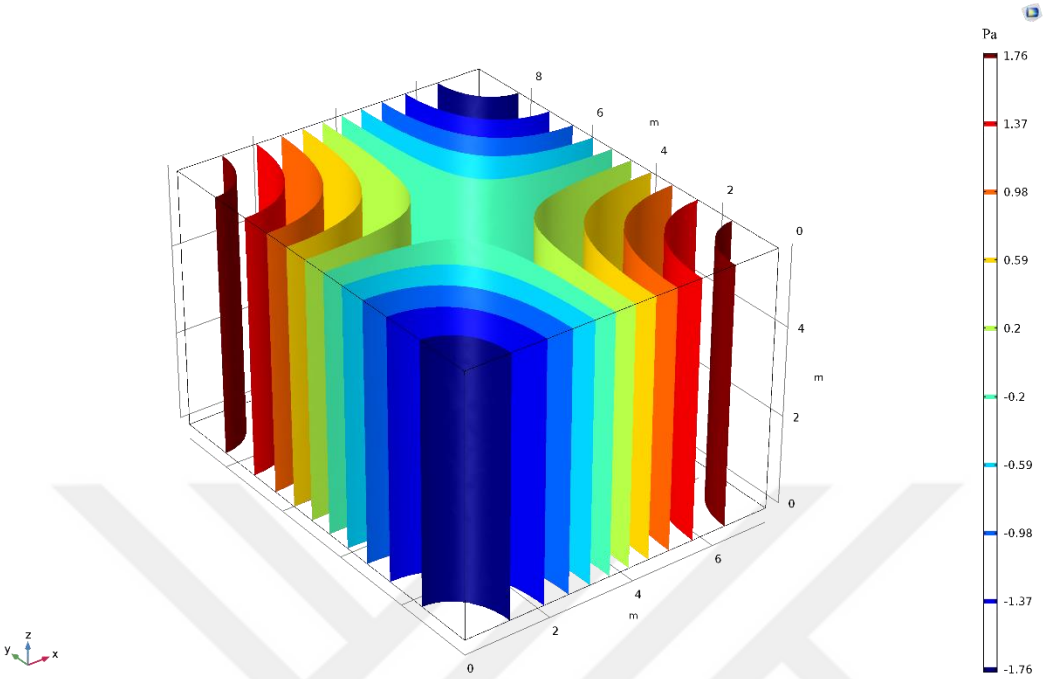


Şekil 4.39 : f_4=29.72 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

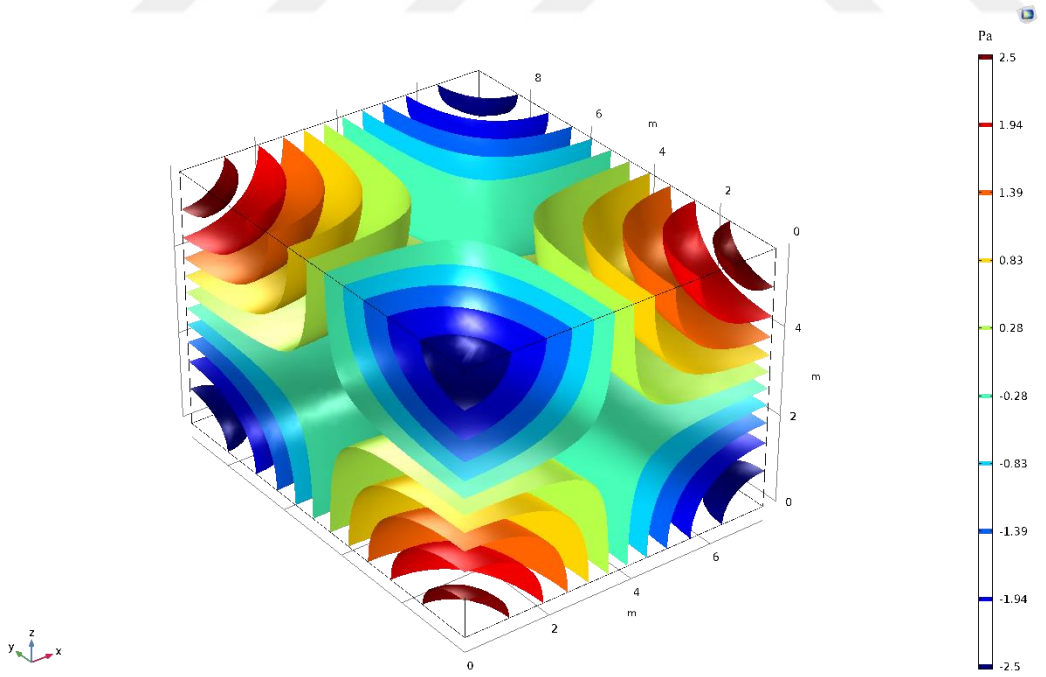


Şekil 4.40 : f_7=41.82 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

Şekil 4.41 ve Şekil 4.42 hacmin ilk teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modunun 3 boyutlu gösterimidir.



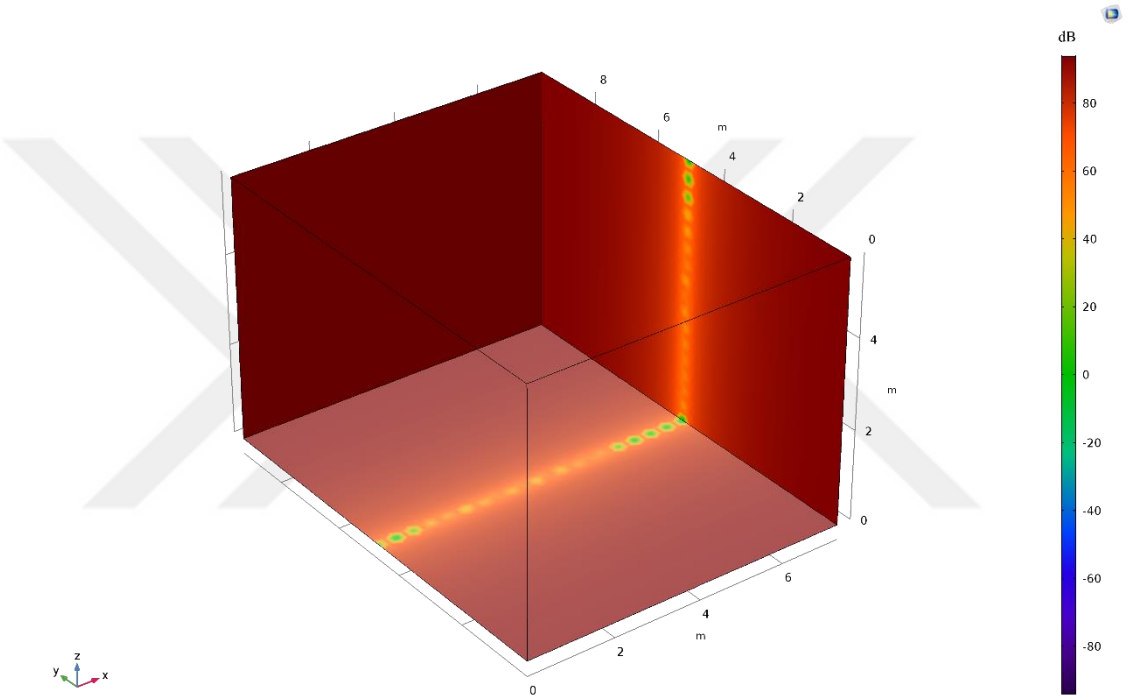
Şekil 4.41 : f_4=29.72 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).



Şekil 4.42 : f_7=41.82 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).

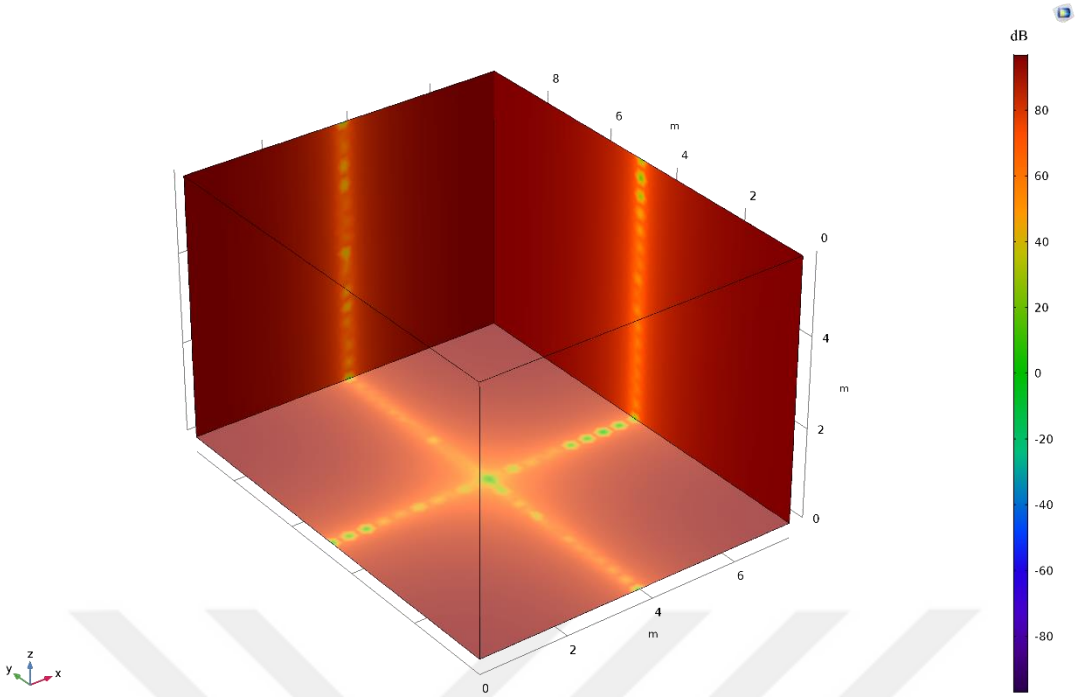
İdeal oran türlerinden olan altın oranda dahi, modların hacimdeki yerleşimi diğer oranlardan farklı değildir. Ancak modlar arasındaki ortalama mesafe diğer oranlardan farklıdır. Bu oranda oluşan modlar arasındaki mesafeler spektrum boyunca dalgalı bir yapı gösterir. Belirli frekanslarda modal yoğunluk oluşurken, diğer frekans bölgelerinde mesafeler oldukça fazladır. Dikdörtgen prizma şeklinden dolayı hacmin merkezinde, diğer hacimlerde olduğu gibi, 0 basınç noktası oluşmaktadır.

Şekil 4.43, 4.44, 4.45 hacmin ilk aksiyel (xz yüzeyleri), teğet (xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modlarının ses basınç düzeylerini gösterir.

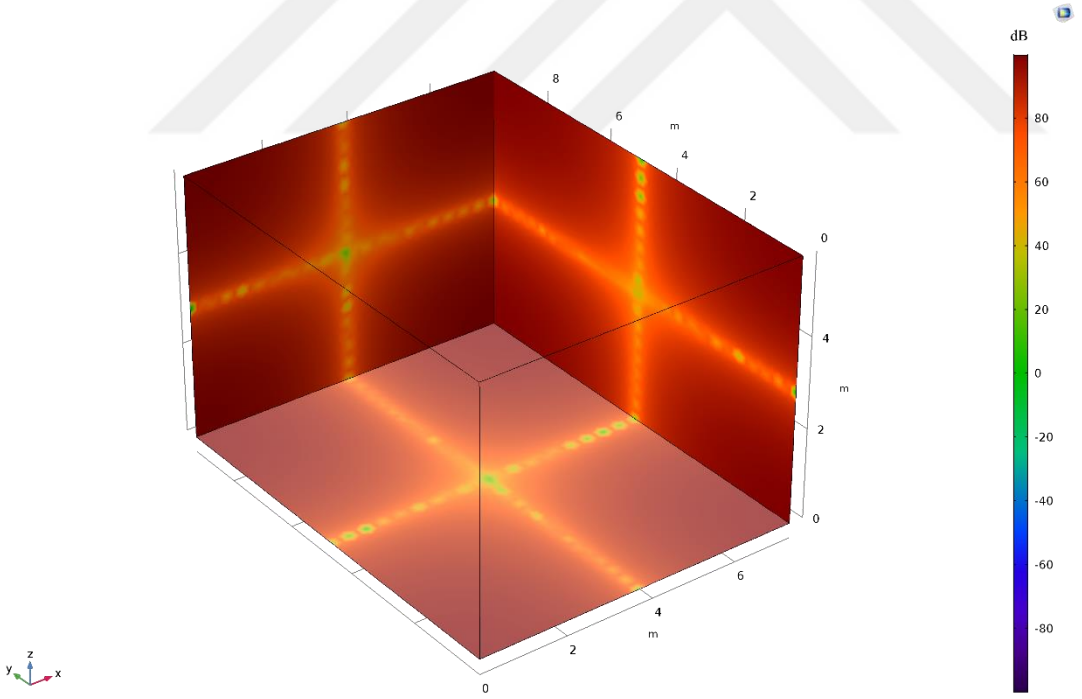


Şekil 4.43 : f_1=18.38 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).

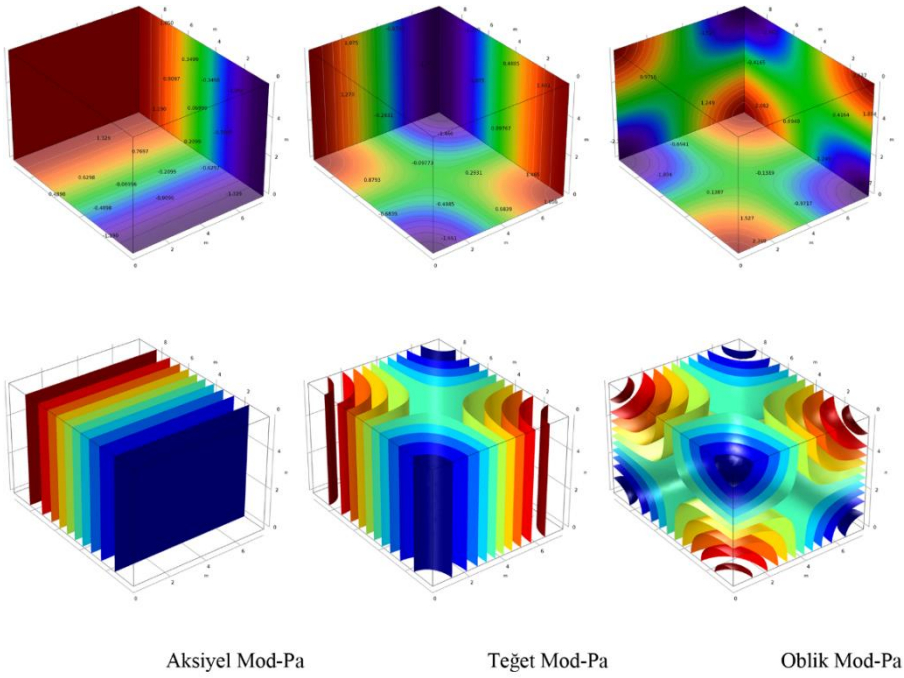
Desibel cinsinden ses basınç düzeyi üzerinden ifade edilir ise; f_1=18.38 aksiyel modu hacmin uzun kenarının orta noktasından kısa kenara paralel uzanan bir 0 basınç çizgisi oluşturur. f_4=29.72 teğet modu birinci ve ikinci aksiyel modların aynı düzlemde kesişimi biçiminde, kısa ve uzun kenarların orta noktalarından; kısa ve uzun kenarlara paralel iki adet 0 basınç çizgisi oluşturur. Bu çizgiler hacmin merkez noktasında kesişir. f_7=41.82 oblik modu tüm yüzeylerin en ve boy çizgilerine paralel ve orta noktalarında kesişen ve bunu hacmim üç yüzeyinde de tekrar eden bir 6 adet 0 basınç çizgisi oluşturur. Bu çizgiler üzerindeki basınç dağılımı yüzey merkezlerinden kenarlarına doğru artan basınç şeklindedir.



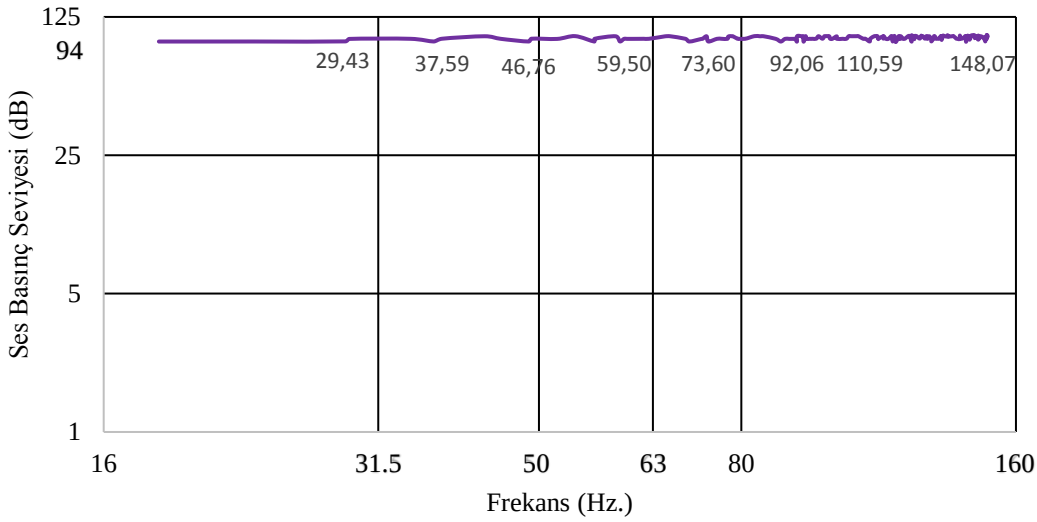
Şekil 4.44 : f_4=29.72 Hz. teğet modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).



Şekil 4.45 : f_7=41.82 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).



Şekil 4.46 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) ve ses basnç düzeyi (dB) gösterimler



Şekil 4.47 : 1:2.26:1.6 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi.

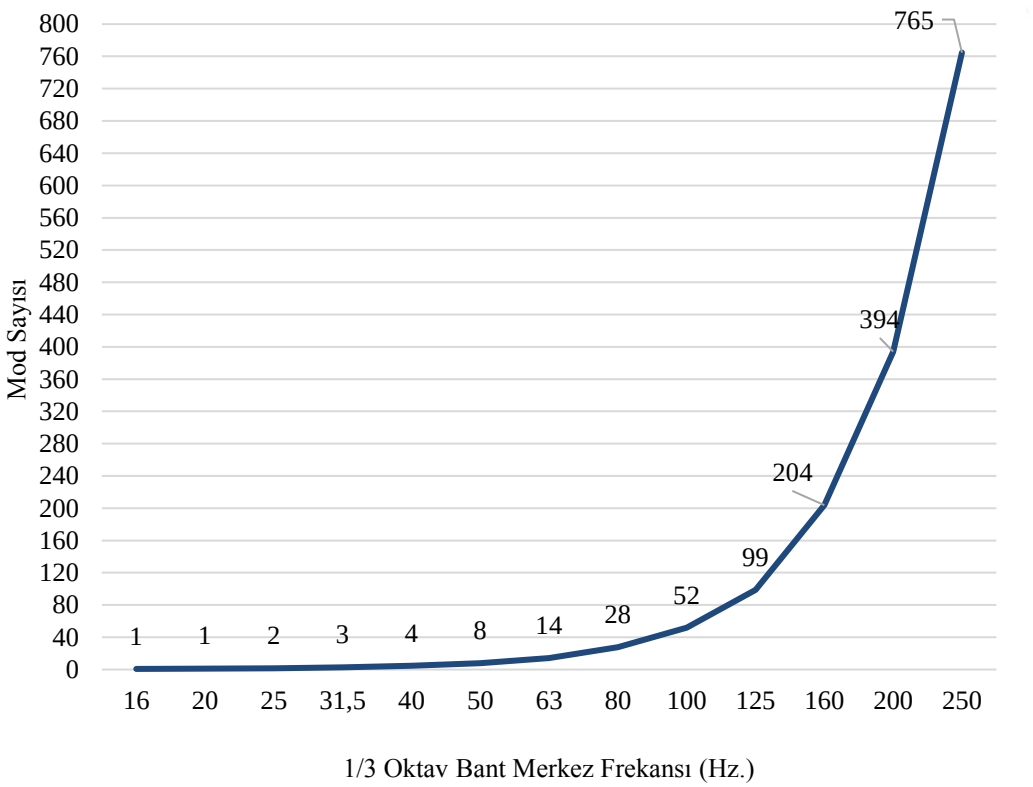
1:2.26:1.26 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekans değerlerinde seyrek ve az sayıda vadi ve tepe noktaları oluşturur. 80 Hz. üzerinde ses basınç düzeyinin daha sık tepe ve vadiler oluşturduğu görülür. Spektrum boyunca oluşan tepe ve vadi noktaları düzensizdir. 90 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Frekans tepki eğrisi 1. ve 2. hacme göre daha düzenlidir. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 100 dB ile 93 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir.

4.2.4 Europan oranın değerlendirilmesi, 1:0.6:1.6

Bu hacmin aksiyel modları denklem 2.6 ile hesaplanmıştır. Hacmin mod sayısı denklem 2.7'ye göre hesaplanır. Modlar arasındaki mesafe denklem 2.8 ile hesaplanır.

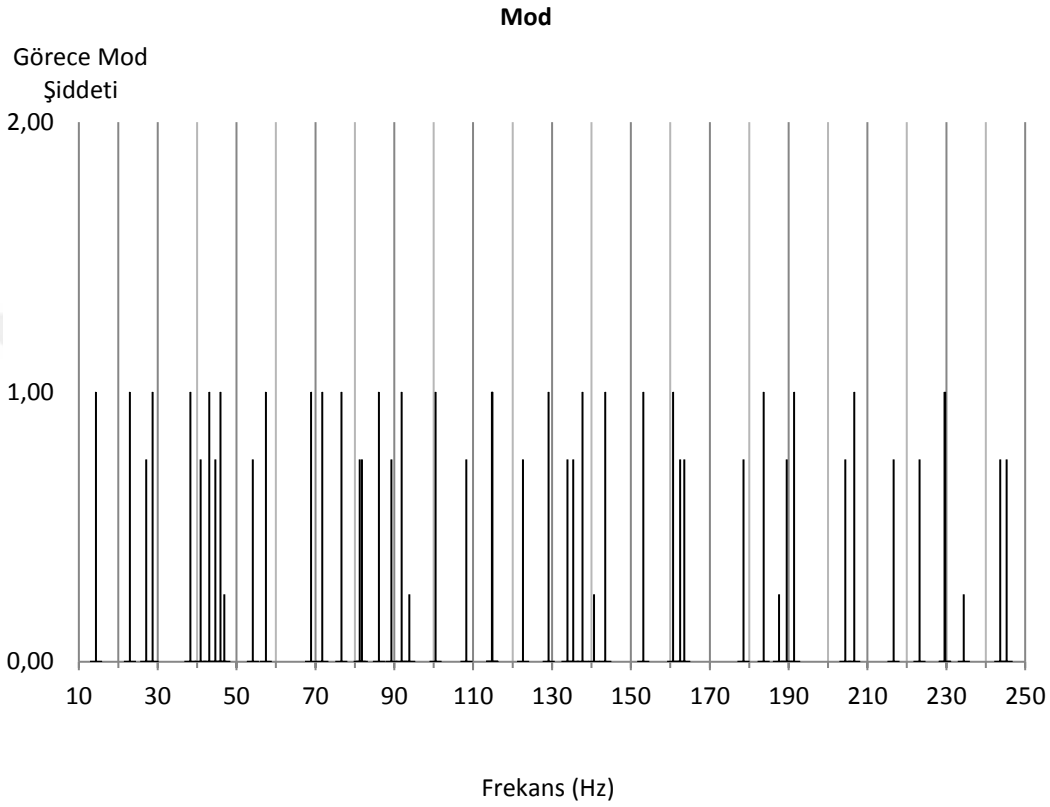
Gilford tarafından ifade edilen mod aralığı kriterine göre aksiyel modlar arasındaki mesafe 20 Hz.'den fazla olmamalıdır. 1:0.6:1.6 oranlarına sahip hacimde bu mesafe 1 Hz. ile 14 Hz. arasında frekanslara göre değişen bir skalada hesaplanmaktadır. Bonello kriterleri açısından incelendiğinde modlar arasındaki mesafe; ilgili modun frekansının %5'i kadar olmalıdır. Hacimdeki en düşük frekanslı aksiyel mod için bu 14.35 x 5/100 = 0.717 Hz. olarak hesaplanır. Yani modlar arasında yaklaşık 1 Hz. kadar mesafe olmalıdır. Olay hacimde ilk aksiyel mod frekansı ile en yakın diğer mod frekansı (üçüncü aksiyel mod) arasında 8.6 Hz. mesafe bulunmaktadır. Dikdörtgen prizma şeklindeki hacim Gilford ve Bonello tarafından ifade edilen mod aralığı kriterlerini sağlamamaktadır.

Modal yoğunluk frekans arttıkça artar. 16 Hz ve 20 Hz frekansları arasındaki sabit seyir dışında frekans arttıkça artmaktadır. Frekansa bağlı mod sayısı Şekil 4.48'de görülmektedir. Hacmin modal yoğunluğu 25 Hz.'den sonra düzenli bir artış gösterir.



Şekil 4.48 : 1:0.6:1.6 oranlı hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı.

Şekil 4.49 hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarına ait modal yoğunluğunu ve dağılımını göstermektedir. Modların yansımalardan kaynaklı enerji düşüşleri ve farkları üzerinden modların ifadesi için bir ölçek oluşturulmuştur. Modlar düşey eksende farklı görece mod şiddetleri ile ifade edilirler. Aksiyel mod=1, teğet mod=0.75 ve oblik mod=0.25 değeri ile ifade edilir.



Şekil 4.49 : 1:0.6:1.6 oranhacmin modal yoğunluk grafi

Şekil 4.49'daki ve Çizelge 4.10'daki verileri incelersek, sadece bir boyut (eksen) tarafından desteklenen tekil frekanslar mevcuttur. Hacimde tüm eksenlerinde mod frekansları birbirinden farklı olarak oluşur. Bu durum oda oranlarının birbirinin tam katı olmamasından ve oranlar arasında ortak bölen ilişkisinin olmamasından kaynaklanır. Spektrum boyunca modların dağılımı belirli gölgeler dışında düzenlidir. Spektrum grafiği belirli frekanslarda sıklaşırken belirli frekans aralıklarında hiç mod göstermez ve seyrelir. Bu seyrelme 1:2.26:1.6 hacmine kıyasla daha az frekans bölgesinde gerçekleşir. Modlar arasındaki mesafe 80 Hz, 190 Hz ve 230 Hz arasında azdır. 60 Hz ile 70 Hz frekans aralığında, 160 Hz le 180 Hz frekans aralığında ve 190 Hz ile 200 Hz frekans aralığında modlar arasında mod yoğunluğu çok azdır. Spektrum boyunca modlar arası mesafe belirli frekans aralıklarında düzensizlik gösterir.

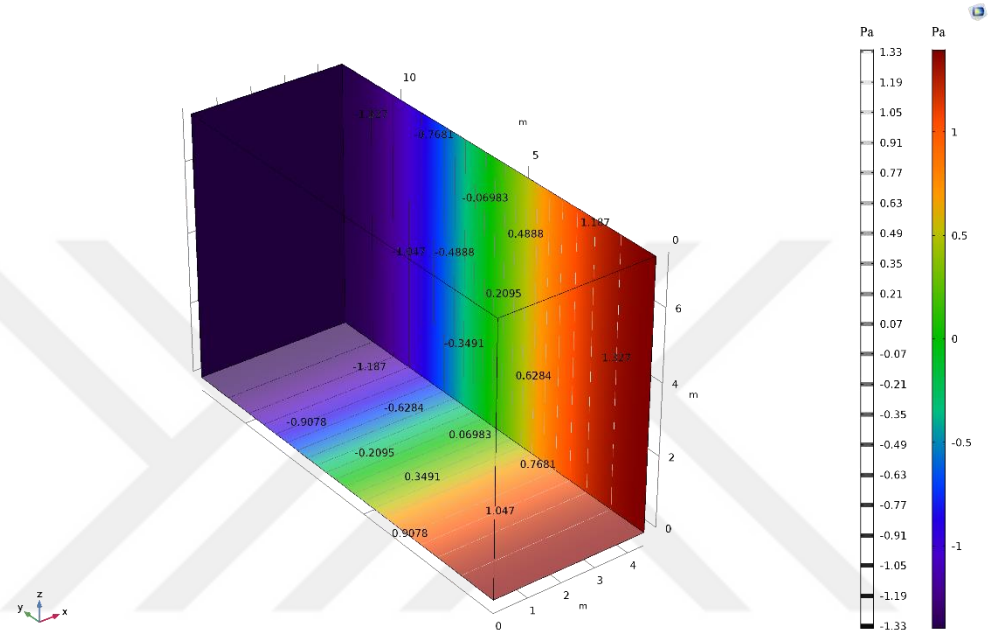
Modların birbirine mesafeleri bakımından hacim Bonello kriterini sağlamamaktadır. Frekansla birlikte artan mod sayısına rağmen hacim modal özellikleri bakımından uygun şartları sağlamaz.

1:0.6:1.6 oranlarında ve 11.95:4.48:7.47 m boyutlarındaki dikdörtgen prizma şeklindeki hacmin aksiyel mod frekansları Çizelge 4.10'da gösterilmektedir

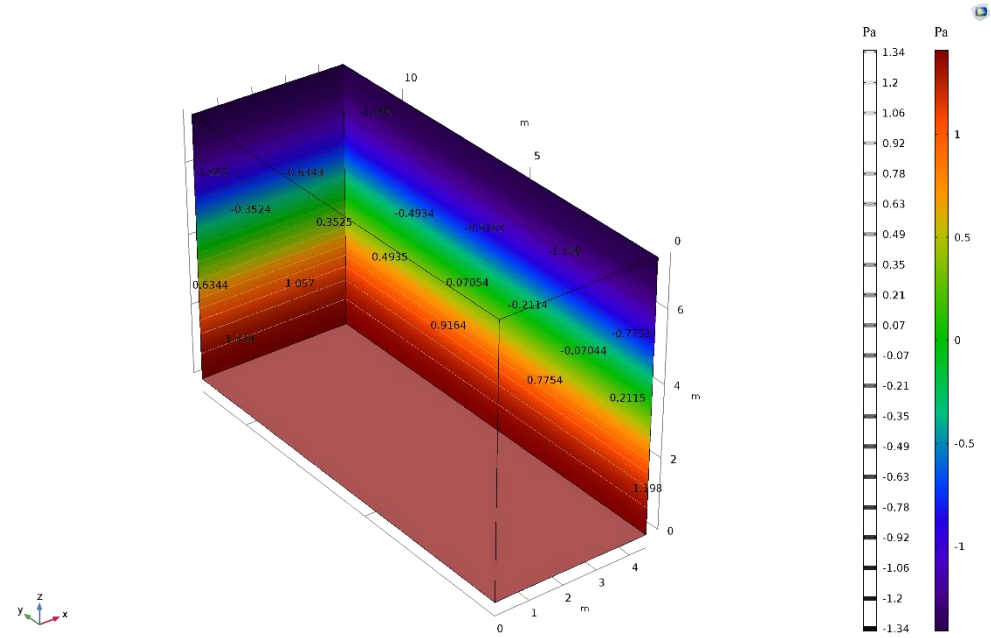
Çizelge 4.10 : 1:0.6:1.6 oranlarına sahip hacmin ilk 30 aksiyel mod frekansları

Mod Sayısı	Tam Sayı			Mod Frekansı	Artan Sırada Dizilim	Mod Mesafeleri	Renk.	
	p(L)	q(W)	r(H)				Gilford	Bonello
f_1	1	0	0	14.3514644	14.35146444	8.607036234	-	-
f_2	0	1	0	38.28125	22.95850067	5.744428201	-	-
f_3	0	0	1	22.9585007	28.70292887	9.57832113	-	-
f_4	2	0	0	28.7029289	38.28125	4.773143305	-	-
f_5	0	2	0	76.5625	43.05439331	2.862608033	-	-
f_6	0	0	2	45.9170013	45.91700134	11.4888564	-	-
f_7	3	0	0	43.0543933	57.40585774	11.46964427	-	-
f_8	0	3	0	114.84375	68.87550201	2.881820168	-	+
f_9	0	0	3	68.875502	71.75732218	4.805177824	-	-
f_{10}	4	0	0	57.4058577	76.5625	9.546286611	-	-
f_{11}	0	4	0	153.125	86.10878661	5.725216066	-	-
f_{12}	0	0	4	91.8340027	91.83400268	8.626248369	-	-
f_{13}	5	0	0	71.7573222	100.460251	14.3322523	-	-
f_{14}	0	5	0	191.40625	114.7925033	0.019212134	-	+
f_{15}	0	0	5	114.792503	114.8117155	0.032034519	-	+
f_{16}	6	0	0	86.1087866	114.84375	14.31942992	-	-
f_{17}	0	6	0	229.6875	129.1631799	8.5878241	-	-
f_{18}	0	0	6	137.751004	137.751004	5.763640335	-	+
f_{19}	7	0	0	100.460251	143.5146444	9.610355649	-	-
f_{20}	0	7	0	267.96875	153.125	7.584504685	-	+
f_{21}	0	0	7	160.709505	160.7095047	22.95850067	-	-
f_{22}	8	0	0	114.811715	183.6680054	7.738244645	-	-
f_{23}	0	8	0	306.25	191.40625	15.22025602	-	-
f_{24}	0	0	8	183.668005	206.626506	22.95850067	-	-
f_{25}	9	0	0	129.16318	229.5850067	0.102493307	-	+
f_{26}	0	9	0	344.53125	229.6875	38.28125	+	-
f_{27}	0	0	9	206.626506	267.96875	38.28125	+	-
f_{28}	10	0	0	143.514644	306.25	38.28125	+	-
f_{29}	0	10	0	382.8125	344.53125	38.28125	+	-
f_{30}	0	0	10	229.585007	382.8125			

Hacmin ilk aksiyel modu f_1=14.35 Hz de oluşmaktadır. Hacmin tavan ve döşeme eksenleri arasında ilk mod oluşmaktadır. Plan düzleminde, karşılıklı xz yüzeyleri arasında oluşan birinci aksiyel mod ile xy yüzeyleri arasında oluşan üçüncü aksiyel mod Şekil 4.50'de ve Şekil 4.51'de, 3 boyutlu görseli Şekil 4.52'de ve Şekil 4.53'te gösterilmektedir. Şekil 4.50'de gösterim basınç değeri (Pa) üzerinden, minimum (0 Pa) ve maksimum (1 Pa) olarak ifade edilir. Eksi basınç değerleri hacmin orta ekseni orjin kabul edildiğinde basıncın konumunun zıt yönde olduğunu ifade eder.

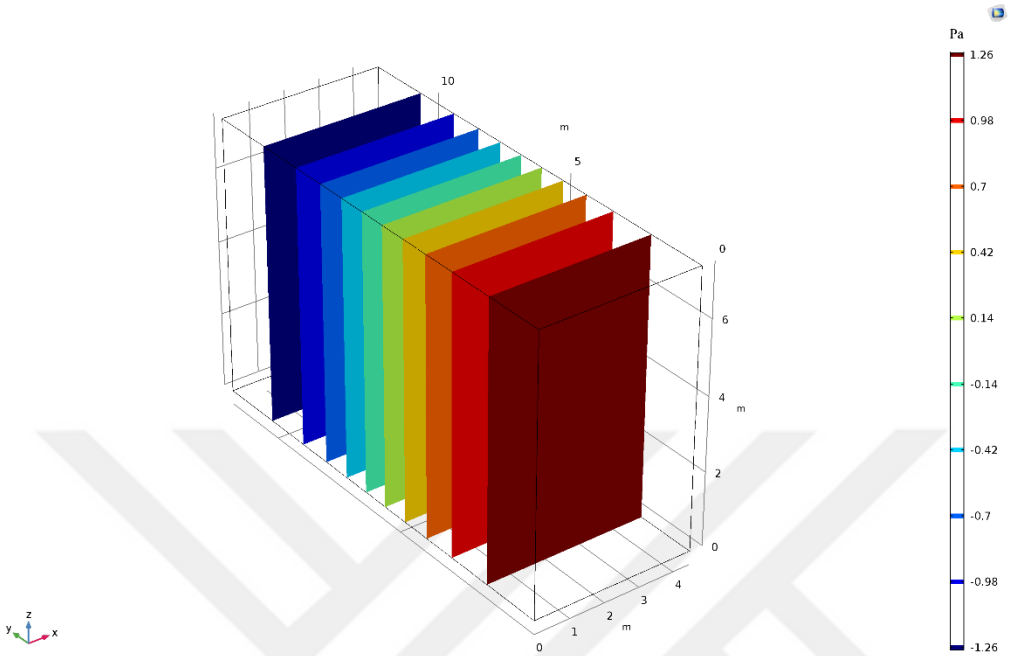


Şekil 4.50 : Plan düzleminde oluşan birinci aksiyel mod (xz yüzeyleri) f_1=14.35 Hz. in ses basıncı (Pa).

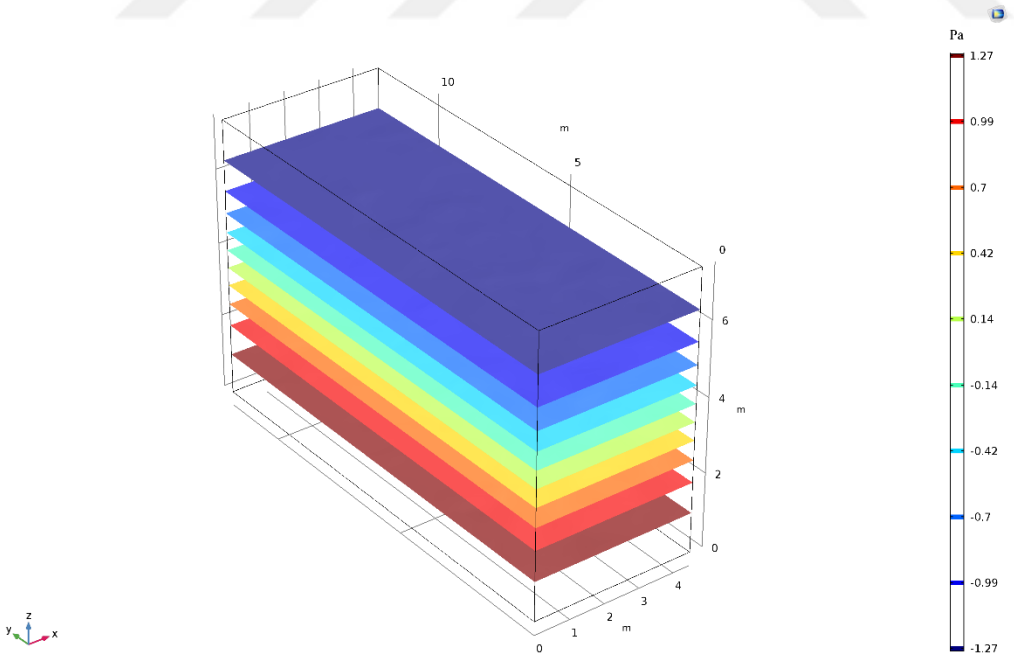


Şekil 4.51 : Plan düzleminde oluşan ikinci aksiyel mod (xy yüzeyleri) f_3=22.95 Hz. in ses basıncı (Pa).

Şekil 4.51'de gösterilen mod hacmin tavan ve döşeme duvarları arasında oluşmaktadır. Yatay düzlemde oluşan mod, yine hacmin orta noktasında en düşük ses basıncına sahiptir.



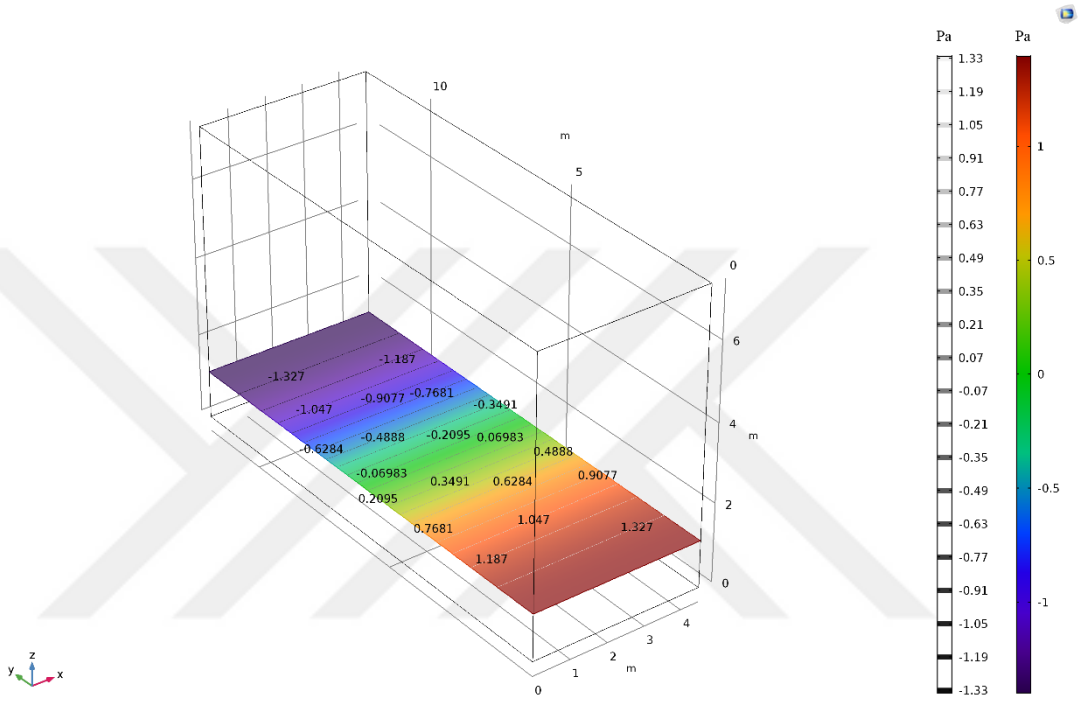
Şekil 4.52 : f_1=14.35 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa).



Şekil 4.53 : f_3=22.95 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa).

Şekil 4.50 ve Şekil 4.52'de hacmin boy ekseni üzerinde oluşan ikinci aksiyel modu gösterir. Birinci modun dağılımında gözlenen durum, hacmin ortasında basınç minimumu oluşumu bu modda da gözlemlenir. İki mod farazi olarak kesiştirildiğinde hacmin tam orta noktasında 0 basınç alanı oluşur.

Modun h=1.2 m farazi alıcı konumu düzlemindeki ses basınç değerleri Şekil 4.54'te gösterilmektedir.



Şekil 4.54 : f_1=14.35 Hz. aksiyel modunun h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu.

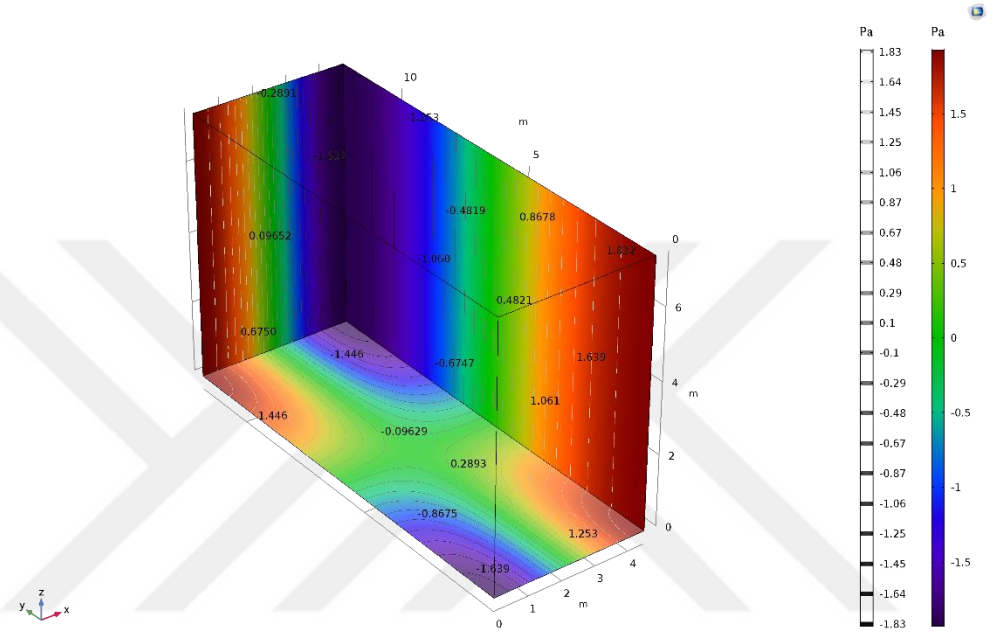
Şekil 4.52 sadece Şekil 4.50'nin ifadesinde kullanılan renklerin bir dilimlenme halini ifade eder. Yükseklik eksenindeki (z ekseni) ses basınç değerlerini ifade etmez. Gösterim eşbasınç eğrileri ve renklendirme biçimlerini birlikte kullanılması ile ifade edilir.

1:0.6:1.6 oranlarındaki hacmin, aksiyel, teğet ve oblik mod frekansları Çizelge 4.11'de gösterilmektedir. Bu hacimde diğer hacimlerde en duvarları arasında oluşan ikinci aksiyel mod tavan ve döşeme duvarları arasında oluşmaktadır. Bu durumun nedeni yüksekliğinin en boyutuna oranla büyük olmasıdır.

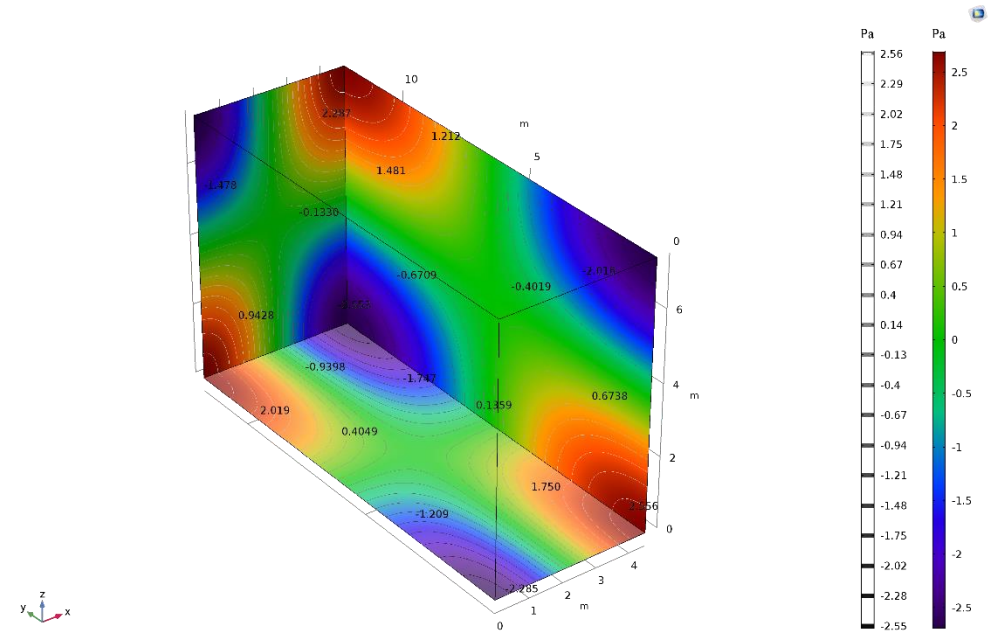
Çizelge 4.11 : 1:0.6:1.6 oranlarına sahip hacmin ilk 4 aksiyel,teğet ve oblik mod frekansları.

Mod Sayısı	Tam Sayı			Mod Frekansı	Artan Sırada Dizilim	Mod Mesafeleri	Renk.	
	p(L)	q(W)	r(H)				Gilford	Bonello
f_1	1	0	0	14.3514644	14.35146444	8.607036234		-
f_2	0	1	0	38.28125	22.95850067	4.116529975		-
f_3	0	0	1	22.9585007	27.07503064	1.627898225		-
f_4	1	1	0	40.8829871	28.70292887	9.57832113		-
f_5	0	1	1	44.6379531	38.28125	2.601737085		-
f_6	1	0	1	27.0750306	40.88298709	2.17140622		-
f_7	1	1	1	46.8882862	43.05439331	1.583559768		+
f_8	2	0	0	28.7029289	44.63795307	1.279048266		+
f_9	0	2	0	76.5625	45.91700134	0.971284896		+
f_{10}	0	0	2	45.9170013	46.88828623	7.261775055		-
f_{11}	2	2	0	81.7659742	54.15006129	3.255796451		+
f_{12}	0	2	2	89.2759061	57.40585774	11.46964427		-
f_{13}	2	0	2	54.1500613	68.87550201	2.881820168		+
f_{14}	2	2	2	93.7765725	71.75732218	4.805177824		-
f_{15}	3	0	0	43.0543933	76.5625	4.662591934		-
f_{16}	0	3	0	114.84375	81.22509193	0.540882236		+
f_{17}	0	0	3	68.875502	81.76597417	4.342812441		-
f_{18}	3	3	0	122.648961	86.10878661	3.167119535		+
f_{19}	0	3	3	133.913859	89.27590615	2.558096531		+
f_{20}	3	0	3	81.2250919	91.83400268	1.942569791		+
f_{21}	3	3	3	140.664859	93.77657247	6.683678578		-
f_{22}	4	0	0	57.4058577	100.460251	7.839871533		-
f_{23}	0	4	0	153.125	108.3001226	6.492380767		-
f_{24}	0	0	4	91.8340027	114.7925033	0.019212134		+
f_{25}	4	4	0	163.531948	114.8117155	0.032034519		+
f_{26}	0	4	4	178.551812	114.84375	7.805211255		-
f_{27}	4	0	4	108.300123	122.6489613	6.514218661		-
f_{28}	4	4	4	187.553145	129.1631799	4.750679303		-

Tüm aksiyel, teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modlar daha önceki oranlara benzer konum ve şekil özellikleri gösterir. Teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modlarına ait basınç maksimumları hacmin köşe kesişim noktalarında oluşur. Şekil 4.55 ve Şekil 4.56 hacmin ilk teğet ve oblik modunu gösterir. 4 duvar yüzeyini dolaşan dalganın oluşturduğu ses yayılımının tabana da etkisi olmaktadır. Duvar yüzeylerinin kendi içinde ses basıncının yayılımını görüyoruz. 4 köşe birleşiminde ses basıncının yükseldiği görülmektedir.

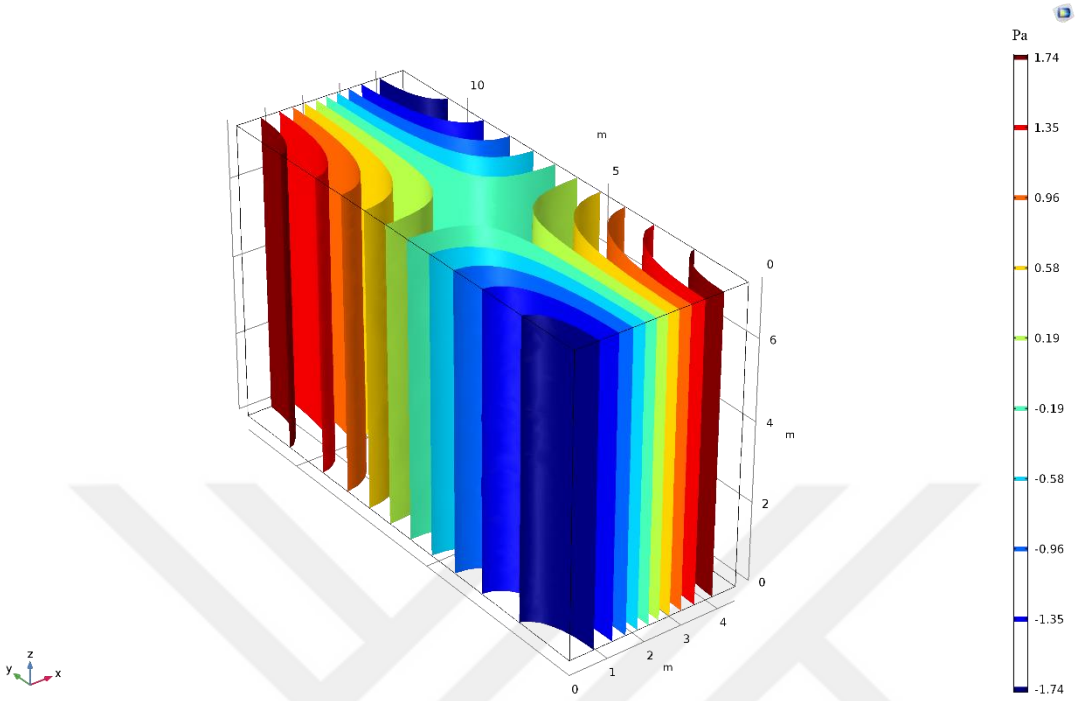


Şekil 4.55 : f_4=40.88 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

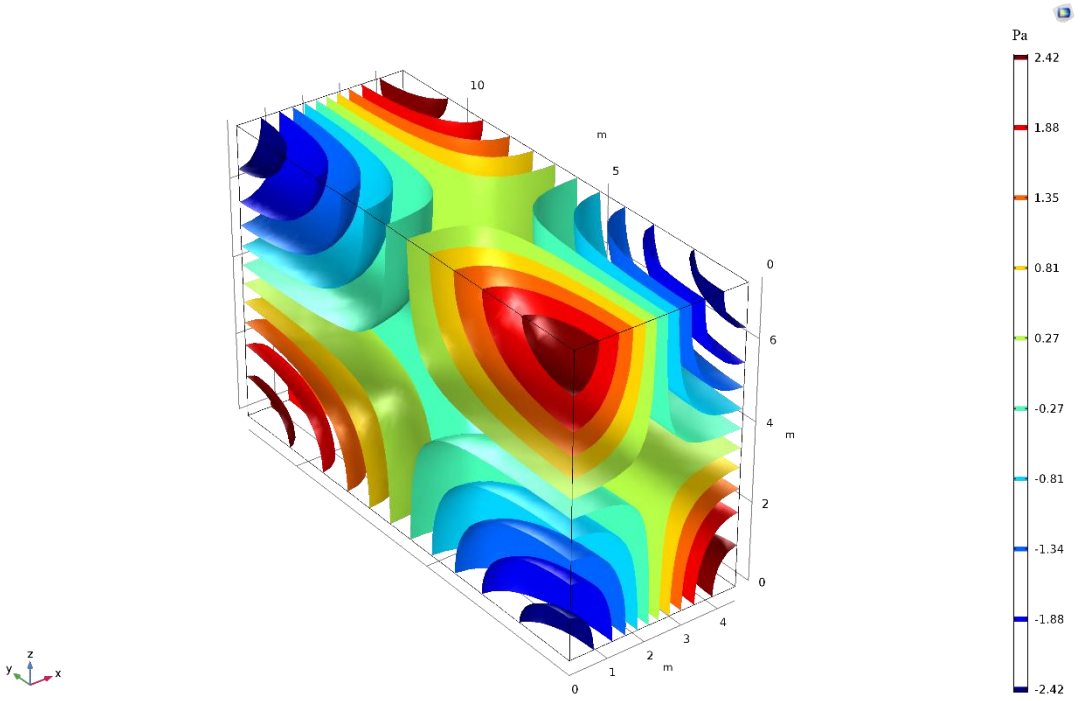


Şekil 4.56 : f_7=46.88 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

Şekil 4.57 ve Şekil 4.58 hacmin ilk teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modunun 3 boyutlu gösterimidir.

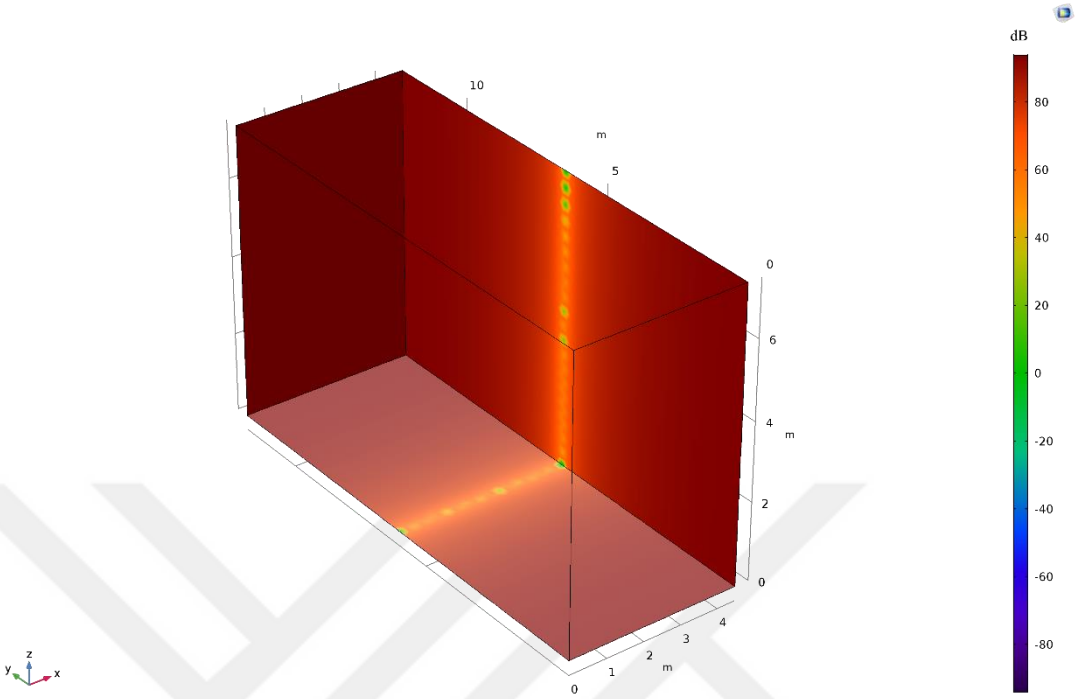


Şekil 4.57 : f_4=40.88 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).



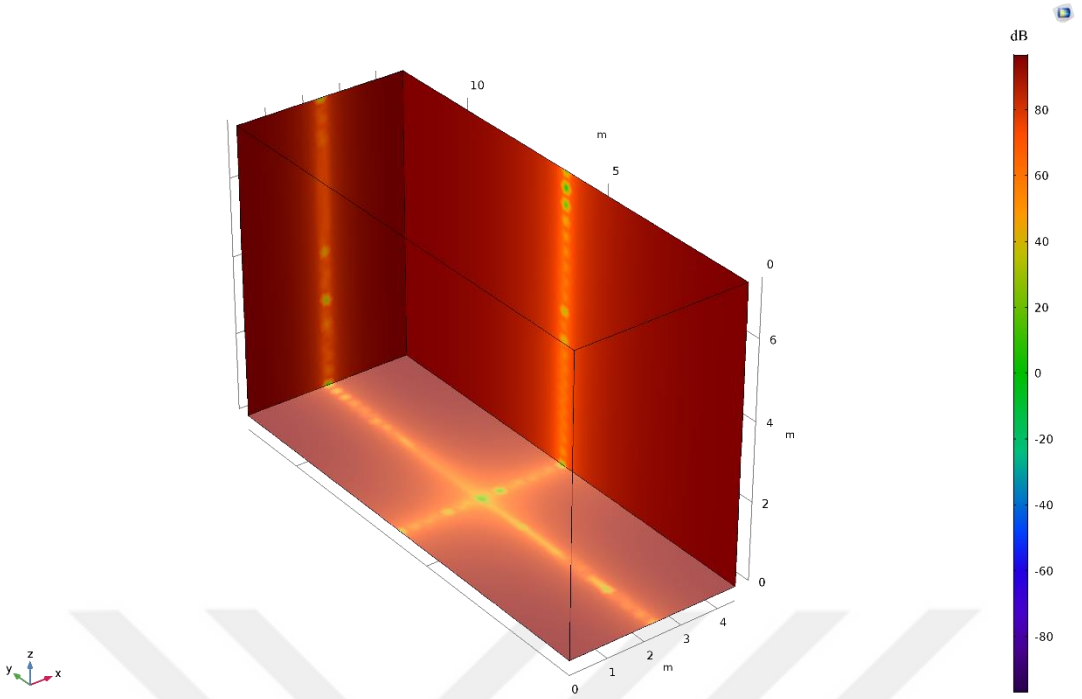
Şekil 4.58 : f_7=46.88 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).

Şekil 4.59, 4.60, 4.61 hacmin ilk aksiyel, teğet ve oblik modlarının ses basınç düzeylerini gösterir.

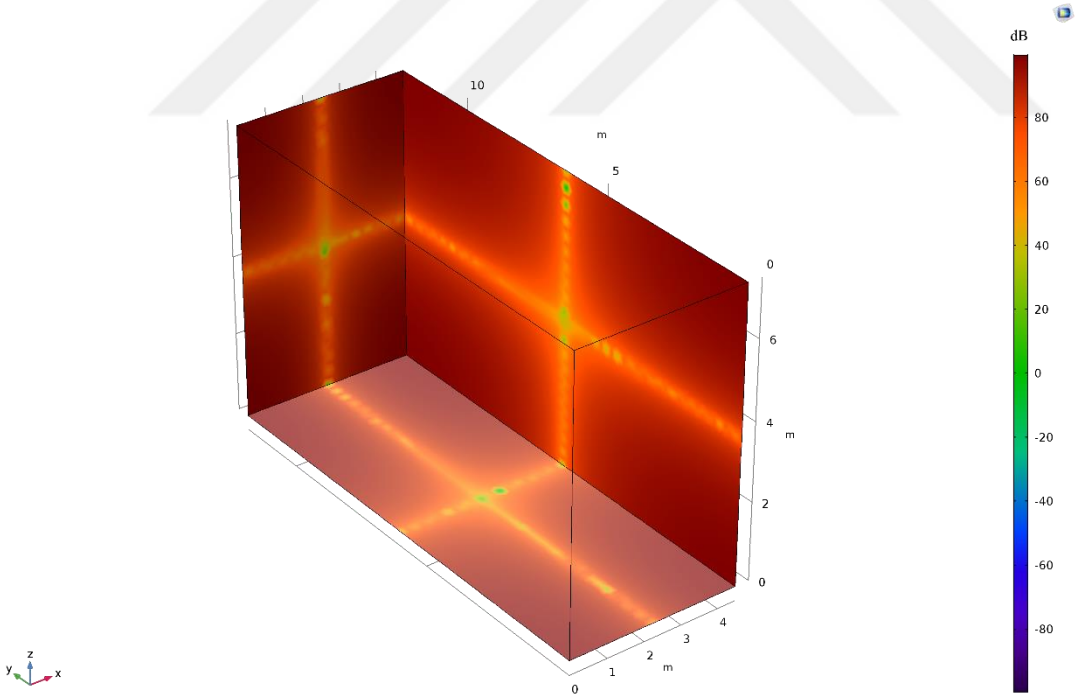


Şekil 4.59 : f_1=14.35 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).

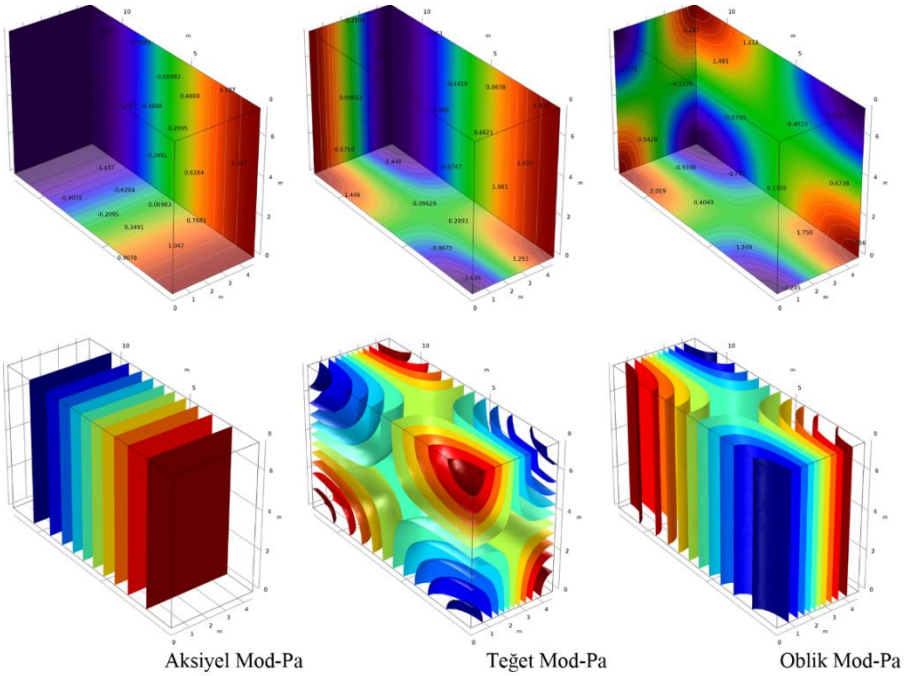
Desibel cinsinden ses basınç düzeyi üzerinden ifade edilir ise; f_1=14.35 aksiyel modu hacmin yükseklik ekseninde oluşur. İkinci modun yükseklik ekseninde olması hacmin yüksekliğinin eninden fazla olmasından kaynaklanır. Hacmin uzun kenarının orta noktasından kısa kenara paralel uzanan bir 0 basınç çizgisi oluşturur. f_4=40.88 teğet modu birinci ve ikinci aksiyel modların aynı düzlemde kesişimi biçiminde, kısa ve uzun kenarların orta noktalarından; kısa ve uzun kenarlara paralel iki adet 0 basınç çizgisi oluşturur. Bu çizgiler hacmin merkez noktasında kesişir. f_7=46.88 oblik modu tüm yüzeylerin en ve boy çizgilerine paralel ve orta noktalarında kesişen ve bunu hacmim üç yüzeyinde de tekrar eden bir 6 adet 0 basınç çizgisi oluşturur. Bu çizgiler üzerindeki basınç dağılımı yüzey merkezlerinden kenarlarına doğru artan basınç şeklindedir. Mod üzerindeki bu ani ses basınç seviyesi düşüşleri bu çizgiler üzerine konumlandırılacak bir dinleyicinin sesi diğer konumlara göre daha düşük seviyede alacağını gösterir. Ses dağılımı mod eksenleri üzerinde homojenliğini kaybeder.



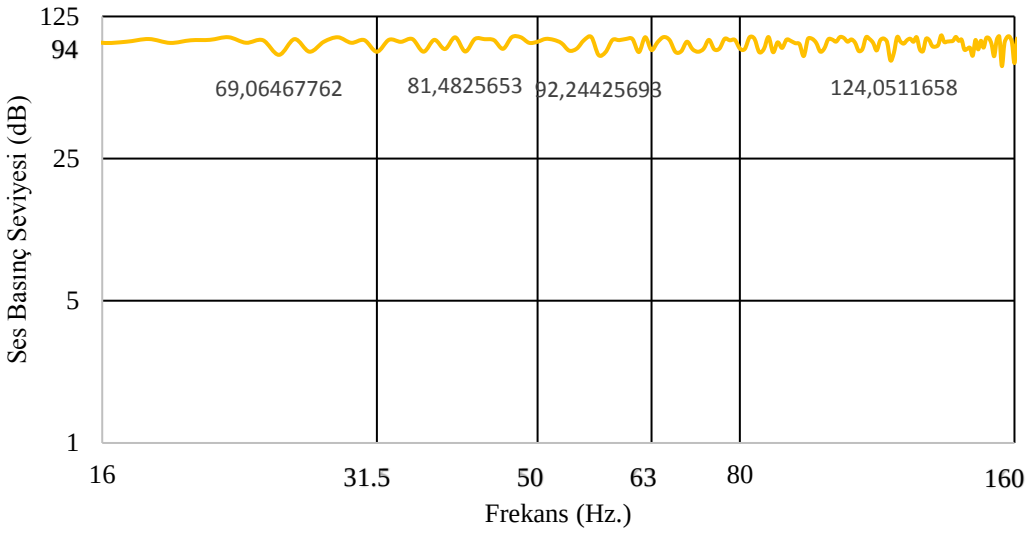
Şekil 4.60 : f_4=40.88 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).



Şekil 4.61 : f_7=46.88 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).



Şekil 4.62 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) ve ses basnç düzeyi (dB) gösterimleri.



Şekil 4.63 : 1:0.6:1.6 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi.

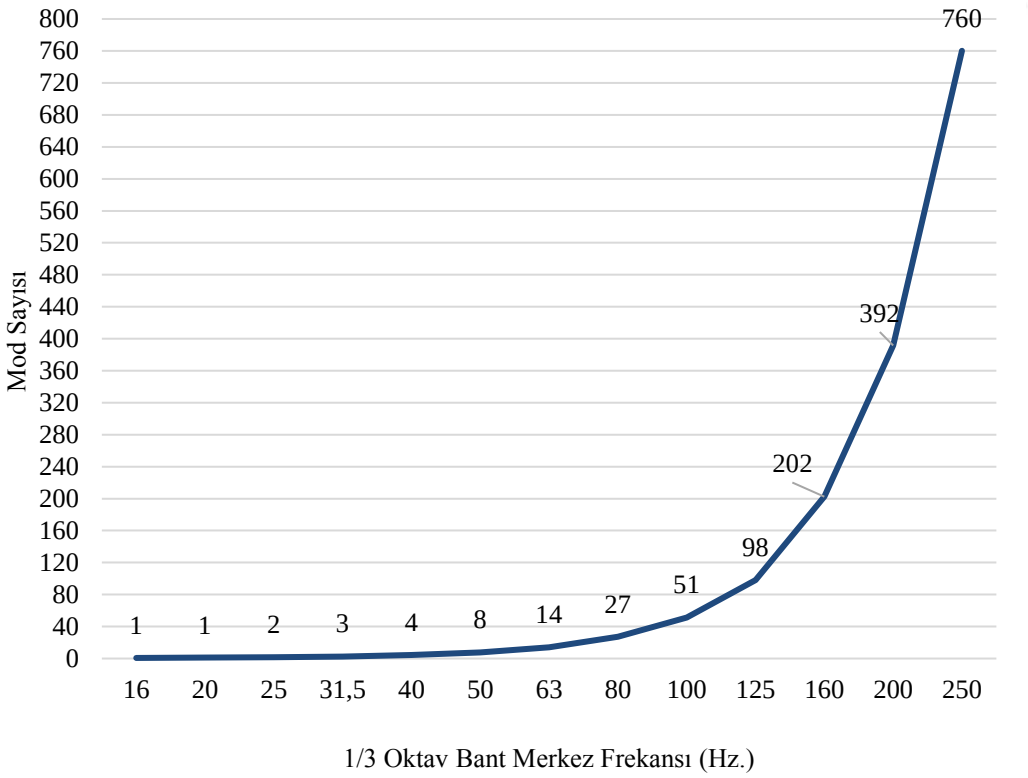
1:0.6:1.6 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekans değerlerinden itibaren vadi ve tepe noktaları oluşturur. 80 Hz. üzerinde ses basınç düzeyinin daha sık tepe ve vadiler oluşturduğu görülse de bu noktalar tüm spektrum boyunca görülür. Spektrum boyunca oluşan tepe ve vadi noktaları düzensizdir. Diğer hacimlerde görülen frekansa bağlı artış durumu bu hacimde diğer hacimlerde olduğu kadar belirgin değildir. Frekans tepki eğrisi diğer hacimlere kıyasla daha fazla pik noktası oluşturur. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 96 dB ile 71 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir.

4.2.5 Alberti oranın değerlendirilmesi, 1:0.75:1.5

Bu hacmin aksiyel modları denklem 2.6 ile hesaplanmıştır. Hacmin mod sayısı denklem 2.7'ye göre hesaplanır. Modlar arasındaki mesafe denklem 2.8 ile hesaplanır.

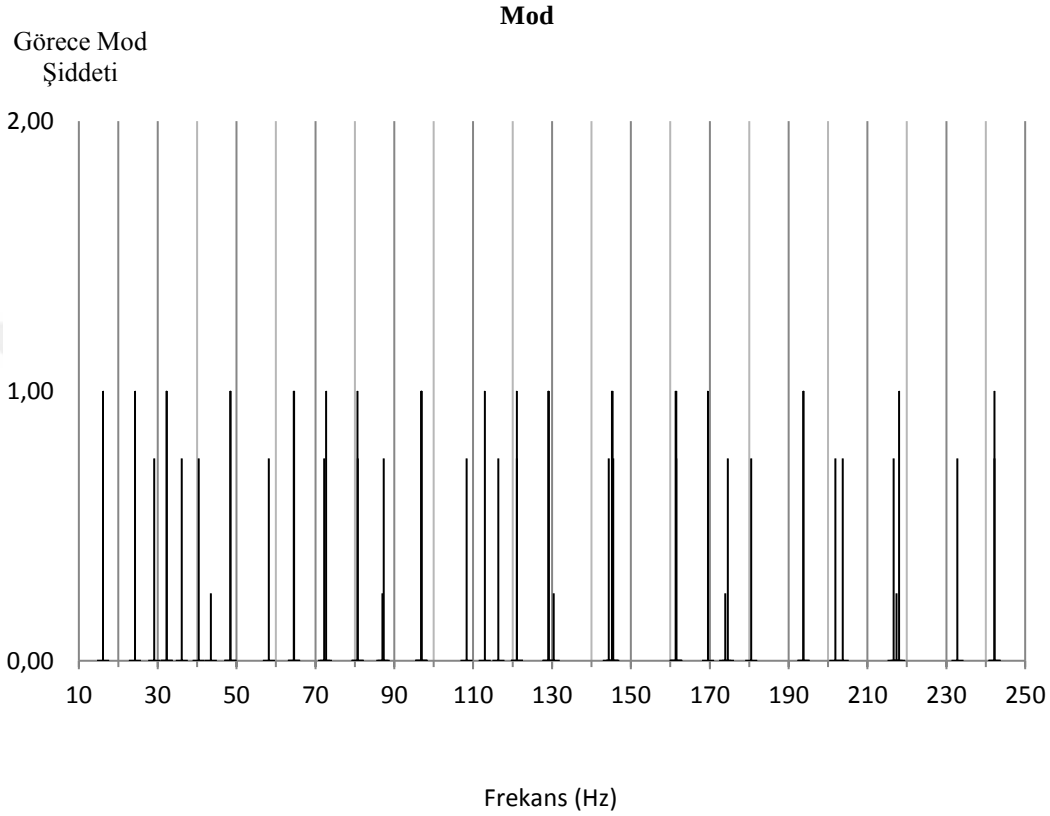
Gilford tarafından ifade edilen mod aralığı kriterine göre aksiyel modlar arasındaki mesafe 20 Hz.'den fazla olmamalıdır. 1:0.75:1.5 oranlarına sahip hacimde bu mesafe 0.03 Hz.ile 11 Hz. arasında frekanslara göre değişen bir skalada hesaplanmaktadır. Bonello kriterleri açısından incelendiğinde modlar arasındaki mesafe; ilgili modun frekansının %5'i kadar olmalıdır. Hacimdeki en düşük frekanslı aksiyel mod için bu 16.13 x 5/100 = 0.806 Hz. olarak hesaplanır. Yani modlar arasında yaklaşık 1 Hz. kadar mesafe olmalıdır. Olay hacimde ilk aksiyel mod frekansı ile en yakın diğer mod frekansı (üçüncü aksiyel mod) arasında 8.08 Hz. mesafe bulunmaktadır. Dikdörtgen prizma şeklindeki hacim Gilford ve Bonello tarafından ifade edilen mod aralığı kriterlerini sağlamamaktadır.

Modal yoğunluk frekans arttıkça artar. 16 Hz ve 20 Hz frekansları arasındaki sabit seyir dışında frekans arttıkça artmaktadır. Frekansa bağlı mod sayısı Şekil 4.64'te görülmektedir. Hacmin modal yoğunluğu 25 Hz.'den sonra düzenli bir artış gösterir.



Şekil 4.64 : 1:0.75:1.5 oranlı hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı.

Şekil 4.65 hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarına ait modal yoğunluğunu ve dağılımını göstermektedir. Modların yansımalardan kaynaklı enerji düşüşleri ve farkları üzerinden modların ifadesi için bir ölçek oluşturulmuştur. Modlar düşey eksende farklı görece mod şiddetleri ile ifade edilirler. Aksiyel mod=1, teğet mod=0.75 ve oblik mod=0.25 değeri ile ifade edilir.



Şekil 4.65 : 1:0.75:1.5 oranlı hacmin modal yoğunluk grafiği.

Şekil 4.65'teki ve Çizelge 4.12'deki verileri incelersek, sadece bir boyut (eksen) tarafından desteklenen tekil frekansların yanısıra birden fazla eksen tarafından desteklenen frekanslar da mevcuttur. Bu durum oda oranlarından ikisinin, genişlik ve uzunluk oranlarının, birbirinin tam iki katı olmasından kaynaklanır. Spektrum boyunca modların dağılımı düzensizdir. Spektrum grafiği belirli frekanslarda sıklaşırken belirli frekans aralıklarında hiç mod göstermez ve seyrelir. Modlar arasındaki mesafe 140 Hz, 180 Hz ve 210 Hz arasında fazladır. 120 Hz frekansının altında daha homojen bir dağılım vardır. 130 Hz, 145 Hz ve 220 Hz frekans bölgelerinde birbirine çakışma derecesinde yakın modlar oluşmaktadır. Spektrum boyunca modlar arası mesafe belirli frekans aralıklarında düzensizlik gösterir. Modların birbirine mesafeleri bakımından

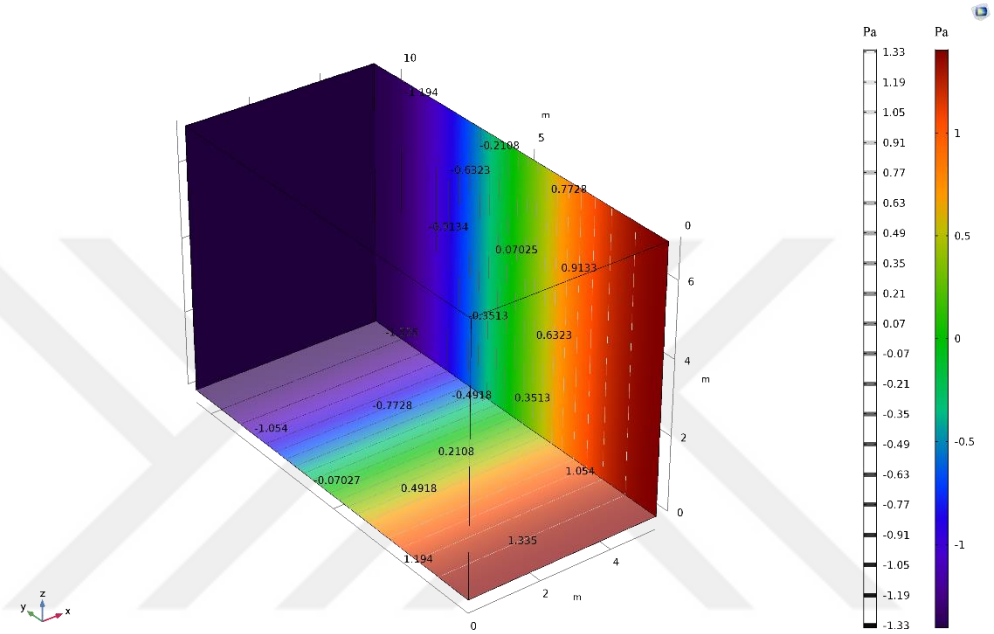
hacim Bonello kriterini sağlamamaktadır. Frekansla birlikte artan mod sayısına rağmen hacim modal özellikleri bakımından uygun şartları sağlamaz.

1:0.75:1.5 oranlarındaki dikdörtgen prizma şeklindeki hacmin aksiyel mod frekansları Çizelge 4.13'de gösterilmektedir.

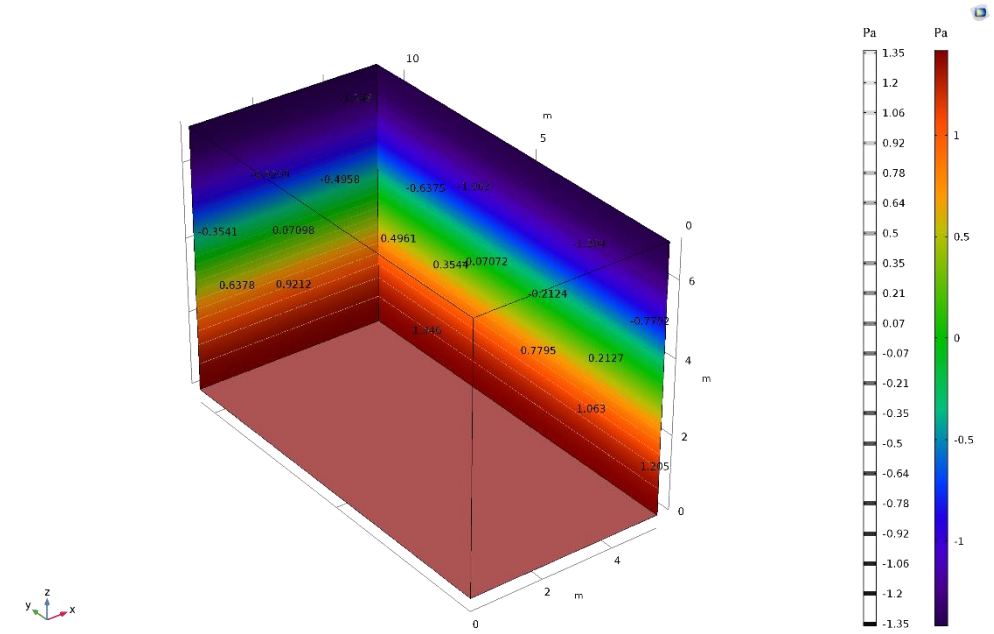
Çizelge 4.12 : 1:0.75:1.5 oranlarına sahip hacmin ilk 30 aksiyel mod frekansları

Mod Sayısı	Tam Sayı			Mod Frekansı	Artan Sırada Dizilim	Mod Mesafeleri	Renk.	
	p(L)	q(W)	r(H)				Gilford	Bonello
f_1	1	0	0	16.1335842	16.1335842	8.089579646	-	-
f_2	0	1	0	32.2975518	24.22316384	8.04400455	-	-
f_3	0	0	1	24.2231638	32.26716839	0.030383398	-	+
f_4	2	0	0	32.2671684	32.29755179	16.1032008	-	-
f_5	0	2	0	64.5951036	48.40075259	0.045575097	-	+
f_6	0	0	2	48.4463277	48.44632768	16.0880091	-	-
f_7	3	0	0	48.4007526	64.53433678	0.060766795	-	+
f_8	0	3	0	96.8926554	64.59510358	8.074387947	-	-
f_9	0	0	3	72.6694915	72.66949153	7.998429453	-	-
f_{10}	4	0	0	64.5343368	80.66792098	16.1335842	-	-
f_{11}	0	4	0	129.190207	96.80150517	0.091150193	-	+
f_{12}	0	0	4	96.8926554	96.89265537	0	-	+
f_{13}	5	0	0	80.667921	96.89265537	16.042434	-	-
f_{14}	0	5	0	161.487759	112.9350894	8.180729839	-	-
f_{15}	0	0	5	121.115819	121.1158192	7.952854356	-	-
f_{16}	6	0	0	96.8015052	129.0686736	0.121533591	-	+
f_{17}	0	6	0	193.785311	129.1902072	16.0120506	-	-
f_{18}	0	0	6	145.338983	145.2022578	0.13672529	-	+
f_{19}	7	0	0	112.935089	145.3389831	15.99685891	-	-
f_{20}	0	7	0	226.082863	161.335842	0.151916989	-	+
f_{21}	0	0	7	169.562147	161.4877589	8.074387947	-	-
f_{22}	8	0	0	129.068674	169.5621469	24.22316384	-	-
f_{23}	0	8	0	258.380414	193.7853107	0	-	+
f_{24}	0	0	8	193.785311	193.7853107	24.22316384	-	-
f_{25}	9	0	0	145.202258	218.0084746	8.074387947	-	-
f_{26}	0	9	0	290.677966	226.0828625	16.14877589	-	-
f_{27}	0	0	9	218.008475	242.2316384	16.14877589	-	-
f_{28}	10	0	0	161.335842	258.3804143	32.29755179	+	-
f_{29}	0	10	0	322.975518	290.6779661	32.29755179	+	-
f_{30}	0	0	10	242.231638	322.9755179			

Hacmin ilk aksiyel modu f_1=16.13 Hz de oluşmaktadır. Hacmin boy ekseninde ilk mod oluşmaktadır. Plan düzleminde, karşılıklı xz yüzeyleri arasında oluşan birinci aksiyel mod ile xy yüzeyleri arasında oluşan üçüncü aksiyel mod Şekil 4.66'da ve Şekil 4.67'de, 3 boyutlu görseli Şekil 4.68'de ve Şekil 4.69'da gösterilmektedir. Şekil 4.66 gösterim basınç değeri (Pa) üzerinden, minimum (0 Pa) ve maksimum (1 Pa) olarak ifade edilir. Eksi basınç değerleri hacmin orta ekseni orjin kabul edildiğinde basıncın konumunun zıt yönde olduğunu ifade eder.

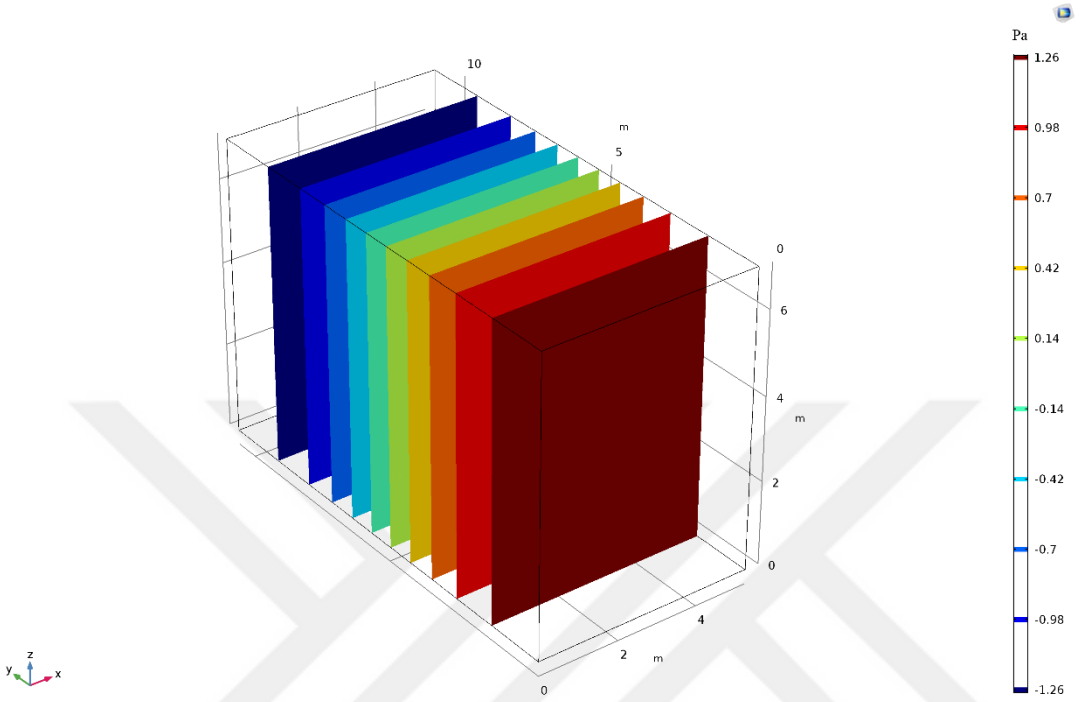


Şekil 4.66 : Plan düzleminde oluşan birinci aksiyel mod (xz yüzeyleri) f_1=16.13 Hz. in ses basıncı (Pa).

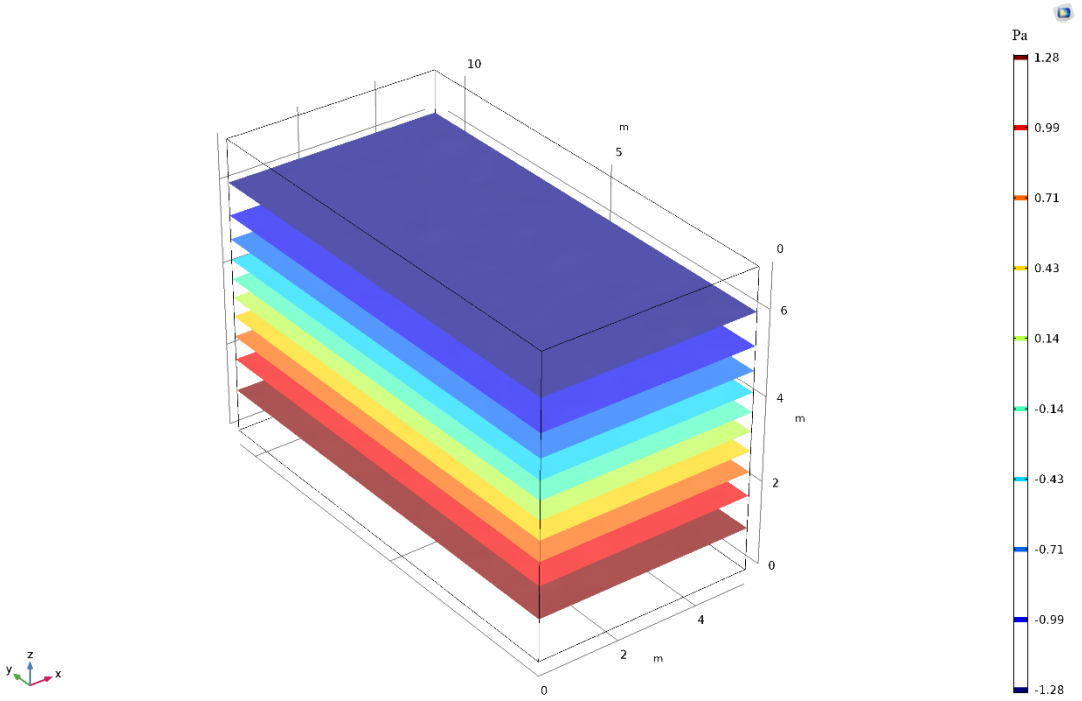


Şekil 4.67 : Plan düzleminde oluşan ikinci aksiyel mod (xy yüzeyleri) f_3=24.22 Hz. in ses basıncı (Pa).

Şekil 4.66'da ve Şekil 4.68'de gösterilen mod boy ekseni boyunca en eksenine paralel olarak oluşmaktadır. Şekil 4.68 ve Şekil 4.69 sadece Şekil 4.66 ve Şekil 4.67'nin ifadesinde kullanılan renklerin bir dilimlenme halini ifade eder. Yükseklik eksenindeki (z ekseni) ses basınç değerlerini ifade etmez.



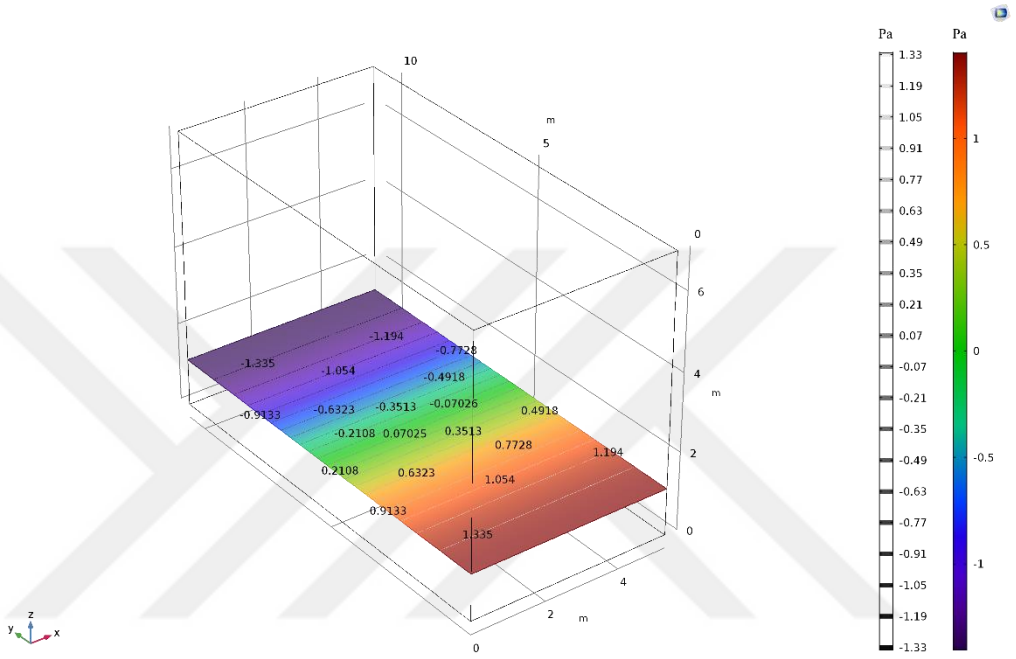
Şekil 4.68 : f_1=16.13 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).



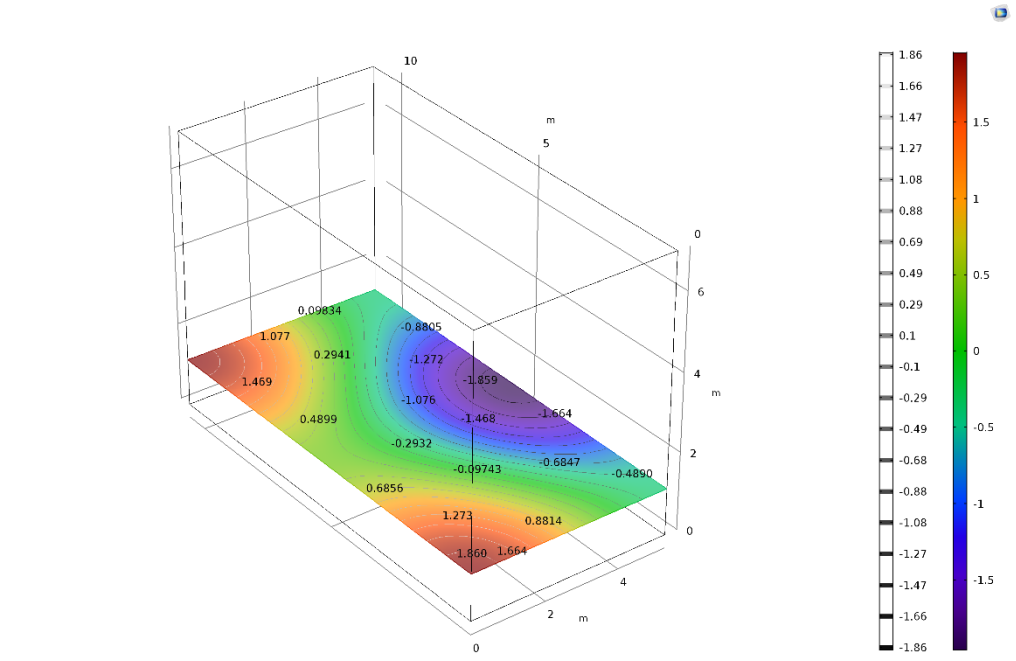
Şekil 4.69 : f_3=24.22 Hz. aksiyel modunun (xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).

Şekil 4.67 ve 4.69 hacmin tavan ve döşeme ekseni boyunca yatay düzlemde oluşan ikinci aksiyel modu gösterir. Birinci modun dağılımında gözlenen durum, hacmin ortasında basınç minimumu oluşumu bu modda da gözlemlenir. İki mod farazi olarak kesiştirildiğinde hacmin tam orta noktasında 0 basınç alanı oluşur.

Modun h=1.2 m farazi alıcı konumu düzlemindeki ses basınç değerleri Şekil 4.70'de gösterilmektedir.



A



B

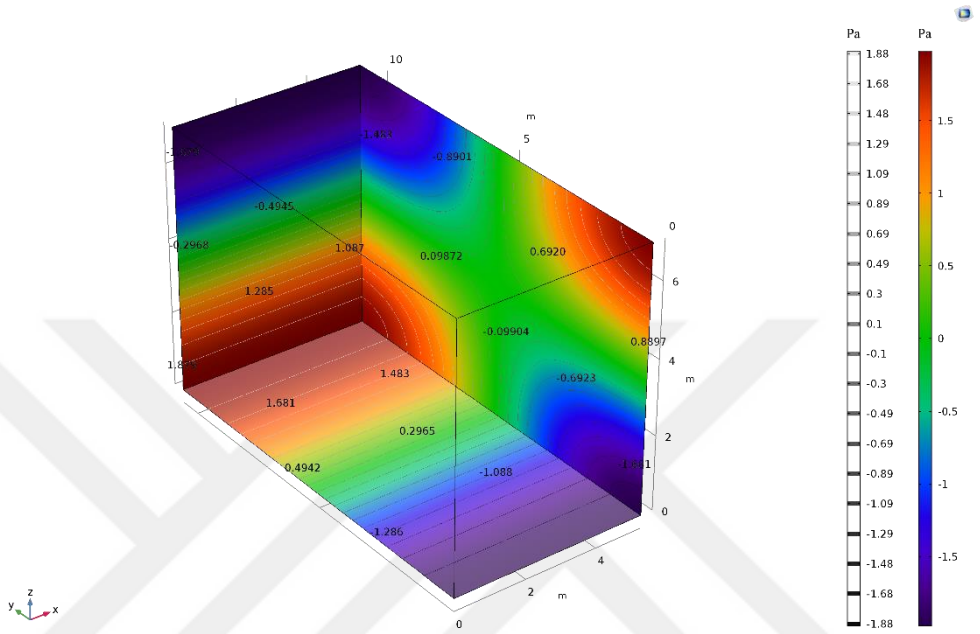
Şekil 4.70 : f_1=16.13 Hz. aksiyel modunun (A) ve f_2=32.29 Hz. oblik modunun (B) h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu.

1:0.75:1.5 oranlarındaki hacmin, aksiyel, teğet ve oblik mod frekansları Çizelge 4.13'te gösterilmektedir. Bu hacimde frekans bakımından ikinci aksiyel mod yatay düzlemde tavan ve döşeme ekseni boyunca oluşmaktadır.

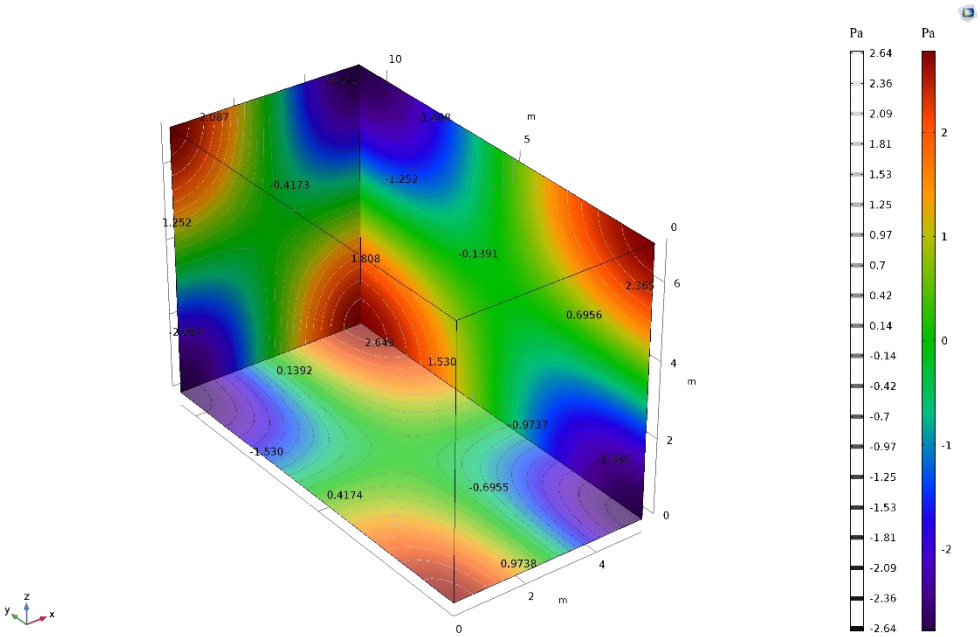
Çizelge 4.13 : 1:0.75:1.5 oranlarına sahip hacmin ilk 4 aksiyel,teğet ve oblik mod frekansları.

Mod Sayısı	Tam Sayı			Mod Frekansı	Artan Sırada Dizilim	Mod Mesafeleri	Renk.	
	p(L)	q(W)	r(H)				Gilford	Bonello
f_1	1	0	0	16.1335842	16.1335842	8.089579646		-
f_2	0	1	0	32.2975518	24.22316384	4.881031827		-
f_3	0	0	1	24.2231638	29.10419567	3.162972723		-
f_4	1	1	0	36.1029693	32.26716839	0.030383398		+
f_5	0	1	1	40.3719397	32.29755179	3.805417487		-
f_6	1	0	1	29.1041957	36.10296928	4.26897046		-
f_7	1	1	1	43.47627	40.37193974	3.104330309		-
f_8	2	0	0	32.2671684	43.47627005	4.924482541		-
f_9	0	2	0	64.5951036	48.40075259	0.045575097		+
f_{10}	0	0	2	48.4463277	48.44632768	9.762063653		-
f_{11}	2	2	0	72.2059386	58.20839134	6.325945446		-
f_{12}	0	2	2	80.7438795	64.53433678	0.060766795		+
f_{13}	2	0	2	58.2083913	64.59510358	7.610834974		-
f_{14}	2	2	2	86.9525401	72.20593855	0.463552973		+
f_{15}	3	0	0	48.4007526	72.66949153	7.998429453		-
f_{16}	0	3	0	96.8926554	80.66792098	0.075958494		+
f_{17}	0	0	3	72.6694915	80.74387947	6.208660618		-
f_{18}	3	3	0	108.308908	86.95254009	0.360046914		+
f_{19}	0	3	3	121.115819	87.31258701	9.488918169		-
f_{20}	3	0	3	87.312587	96.80150517	0.091150193		+
f_{21}	3	3	3	130.42881	96.89265537	0		+
f_{22}	4	0	0	64.5343368	96.89265537	11.41625246		-
f_{23}	0	4	0	129.190207	108.3089078	4.626181541		+
f_{24}	0	0	4	96.8926554	112.9350894	3.481693304		+
f_{25}	4	4	0	144.411877	116.4167827	4.699036535		+
f_{26}	0	4	4	161.487759	121.1158192	0		+
f_{27}	4	0	4	116.416783	121.1158192	7.952854356		-
f_{28}	4	4	4	173.90508	129.0686736	0.121533591		+

Tüm aksiyel,teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modlar daha önceki oranlara benzer konum ve şekil özellikleri gösterir. Teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modların ait basınç maksimumları hacmin köşe kesişim noktalarında oluşur. Şekil 4.71 ve Şekil 4.72 hacmin ilk teğet ve oblik modunu gösterir.

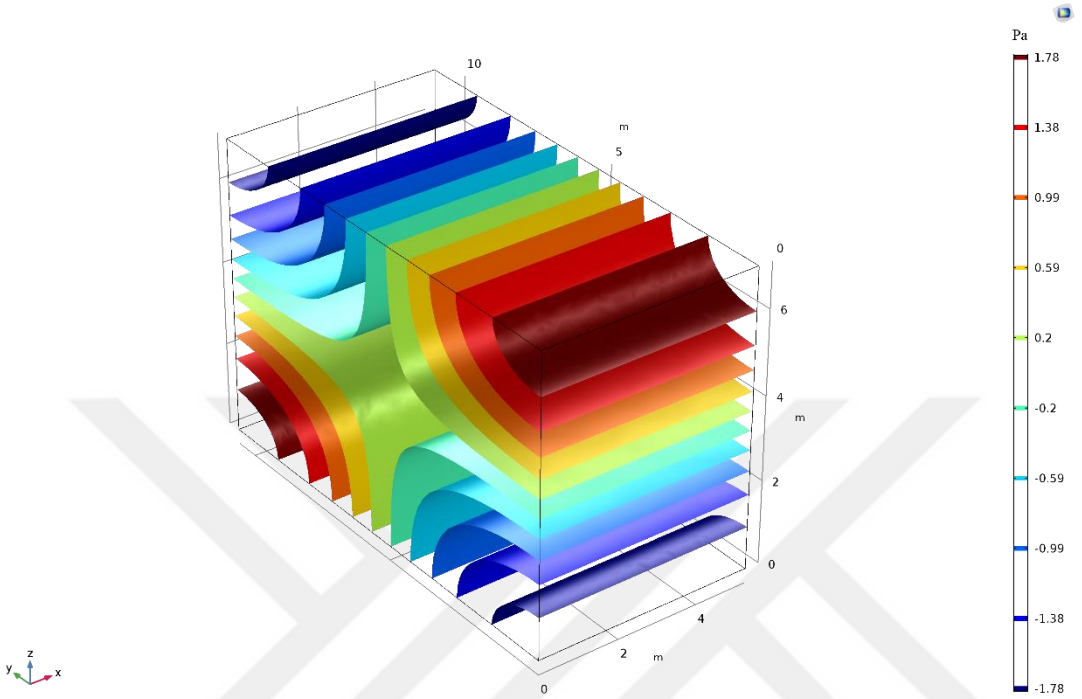


Şekil 4.71 : f_6=29.10 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

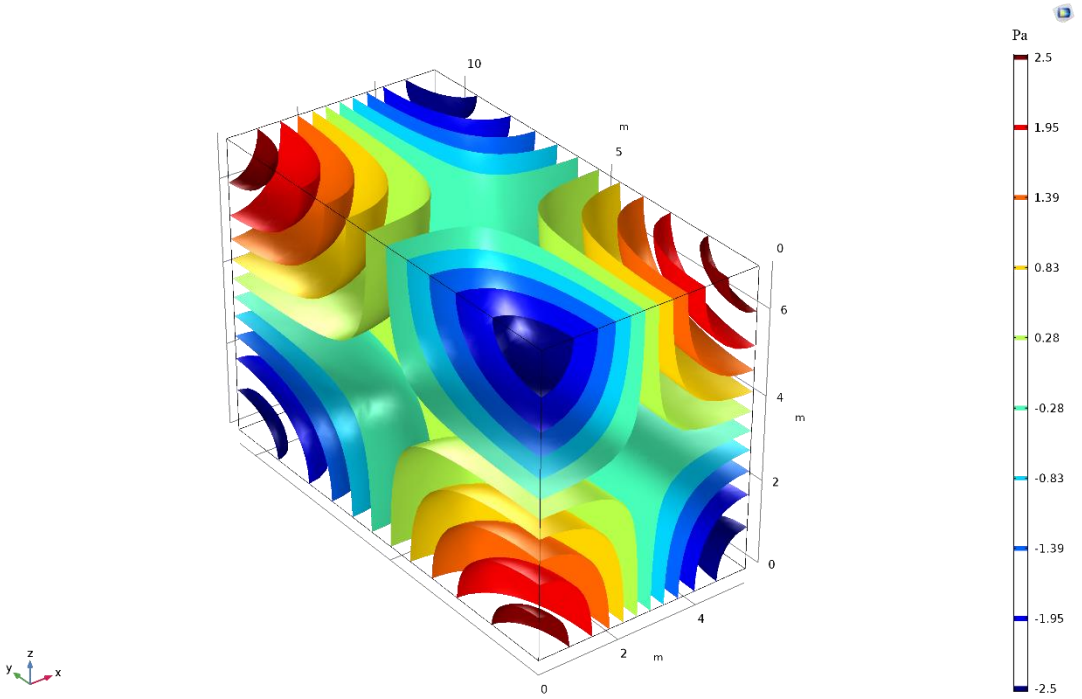


Şekil 4.72 : f_7=43.47 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

Şekil 4.73 ve Şekil 4.74 hacmin ilk teğet ve oblik modunun 3 boyutlu gösterimidir. 4 duvar yüzeyini dolaşan dalganın oluşturduğu ses yayılımının tabana da etkisi olmaktadır. Duvar yüzeylerinin kendi içinde ses basıncının yayılımını görüyoruz. 4 köşe birleşiminde ses basıncının yükseldiği görülmektedir.

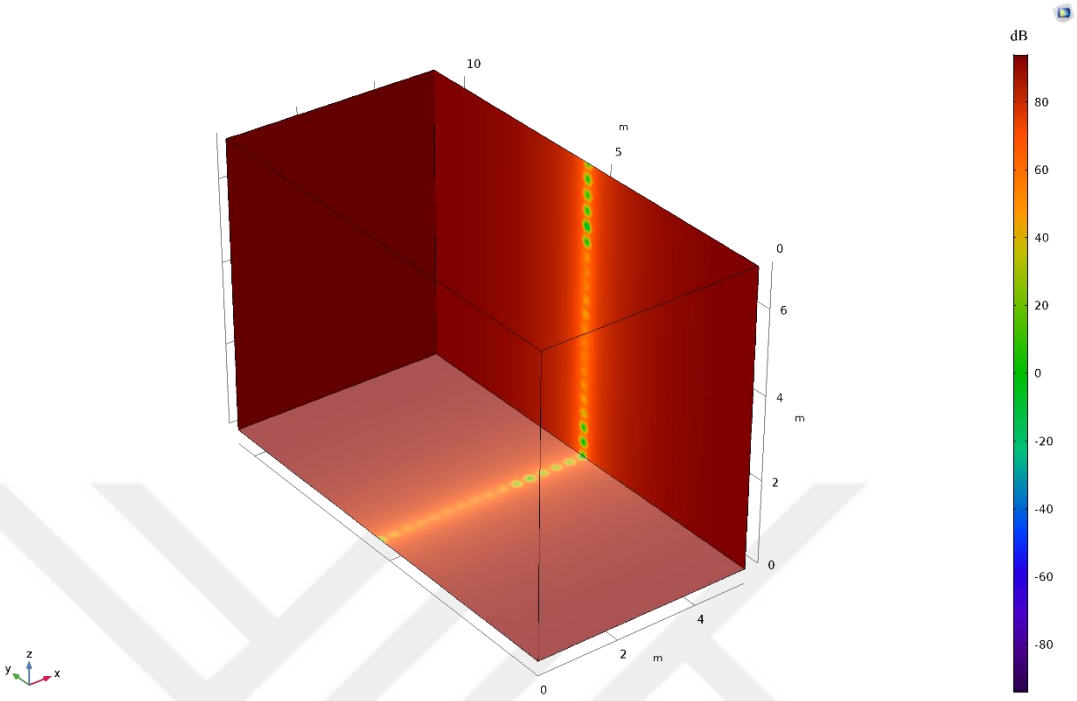


Şekil 4.73 : f_6=29.10 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).



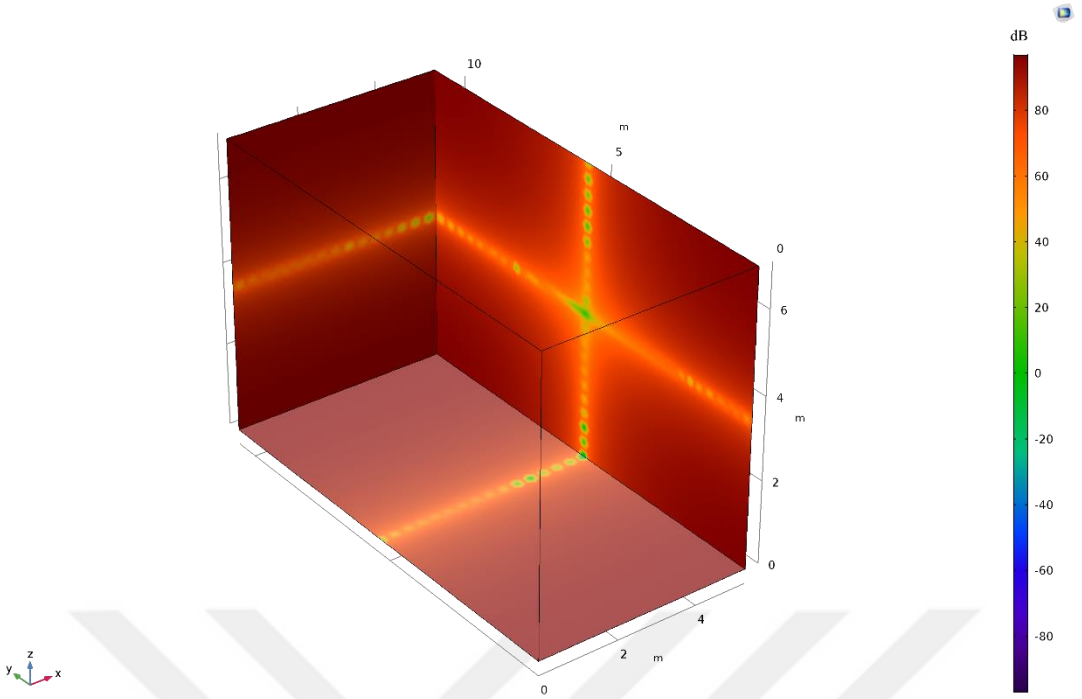
Şekil 4.74 : f_7=43.47 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).

Şekil 4.75, 4.76, 4.77 hacmin ilk aksiyel, teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modlarının ses basınç düzeylerini gösterir.

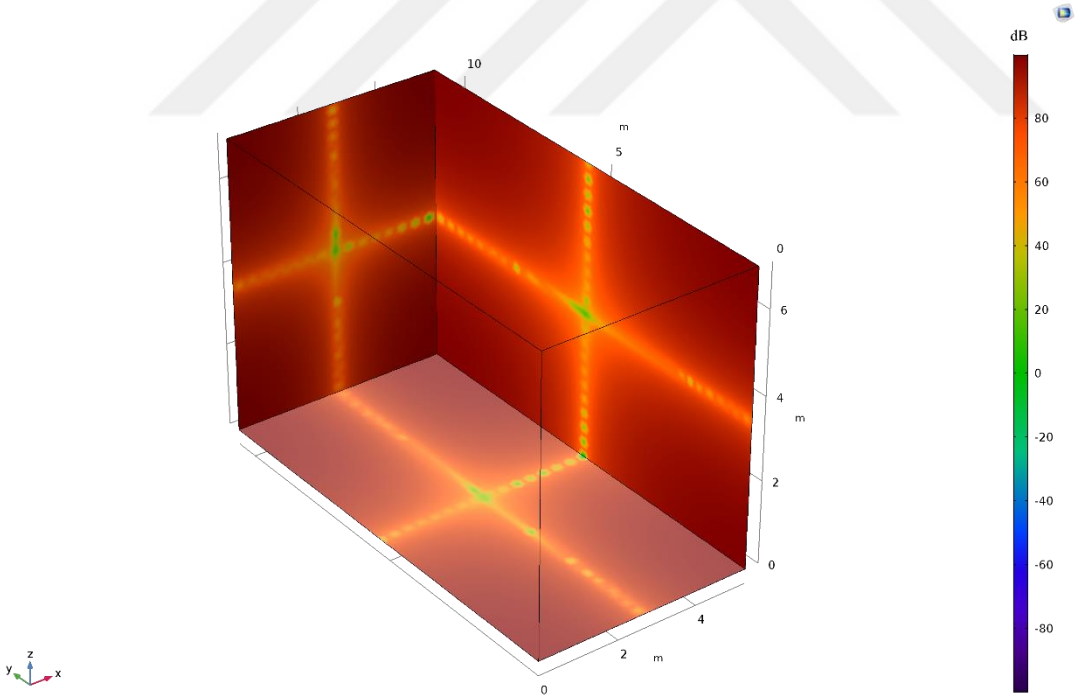


Şekil 4.75 : f_1=16.13 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).

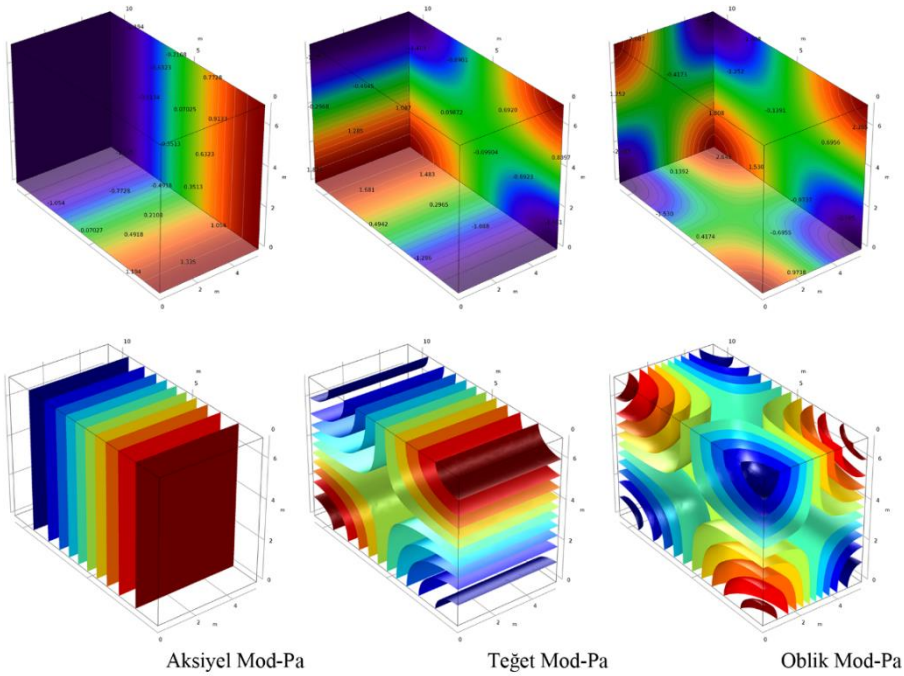
Desibel cinsinden ses basınç düzeyi üzerinden ifade edilir ise; f_1=16.13 aksiyel modu hacmin uzun kenarının orta noktasından kısa kenara paralel uzanan bir 0 basınç çizgisi oluşturur. f_2=32.29 aksiyel modu kısa kenarın orta noktasından uzun kenara paralel uzanan bir 0 basınç çizgisi oluşturur. f_6=29.10 teğet modu birinci ve ikinci aksiyel modların aynı düzlemde kesişimi biçiminde, kısa ve uzun kenarların orta noktalarından; kısa ve uzun kenarlara paralel iki adet 0 basınç çizgisi oluşturur. Bu çizgiler hacmin merkez noktasında kesişir. f_7=43.47 oblik modu tüm yüzeylerin en ve boy çizgilerine paralel ve orta noktalarında kesişen ve bunu hacmim üç yüzeyinde de tekrar eden bir 6 adet 0 basınç çizgisi oluşturur. Bu çizgiler üzerindeki basınç dağılımı yüzey merkezlerinden kenarlarına doğru artan basınç şeklindedir. Odanın köşelerini saran çeyrek küre biçimli bu ses basınç alanları modların köşe noktalarda aktif olduğunu, bu noktalara gelen sesin modal etkileşimi harekete geçireceğini gösterir. Oda merkezine konulacak herhangi bir kaynak aksiyel ve teğet modlar tarafından oluşturulan sıfır basınç noktasında konumlanır ve mod etkileşimi köşelere göre zayıftır.



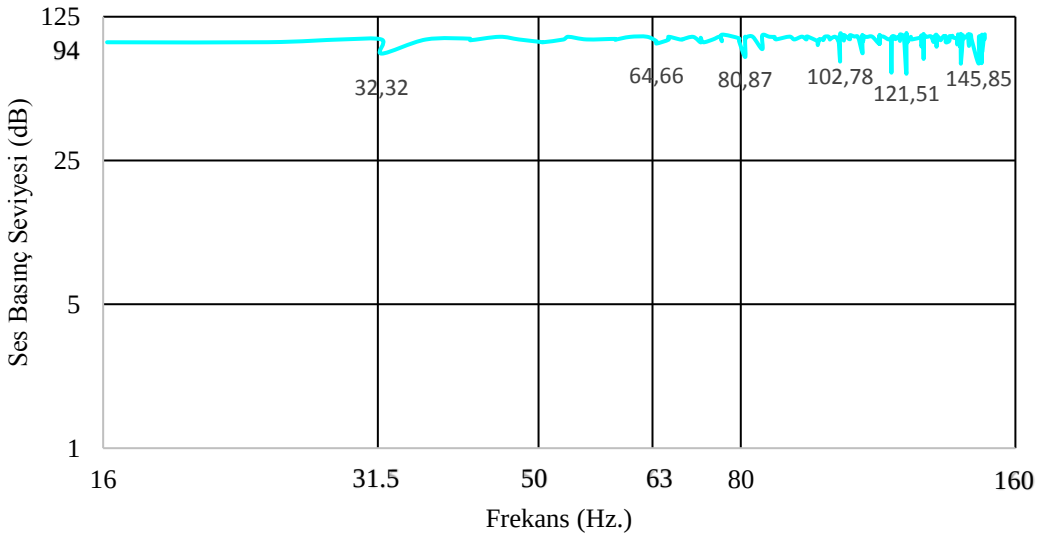
Şekil 4.76 : f_6=29.10 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).



Şekil 4.77 : f_7=43.47 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).



Şekil 4.78 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) ve ses basnç düzeyi (dB) gösterimleri.



Şekil 4.79 : 1:0.75:1.5 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi.

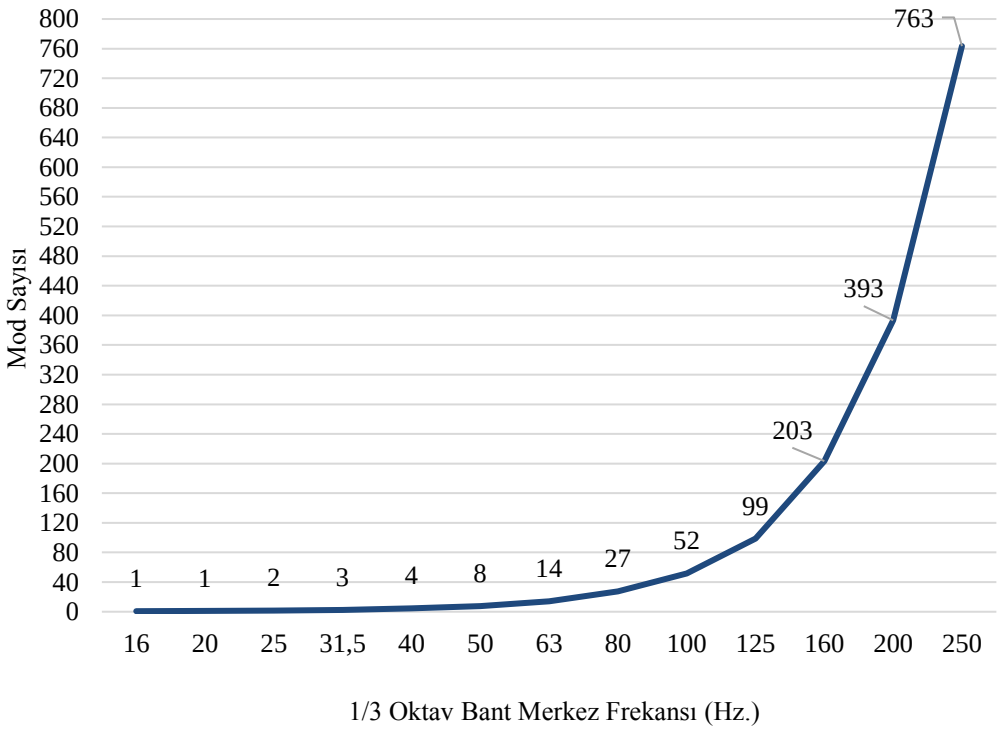
1:0.75:1.5 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekans değerlerinden itibaren vadi ve tepe noktaları oluşturur. 16 Hz. ile 63 Hz. arasında vadi ve tepe noktaları seyrek ve azdır. 80 Hz. üzerinde ses basınç düzeyinin daha sık tepe ve vadiler oluşturduğu görülür. Spektrum boyunca oluşan tepe ve vadi noktaları düzensizdir. 90 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 96 dB ile 66 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir.

4.2.6 Alberti oranın değerlendirilmesi, 1:0.4:0.6

Bu hacmin aksiyel modları denklem 2.6 ile hesaplanmıştır. Hacmin mod sayısı denklem 2.7'ye göre hesaplanır. Modlar arasındaki mesafe denklem 2.8 ile hesaplanır.

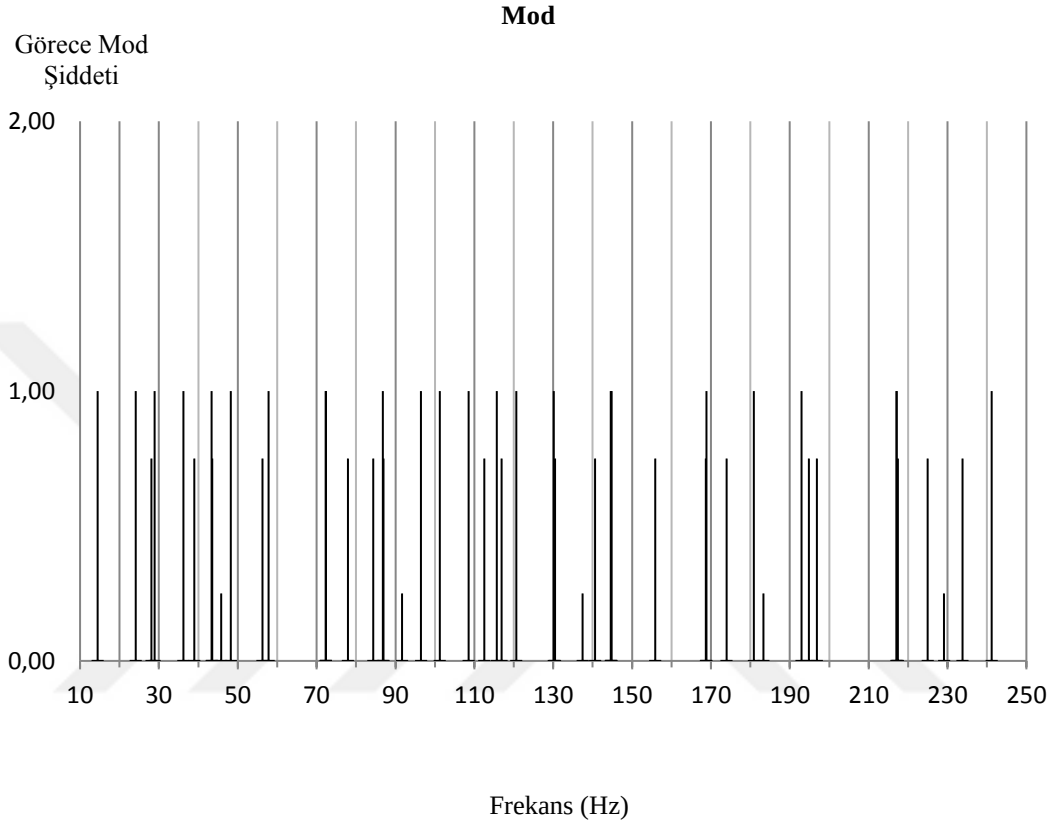
Gilford tarafından ifade edilen mod aralığı kriterine göre aksiyel modlar arasındaki mesafe 20 Hz.'den fazla olmamalıdır. 1:0.4:0.6 oranlarına sahip hacimde bu mesafe 0.1 Hz.ile 14 Hz. arasında frekanslara göre değişen bir skalada hesaplanmaktadır. Bonello kriterleri açısından incelendiğinde modlar arasındaki mesafe; ilgili modun frekansının %5'i kadar olmalıdır. Hacimdeki en düşük frekanslı aksiyel mod için bu 14.46 x 5/100 = 0.723 Hz. olarak hesaplanır. Yani modlar arasında yaklaşık 1 Hz. kadar mesafe olmalıdır. Olay hacimde üçüncü aksiyel mod frekansı ile en yakın diğer mod frekansı (birinci aksiyel mod) arasında 9.66 Hz. mesafe bulunmaktadır. Dikdörtgen prizma şeklindeki hacim Gilford ve Bonello tarafından ifade edilen mod aralığı kriterlerini sağlamamaktadır.

Modal yoğunluk frekans arttıkça artar. Frekansa bağlı mod sayısı Şekil 4.80'de görülmektedir. Hacmin modal yoğunluğu düzgün bir eğimde spektrum boyunca artar. 40 Hz. altındaki frekanslarda artış eğimi yataya yakındır. 50 Hz. üzerinde eğim daha hızlı bir artış göstermektedir.



Şekil 4.80 : 1:0.4:0.6 oranlı hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı.

Şekil 4.81 hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarına ait modal yoğunluğunu ve dağılımını göstermektedir. Modların yansımalardan kaynaklı enerji düşüşleri ve farkları üzerinden modların ifadesi için bir ölçek oluşturulmuştur. Modlar düşey eksende farklı görece mod şiddetleri ile ifade edilirler. Aksiyel mod=1, teğet mod=0.75 ve oblik mod=0.25 değeri ile ifade edilir.



Şekil 4.81 : 1:0.4:0.6 oranlı hacmin modal yoğunluk grafiği.

Şekil 4.81'deki ve Çizelge 4.14'teki verileri incelersek, sadece bir boyut (eksen) tarafından desteklenen tekil frekanslar mevcut olmakla birlikte iki veya daha fazla eksen tarafından desteklenen modlar da (1,0,1 modu ile 0,0,2; 0,2,0 modu ile 3,0,0 modu) mevcuttur. Bu durum oda oranlarının ortak bir bölene sahip olmalarından kaynaklanır. Spektrum boyunca modların dağılımı belirli gölgeler dışında düzenlidir. Spektrum grafiği belirli frekanslarda sıklaşırken belirli frekans aralıklarında seyrelir. Modlar arasındaki mesafe 30 Hz, 85 Hz ve 130 Hz arasında azdır. 65 Hz ile 70 Hz frekans aralığında, 155Hz le 170 Hz frekans aralığında ve 200 Hz ile 215 Hz frekans aralığında arasında mod yoğunluğu çok azdır. Spektrum boyunca modlar arası mesafe belirli frekans aralıklarında düzensizlik gösterir. Modların birbirine mesafeleri

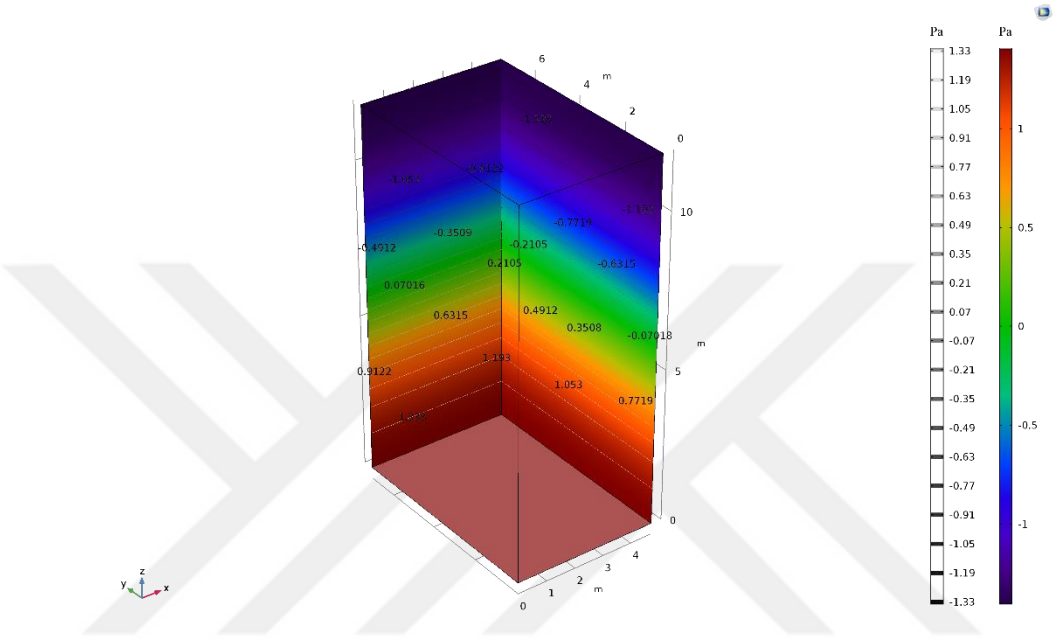
bakımından hacim Bonello kriterini sağlamamaktadır. Frekansla birlikte artan mod sayısına rağmen hacim modal özellikleri bakımından uygun şartları sağlamaz.

1:0.4:0.6 oranlarındaki dikdörtgen prizma şeklindeki hacmin aksiyel mod frekansları Çizelge 4.14'te gösterilmektedir.

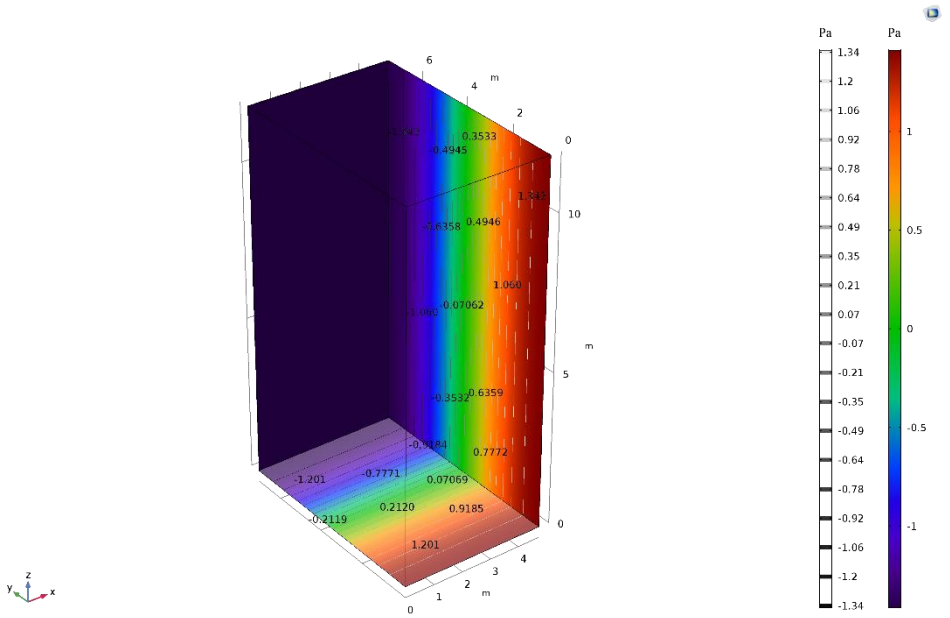
Çizelge 4.14 : 1:0.4:0.6 oranlarına sahip hacmin ilk 30 aksiyel mod frekansları

Mod Sayısı	Tam Sayı			Mod Frekansı	Artan Sırada Dizilim	Mod Mesafeleri	Renk.	
	p(L)	q(W)	r(H)				Gilford	Bonello
f_1	1	0	0	24.1209564	14.46037099	9.660585404	-	-
f_2	0	1	0	36.1814346	24.1209564	4.79978559	-	-
f_3	0	0	1	14.460371	28.92074199	7.260692609	-	-
f_4	2	0	0	48.2419128	36.1814346	7.199678386	-	-
f_5	0	2	0	72.3628692	43.38111298	4.860799814	-	-
f_6	0	0	2	28.920742	48.2419128	9.599571181	-	-
f_7	3	0	0	72.3628692	57.84148398	14.46037099	-	-
f_8	0	3	0	108.544304	72.30185497	0.061014224	-	+
f_9	0	0	3	43.381113	72.3628692	0	-	+
f_{10}	4	0	0	96.4838256	72.3628692	14.39935677	-	-
f_{11}	0	4	0	144.725738	86.76222597	9.721599628	-	-
f_{12}	0	0	4	57.841484	96.4838256	4.738771367	-	+
f_{13}	5	0	0	120.604782	101.222597	7.321706833	-	-
f_{14}	0	5	0	180.907173	108.5443038	7.138664162	-	-
f_{15}	0	0	5	72.301855	115.682968	4.921814038	-	+
f_{16}	6	0	0	144.725738	120.604782	9.538556957	-	-
f_{17}	0	6	0	217.088608	130.143339	14.46037099	-	-
f_{18}	0	0	6	86.762226	144.6037099	0.122028447	-	+
f_{19}	7	0	0	168.846695	144.7257384	0	-	+
f_{20}	0	7	0	253.270042	144.7257384	24.1209564	+	-
f_{21}	0	0	7	101.222597	168.8466948	12.0604782	-	-
f_{22}	8	0	0	192.967651	180.907173	12.0604782	-	-
f_{23}	0	8	0	289.451477	192.9676512	24.1209564	+	-
f_{24}	0	0	8	115.682968	217.0886076	0	-	+
f_{25}	9	0	0	217.088608	217.0886076	24.1209564	+	-
f_{26}	0	9	0	325.632911	241.209564	12.0604782	-	-
f_{27}	0	0	9	130.143339	253.2700422	36.1814346	-	-
f_{28}	10	0	0	241.209564	289.4514768	36.1814346	-	-
f_{29}	0	10	0	361.814346	325.6329114	36.1814346	-	-
f_{30}	0	0	10	144.60371	361.814346			

Hacmin ilk aksiyel modu f_3=14.46 Hz de oluşmaktadır. Hacmin tavan döşeme ekseni boyunca yatay düzlemde ilk mod oluşmaktadır. Bu durumun sebebi, yükseklik boyutunun diğer boyutlara kıyasla daha büyük olmasından dolayıdır. Plan düzleminde, karşılıklı xy yüzeyleri arasında oluşan üçüncü aksiyel mod ile xz yüzeyleri arasında oluşan birinci aksiyel mod Şekil 4.82'de ve Şekil 4.83'te, 3 boyutlu görseli Şekil 4.84'te ve Şekil 4.85'te gösterilmektedir.

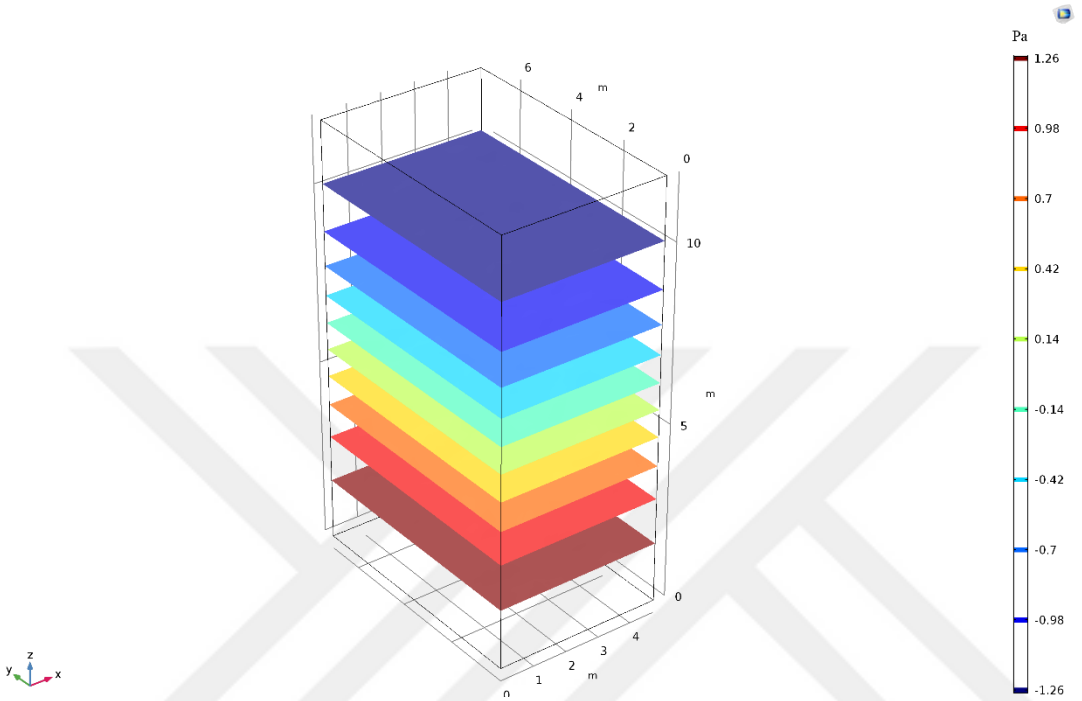


Şekil 4.82 : Hacimde oluşan birinci aksiyel mod (xy yüzeyleri) f_3=14.46Hz. in ses basıncı (Pa).

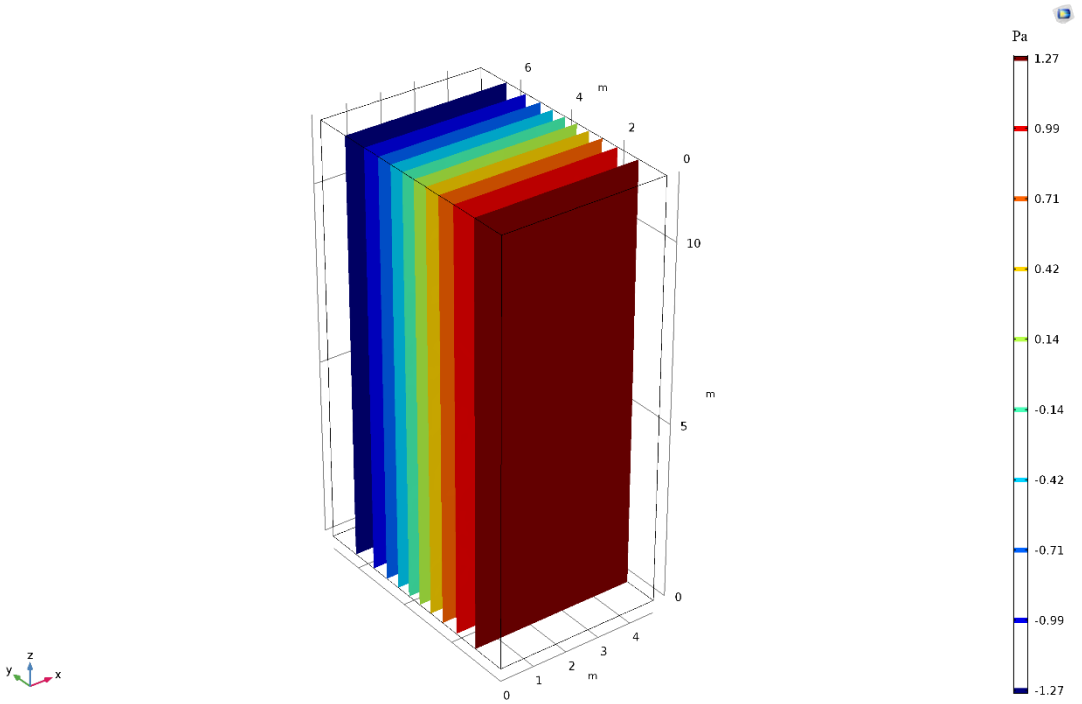


Şekil 4.83 : Hacimde oluşan ikinci aksiyel mod (xz yüzeyleri) f_1=24.12 Hz. in ses basıncı (Pa).

Şekil 4.82 ve Şekil 8.83'te gösterim basınç değeri (Pa) üzerinden, minimum (0 Pa) ve maksimum (1 Pa) olarak ifade edilir. Eksi basınç değerleri hacmin orta ekseni orjin kabul edildiğinde basıncın konumunun zıt yönde olduğunu ifade eder. Şekil 4.84'te gösterilen mod hacmin xy düzlemine (tavan döşeme yüzeylerine) paralel yükseklik boyunca oluşmaktadır.



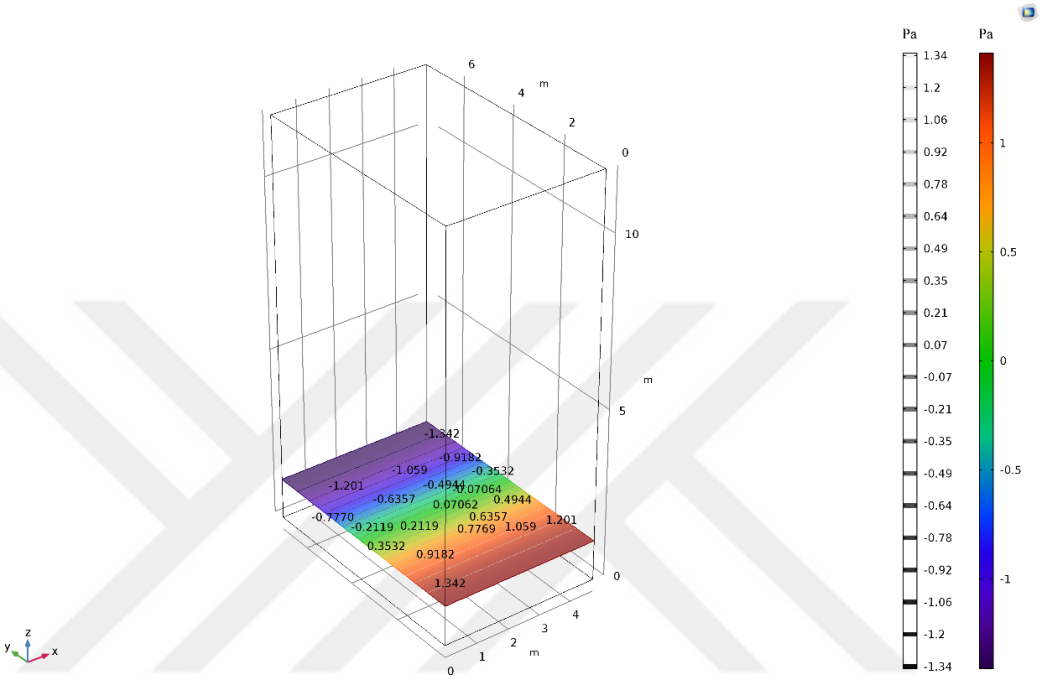
Şekil 4.84 : f_3=14.46 Hz. aksiyel modunun (xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).



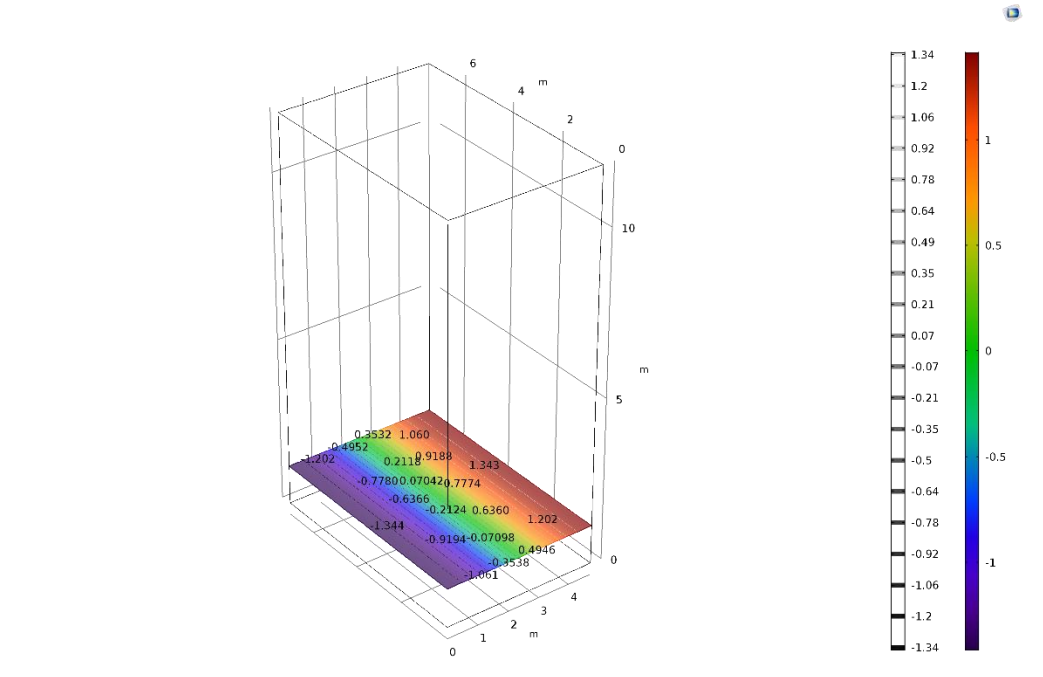
Şekil 4.85 : f_1=24.12 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).

Şekil 4.83 ve 4.85 hacmin en duvarları üzerinde oluşan aksiyel modu gösterir. Hacmin boyutlarına bağlı olarak en düşük frekansa sahip ilk mod karşılıklı xy yüzeyleri, ikinci mod karşılıklı xz yüzeyleri arasında oluşur.

Modun h=1.2 m farazi alıcı konumu düzlemindeki ses basınç değerleri Şekil 4.86'da gösterilmektedir.



A



B

Şekil 4.86 : f_1=24.12 Hz. aksiyel modunun (A) ve f_2=36.18 Hz. oblik modunun (B) h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu.

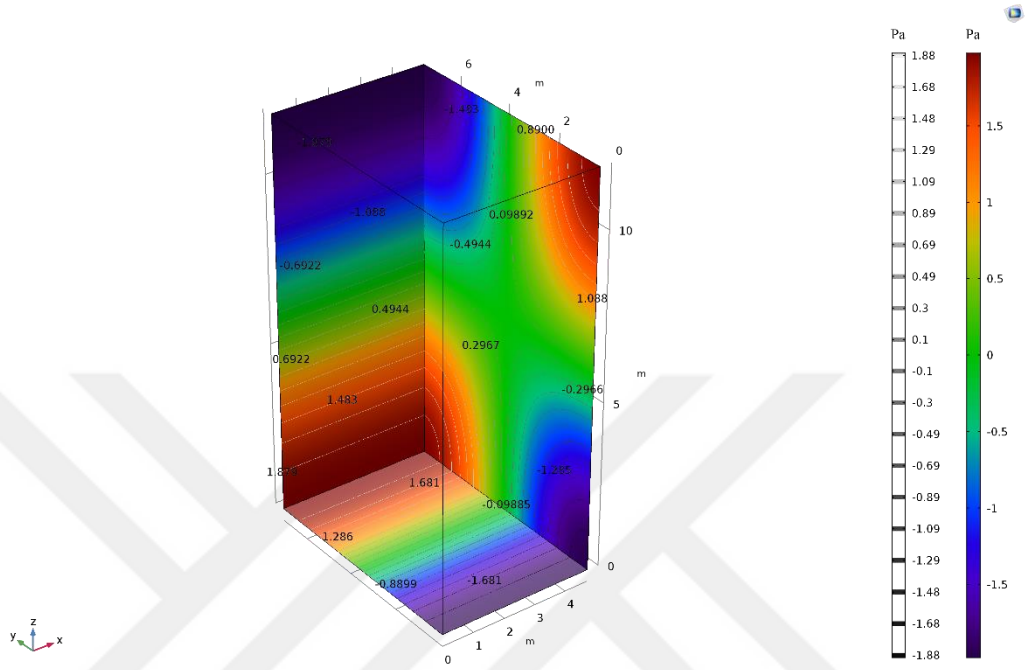
Şekil 4.84 ve Şekil 4.85 sadece Şekil 4.82 ve Şekil 4.83'ün ifadesinde kullanılan renklerin bir dilimlenme halini ifade eder. Yükseklik eksenindeki (z ekseni) ses basınç değerlerini ifade etmez.

1:0.4:0.6 oranlarındaki hacmin, aksiyel, teğet ve oblik mod frekansları Çizelge 4.15'te gösterilmektedir.

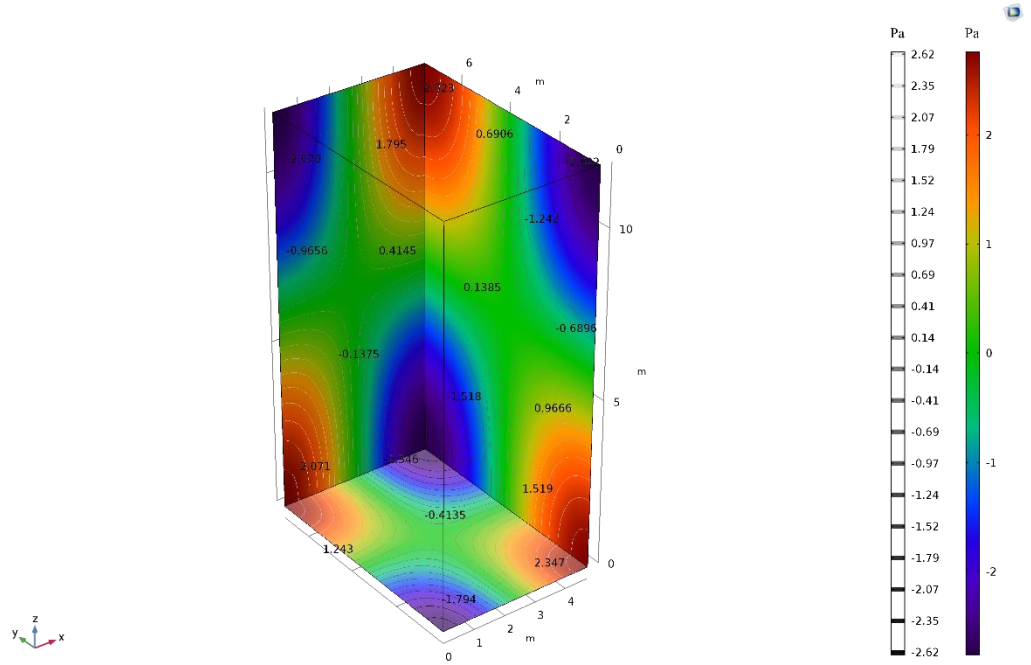
Çizelge 4.15 : 1:0.4:0.6 oranlarına sahip hacmin ilk 4 aksiyel,teğet ve oblik mod frekansları.

Mod Sayısı	Tam Sayı			Mod Frekansı	Artan Sırada Dizilim	Mod Mesafeleri	Renk.	
	p(L)	q(W)	r(H)				Gilford	Bonello
f_1	1	0	0	24.1209564	14.46037099	9.660585404		-
f_2	0	1	0	36.1814346	24.1209564	4.00239452		-
f_3	0	0	1	14.460371	28.12335092	0.79739107		+
f_4	1	1	0	43.4846726	28.92074199	7.260692609		-
f_5	0	1	1	38.9640673	36.1814346	2.78263268		-
f_6	1	0	1	28.1233509	38.96406728	4.417045705		-
f_7	1	1	1	45.8259651	43.38111298	0.103559571		+
f_8	2	0	0	48.2419128	43.48467256	2.341292536		+
f_9	0	2	0	72.3628692	45.82596509	2.415947707		-
f_{10}	0	0	2	28.920742	48.2419128	8.00478904		-
f_{11}	2	2	0	86.9693451	56.24670184	1.594782141		+
f_{12}	0	2	2	77.9281346	57.84148398	14.46037099		-
f_{13}	2	0	2	56.2467018	72.30185497	0.061014224		+
f_{14}	2	2	2	91.6519302	72.3628692	0		+
f_{15}	3	0	0	72.3628692	72.3628692	5.565265361		-
f_{16}	0	3	0	108.544304	77.92813456	6.441918199		-
f_{17}	0	0	3	43.381113	84.37005276	2.392173211		+
f_{18}	3	3	0	130.454018	86.76222597	0.207119142		+
f_{19}	0	3	3	116.892202	86.96934511	4.682585072		+
f_{20}	3	0	3	84.3700528	91.65193018	4.831895414		+
f_{21}	3	3	3	137.477895	96.4838256	4.738771367		+
f_{22}	4	0	0	96.4838256	101.222597	7.321706833		-
f_{23}	0	4	0	144.725738	108.5443038	3.94909988		+
f_{24}	0	0	4	57.841484	112.4934037	3.189564282		+
f_{25}	4	4	0	173.93869	115.682968	1.209233879		+
f_{26}	0	4	4	155.856269	116.8922018	3.712580159		+
f_{27}	4	0	4	112.493404	120.604782	9.538556957		-
f_{28}	4	4	4	183.30386	130.143339	0.310678713		+

Teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modlarına ait basınç maksimumları hacmin köşe kesişim noktalarında oluşur. Teğet mod hacmin 4 köşesinde oluşur. Oblik mod hacmin 8 köşesinde oluşur. Şekil 4.87 ve Şekil 4.88 hacmin ilk teğet ve oblik modunu gösterir.

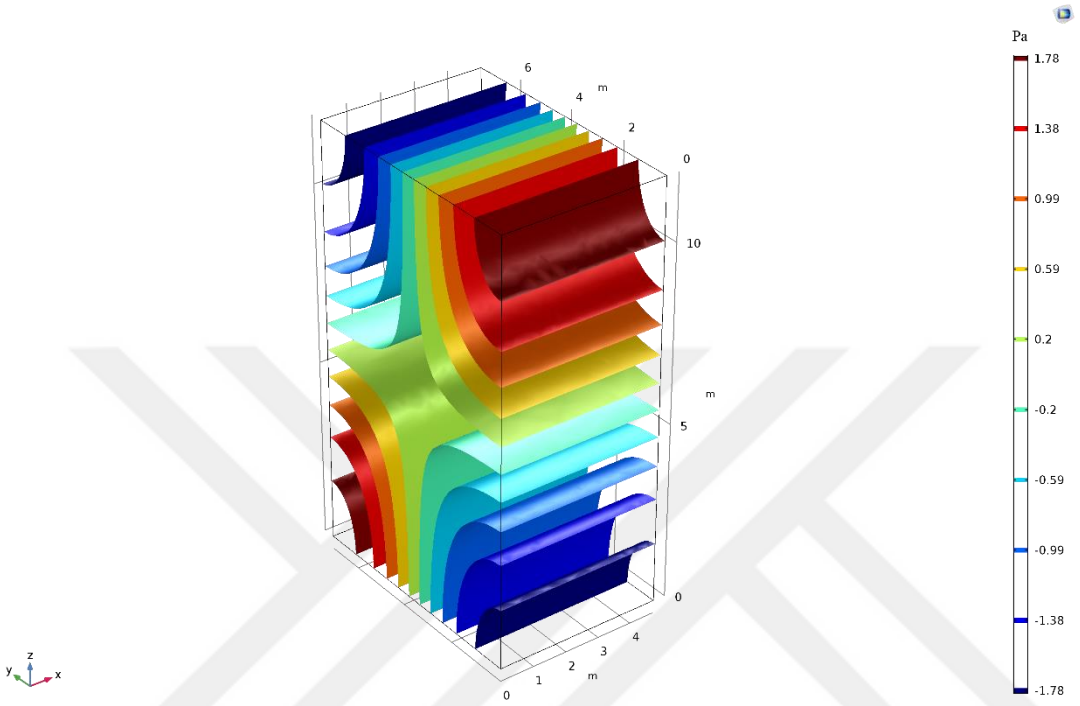


Şekil 4.87 : f_6=28.12 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

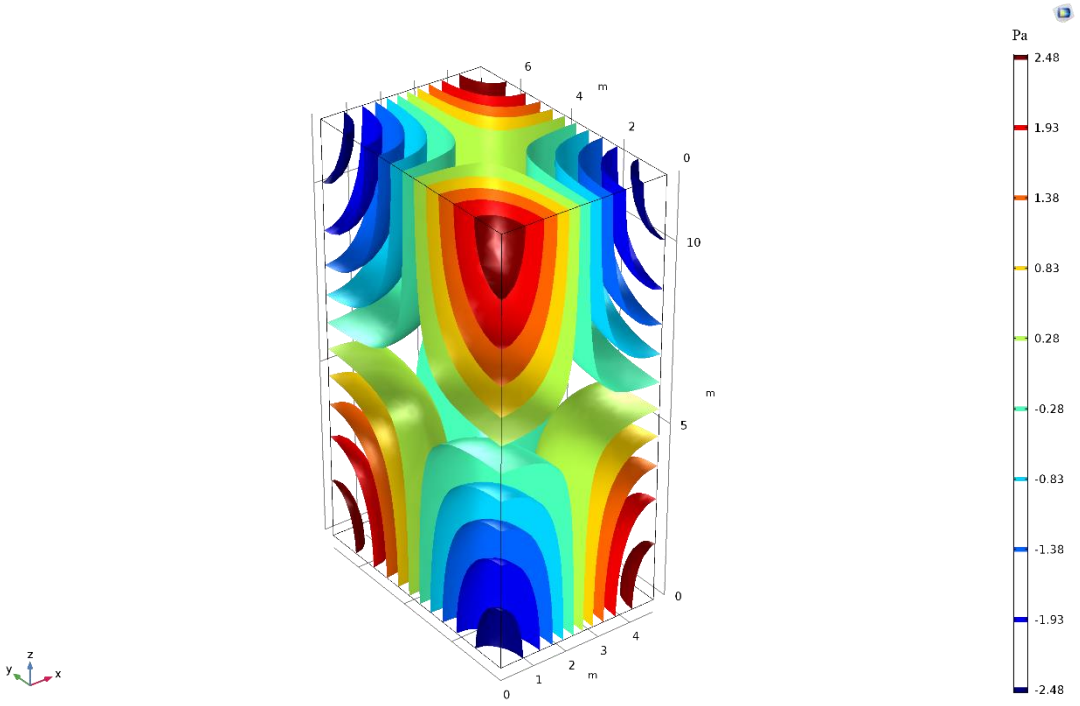


Şekil 4.88 : f_7=45.82 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

4 duvar yüzeyini dolaşan dalganın oluşturduğu ses yayılımının tabana da etkisi olmaktadır. Duvar yüzeylerinin kendi içinde ses basıncının yayılımını görüyoruz. 4 köşe birleşiminde ses basıncının yükseldiği görülmektedir. Şekil 4.89 ve Şekil 4.90 hacmin ilk teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modunun 3 boyutlu gösterimidir.

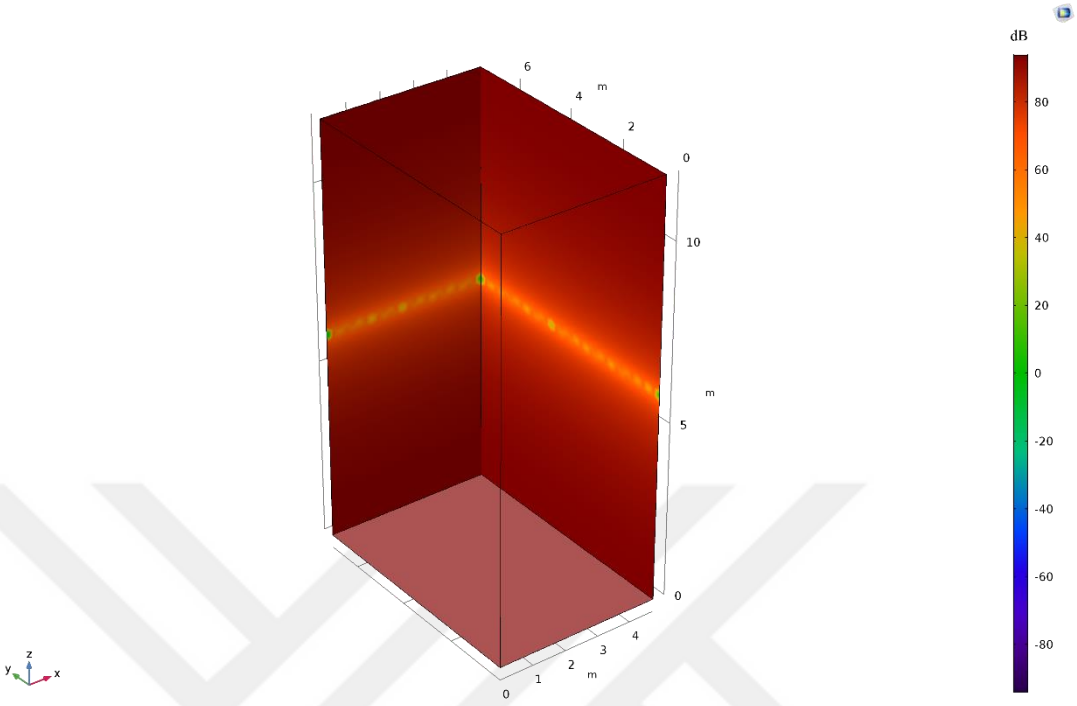


Şekil 4.89 : f_6=28.12 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi.



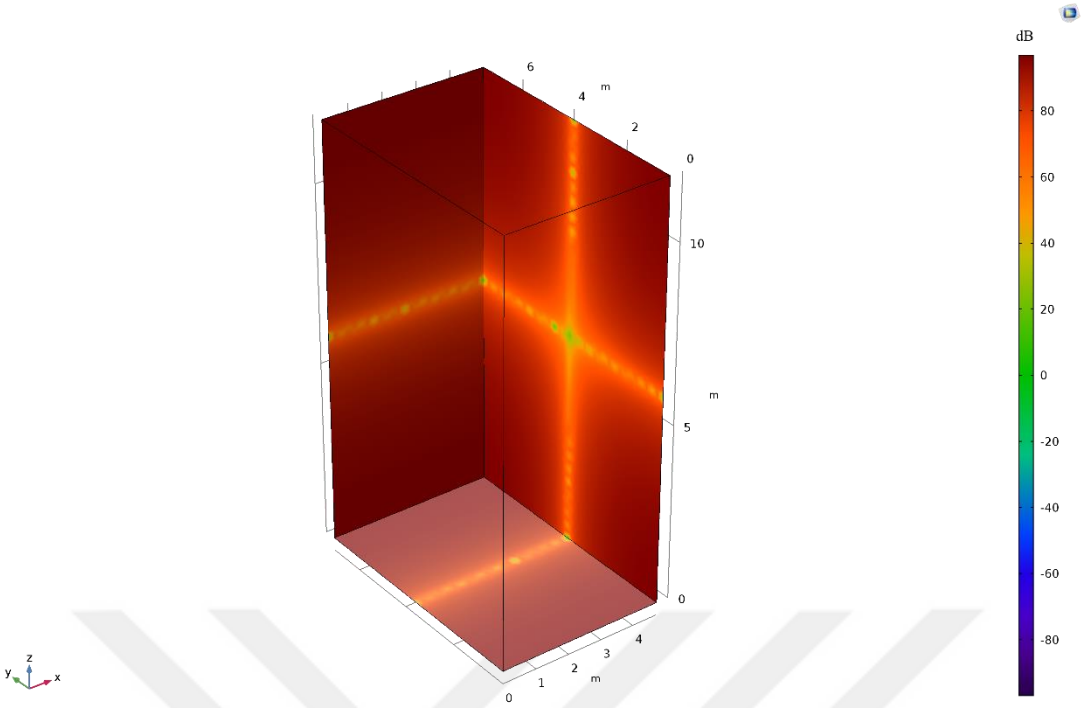
Şekil 4.90 : f_7=45.82 Hz. oblik modunun oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi.

Şekil 4.91, 4.92, 4.93 hacmin ilk aksiyel, teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modlarının ses basınç düzeylerini gösterir.

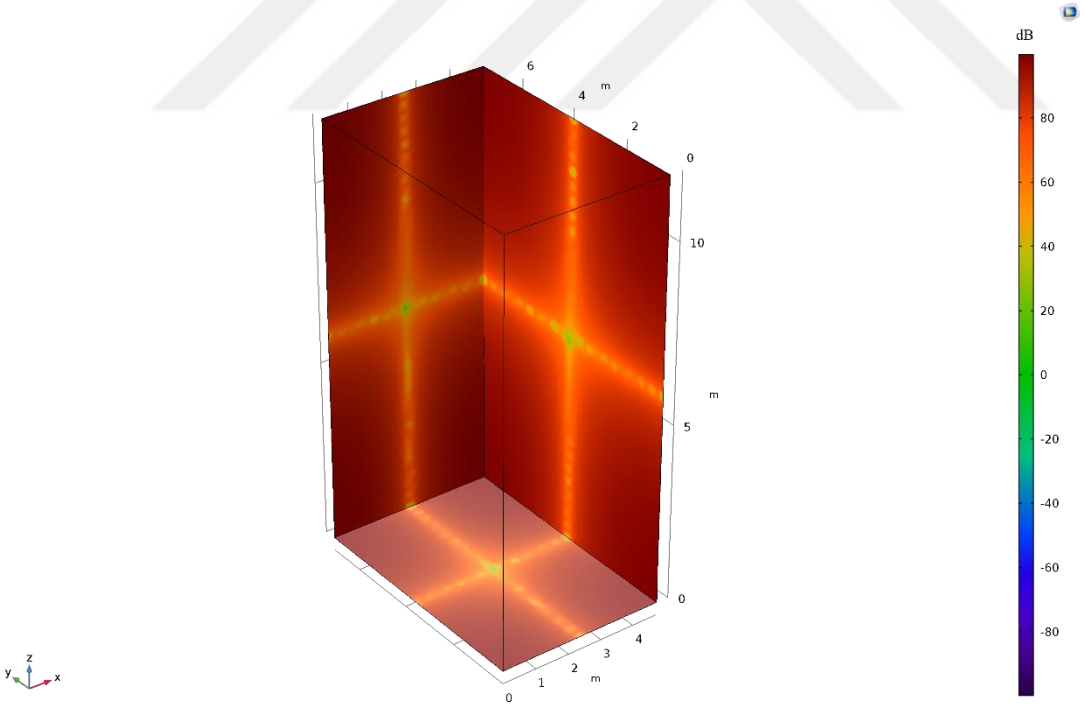


Şekil 4.91 : f_3=14.46 Hz. aksiyel modunun (yz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).

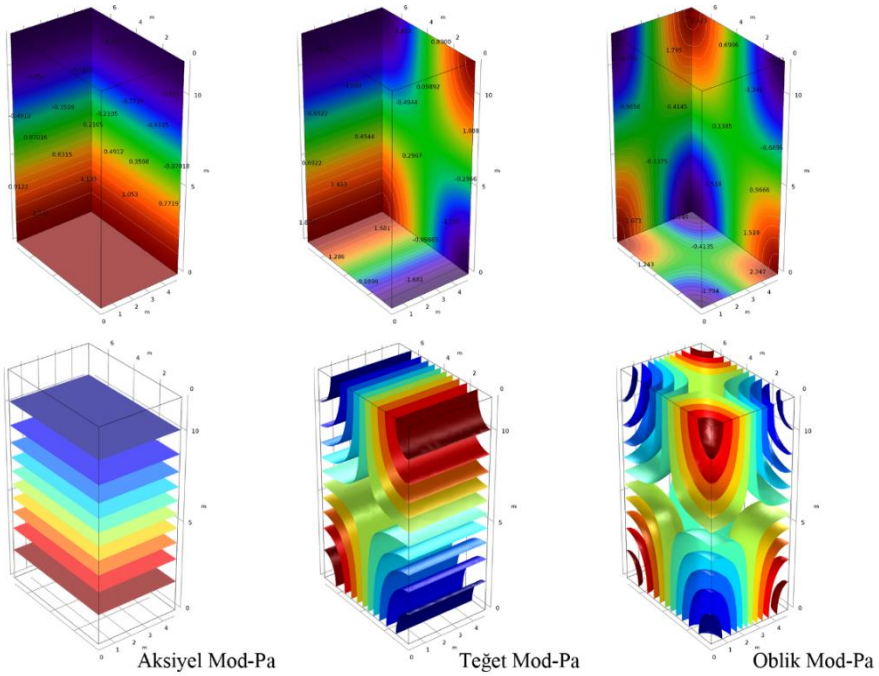
Desibel cinsinden ses basınç düzeyi üzerinden ifade edilir ise; f_3=14.46 aksiyel modu hacmin uzun kenarının orta noktasından kısa kenara paralel uzanan bir 0 basınç çizgisi oluşturur. f_1=24.12 aksiyel modu kısa kenarın orta noktasından uzun kenara paralel uzanan bir 0 basınç çizgisi oluşturur. f_6=28.12 teğet modu birinci ve ikinci aksiyel modların aynı düzlemde kesişimi biçiminde, kısa ve uzun kenarların orta noktalarından; kısa ve uzun kenarlara paralel iki adet 0 basınç çizgisi oluşturur. Bu çizgiler hacmin merkez noktasında kesişir. f_7=45.82 oblik modu tüm yüzeylerin en ve boy çizgilerine paralel ve orta noktalarında kesişen ve bunu hacmim üç yüzeyinde de tekrar eden bir 6 adet 0 basınç çizgisi oluşturur. Bu çizgiler üzerindeki basınç dağılımı yüzey merkezlerinden kenarlarına doğru artan basınç şeklindedir.



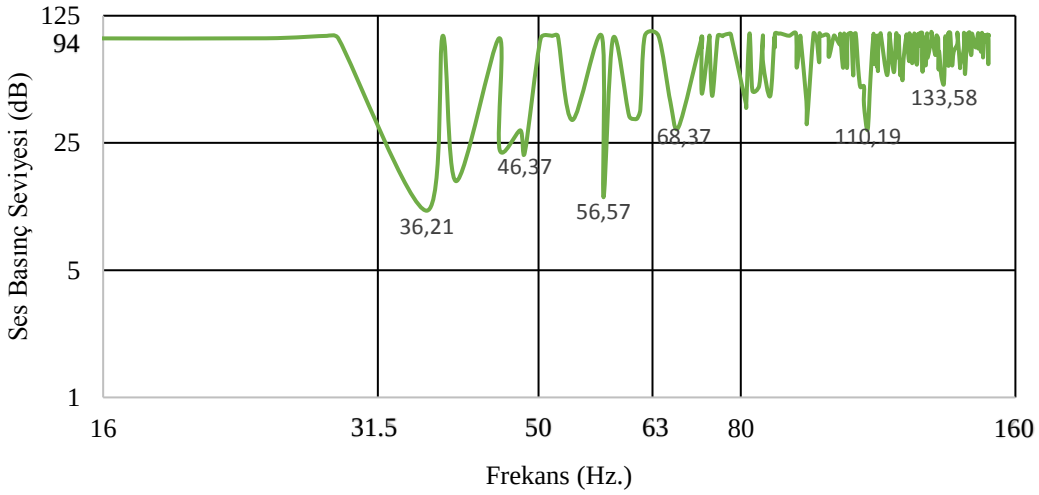
Şekil 4.92 : f_6=28.12 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).



Şekil 4.93 : f_7=45.82 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).



Şekil 4.94 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) ve ses basnç düzeyi (dB) gösterimleri.



Şekil 4.95 : 1:0.4:0.6 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi.

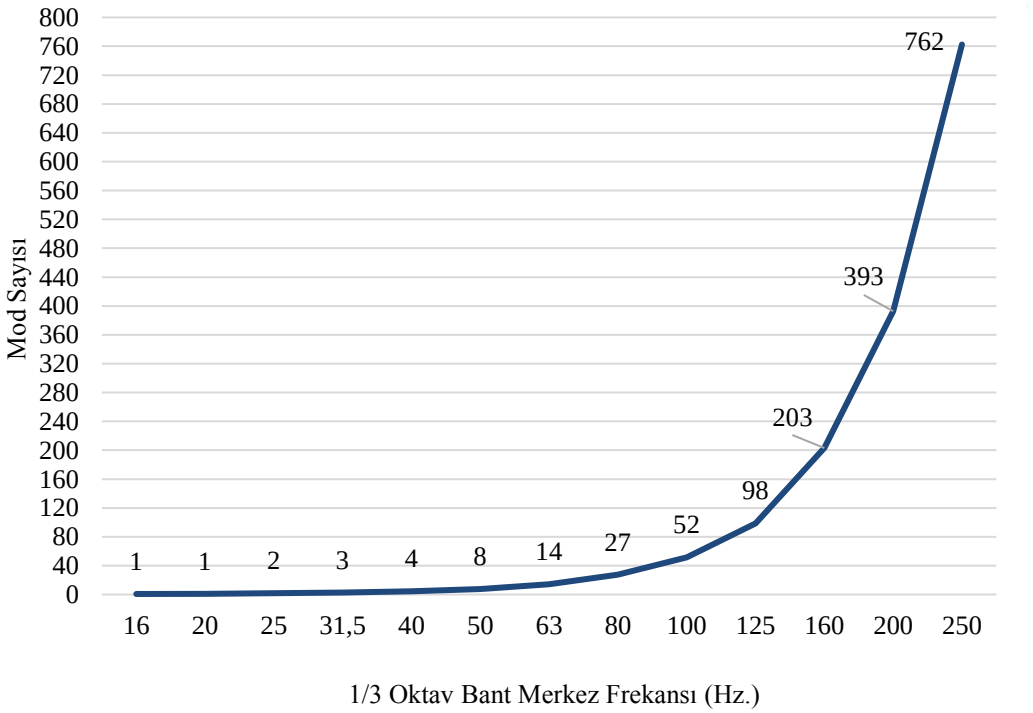
1:0.4:0.6 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekans değerlerinden itibaren çok net ve büyük vadi ve tepe noktaları oluşturur. Spektrum boyunca oluşan tepe ve vadi noktaları düzensizdir. Vadi ve tepe noktaları arasında diğer hacimlerde görülmeyen ses basınç seviyesi farkları görülmektedir. Hacmin yükseklik boyutunun diğer boyutlarına kıyasla fazla olması bu basınç dalgalanmasına sebep olmaktadır. 115 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 101 dB ile 10 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir.

4.2.7 Alberti oranın değerlendirilmesi, 1:0.57:1.28

Bu hacmin aksiyel modları denklem 2.6 ile hesaplanmıştır. Hacmin mod sayısı denklem 2.7'ye göre hesaplanır. Modlar arasındaki mesafe denklem 2.8 ile hesaplanır.

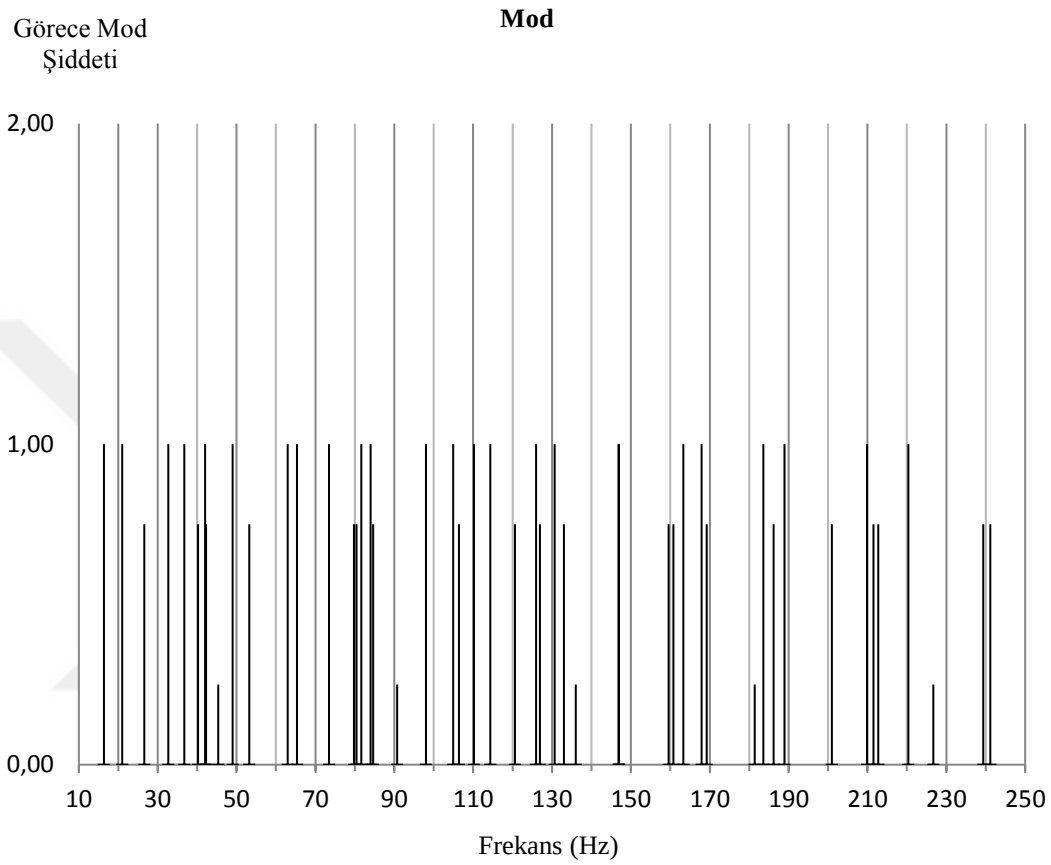
Gilford tarafından ifade edilen mod aralığı kriterine göre aksiyel modlar arasındaki mesafe 20 Hz.'den fazla olmamalıdır. 1:0.57:1.28 oranlarına sahip hacimde bu mesafe 0.3 Hz. ile 12 Hz. arasında frekanslara göre değişen bir skalada hesaplanmaktadır. Bonello kriterleri açısından incelendiğinde modlar arasındaki mesafe; ilgili modun frekansının %5'i kadar olmalıdır. Hacimdeki en düşük frekanslı aksiyel mod için bu 16.33 x 5/100 = 0.816 Hz. olarak hesaplanır. Yani modlar arasında yaklaşık 1 Hz. kadar mesafe olmalıdır. Olay hacimde ilk aksiyel mod frekansı ile en yakın diğer mod (ikinci aksiyel mod) frekansı arasında 4.65 Hz. mesafe bulunmaktadır. Dikdörtgen prizma şeklindeki hacim Gilford ve Bonello tarafından ifade edilen mod aralığı kriterlerini sağlamamaktadır.

Modal yoğunluk frekans arttıkça artar. 16 Hz ile 31.5 Hz frekansları arasındaki sabit eğim görülür. Frekansa bağlı mod sayısı Şekil 4.96'da görülmektedir. Hacmin modal yoğunluğu 63 Hz.'den sonra düzenli bir artış gösterir.



Şekil 4.96 : 1:0.57:1.28 oranlı hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı.

Şekil 4.3 hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarına ait modal yoğunluğunu ve dağılımını göstermektedir. Modların yansımalardan kaynaklı enerji düşüşleri ve farkları üzerinden modların ifadesi için bir ölçek oluşturulmuştur. Modlar düşey eksende farklı görece mod şiddetleri ile ifade edilirler. Aksiyel mod=1, teğet mod=0.75 ve oblik mod=0.25 değeri ile ifade edilir.



Şekil 4.97 : 1:0.57:1.28 oranlı hacmin modal yoğunluk grafiği.

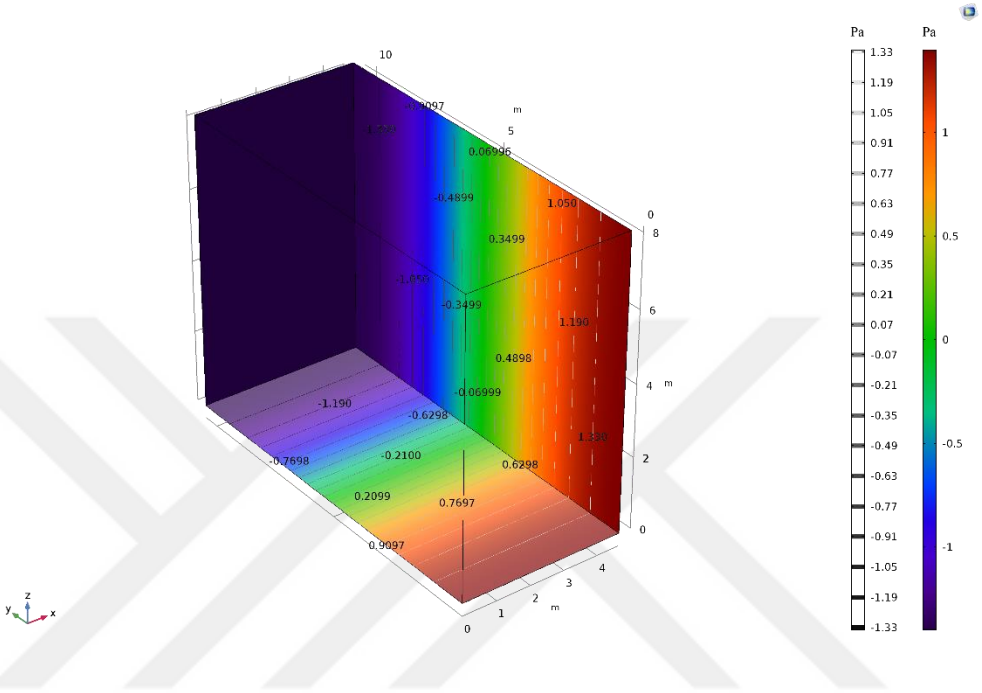
Şekil 4.97'deki ve Çizelge 4.1'daki verileri incelersek, sadece bir boyut (eksen) tarafından desteklenen tekil frekanslar mevcuttur. Birbirine çakışıklık derecesinde yakın frekans değerleri okunsa dahi farklı eksenler tarafından desteklenen eş frekanslar oluşmaz. Spektrum boyunca modların dağılımı nispeten düzenlidir. Spektrum grafiği belirli frekanslarda sıklaşma gösterir ancak seyrelme diğer hacimlere kıyasla daha az ve kısa mesafelidir. Modlar arasındaki mesafe 170 Hz ve 190 Hz arasında fazladır. 80 Hz frekans bölgesinde birbirine çakışma derecesinde yakın modlar oluşmaktadır.

1:0.57:1.28 oranlarındaki dikdörtgen prizma şeklindeki hacmin aksiyel mod frekansları Çizelge 4.16'da gösterilmektedir.

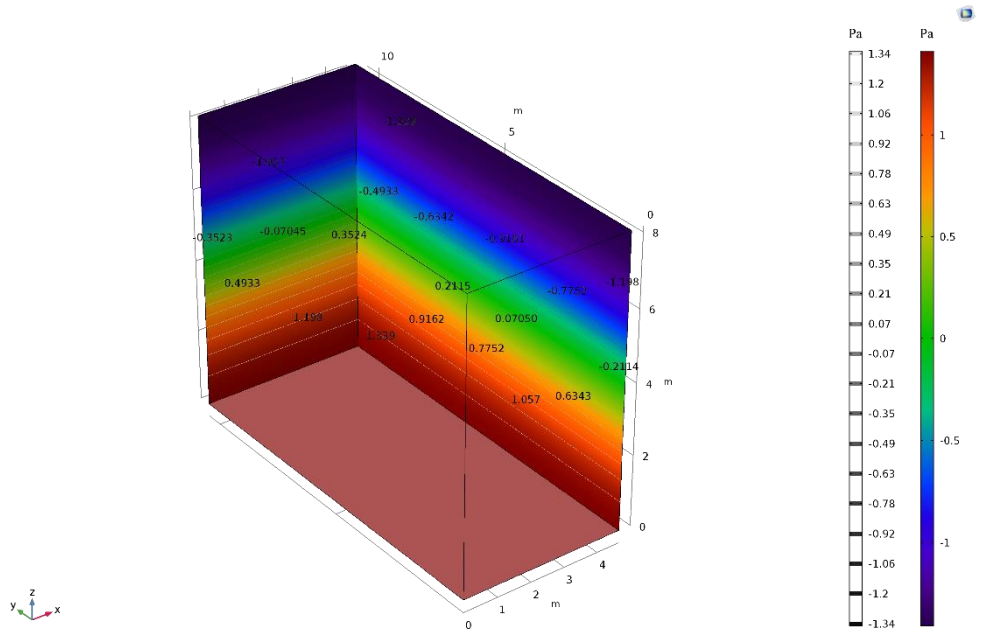
Çizelge 4.16 : 1:0.57:1.28 oranlarına sahip hacmin ilk 30 aksiyel mod frekansları

Mod Sayısı	Tam Sayı			Mod Frekansı	Artan Sırada Dizilim	Mod Mesafeleri	Renk.	
	p(L)	q(W)	r(H)				Gilford	Bonello
f_1	1	0	0	16.3333333	16.33333333	4.658098735	-	-
f_2	0	1	0	36.7237687	20.99143207	11.6752346	-	-
f_3	0	0	1	20.9914321	32.66666667	4.05710207	-	-
f_4	2	0	0	32.6666667	36.72376874	5.2590954	-	-
f_5	0	2	0	73.4475375	41.98286414	7.017135863	-	-
f_6	0	0	2	41.9828641	49	13.97429621	-	-
f_7	3	0	0	49	62.97429621	2.359037128	-	+
f_8	0	3	0	110.171306	65.33333333	8.11420414	-	-
f_9	0	0	3	62.9742962	73.44753747	8.219129193	-	-
f_{10}	4	0	0	65.3333333	81.66666667	2.299061608	-	+
f_{11}	0	4	0	146.895075	83.96572827	14.03427173	-	-
f_{12}	0	0	4	83.9657283	98	6.957160343	-	-
f_{13}	5	0	0	81.6666667	104.9571603	5.214145867	-	+
f_{14}	0	5	0	183.618844	110.1713062	4.162027123	-	+
f_{15}	0	0	5	104.95716	114.3333333	11.61525908	-	+
f_{16}	6	0	0	98	125.9485924	4.718074255	-	+
f_{17}	0	6	0	220.342612	130.6666667	16.22840828	-	-
f_{18}	0	0	6	125.948592	146.8950749	0.044949533	-	+
f_{19}	7	0	0	114.333333	146.9400245	0.05997552	-	+
f_{20}	0	7	0	257.066381	147	16.33333333	-	-
f_{21}	0	0	7	146.940024	163.3333333	4.598123215	-	+
f_{22}	8	0	0	130.666667	167.9314565	15.68738713	-	+
f_{23}	0	8	0	293.79015	183.6188437	5.304044934	-	+
f_{24}	0	0	8	167.931457	188.9228886	20.99143207	+	-
f_{25}	9	0	0	147	209.9143207	10.42829173	-	+
f_{26}	0	9	0	330.513919	220.3426124	36.72376874	+	-
f_{27}	0	0	9	188.922889	257.0663812	36.72376874	+	-
f_{28}	10	0	0	163.333333	293.7901499	36.72376874	+	-
f_{29}	0	10	0	367.237687	330.5139186	36.72376874	+	-
f_{30}	0	0	10	209.914321	367.2376874			

Hacmin ilk aksiyel modu f_1=16.33 Hz de oluşmaktadır. Hacmin boy ekseni boyunca en eksenine paralel olarak ilk mod oluşmaktadır. Plan düzleminde, karşılıklı xz yüzeyleri arasında oluşan birinci aksiyel mod ile xy yüzeyleri arasında oluşan üçüncü aksiyel mod Şekil 4.98'de ve Şekil 4.99'da, 3 boyutlu görseli Şekil 4.100'de ve Şekil 4.101'de gösterilmektedir.

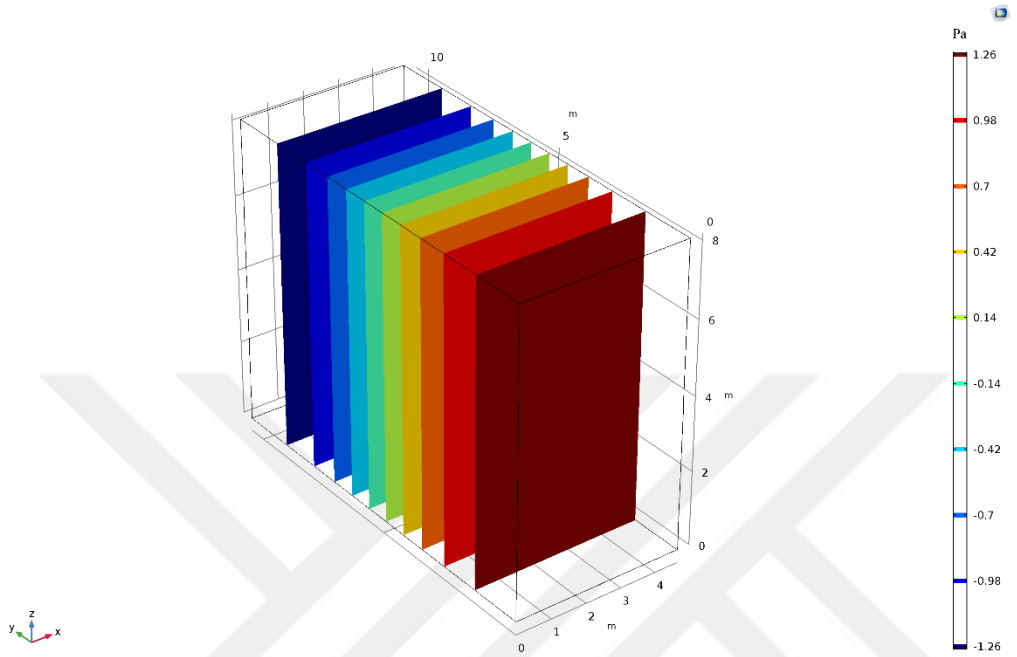


Şekil 4.98 : Hacimde oluşan birinci aksiyel mod (xz yüzeyleri) f_1=16.33 Hz. in ses basıncı (Pa).

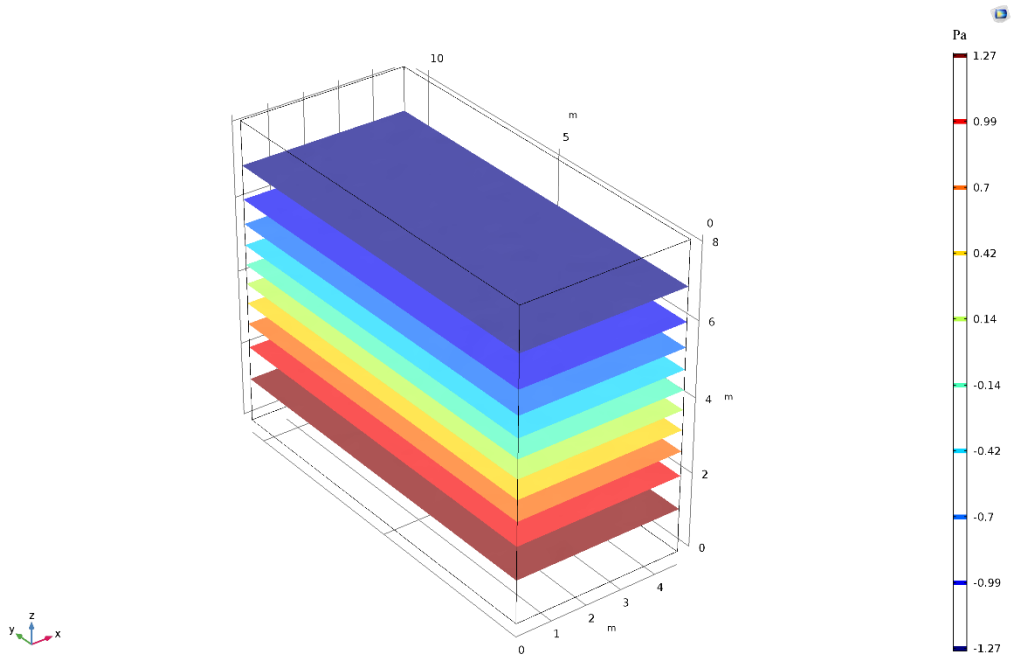


Şekil 4.99 : Hacimde oluşan ikinci aksiyel mod (xy yüzeyleri) f_3=20.99 Hz. in ses basıncı (Pa).

Şekil 4.98'de gösterilen mod hacmin xz düzlemine paralel, boy ekseni boyunca oluşmaktadır. Şekil 4.98 ve Şeil 4.99'da gösterim basınç değeri (Pa) üzerinden, minimum (0 Pa) ve maksimum (1 Pa) olarak ifade edilir. Eksi basınç değerleri hacmin orta ekseni orjin kabul edildiğinde basıncın konumunun zıt yönde olduğunu ifade eder.



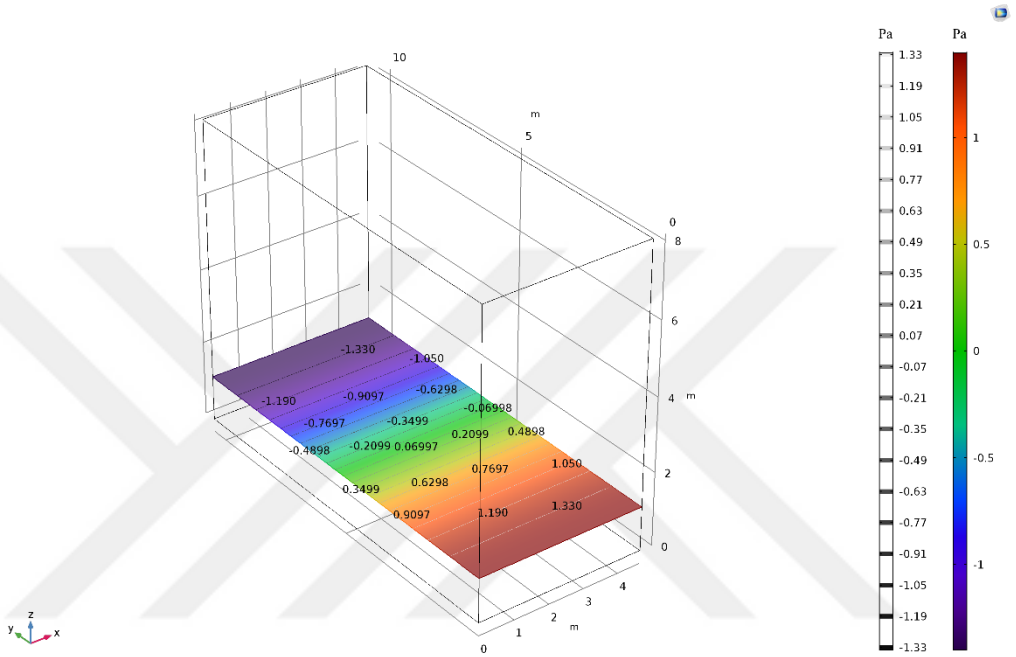
Şekil 4.100 : f_1=16.33 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).



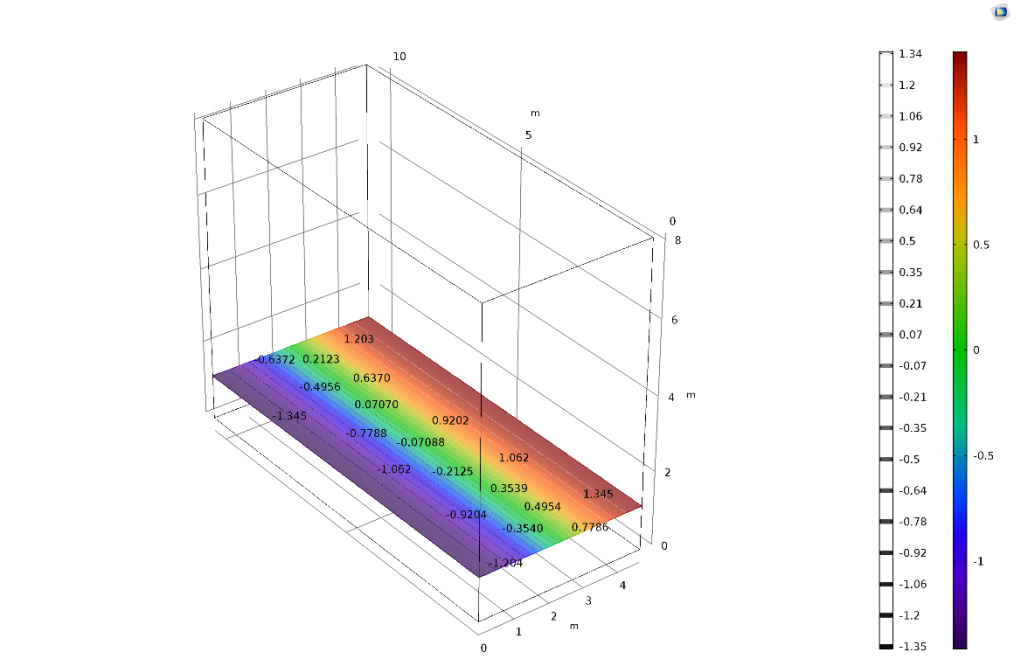
Şekil 4.101 : f_3=20.99 Hz. aksiyel modunun (xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).

Şekil 4.100 ve Şekil 4.101 sadece Şekil 4.98 ve Şekil 4.99'un ifadesinde kullanılan renklerin bir dilimlenme halini ifade eder. Yükseklik eksenindeki (z ekseni) ses basınç değerlerini ifade etmez. Şekil 4.99 ve 4.101 hacmin tavan döşeme (xy eksenine paralel) duvarları arasında oluşan üçüncü aksiyel modu gösterir.

Modun h=1.2 m farazi alıcı konumu düzlemindeki ses basınç değerleri Şekil 4.102'de gösterilmektedir.



A



B

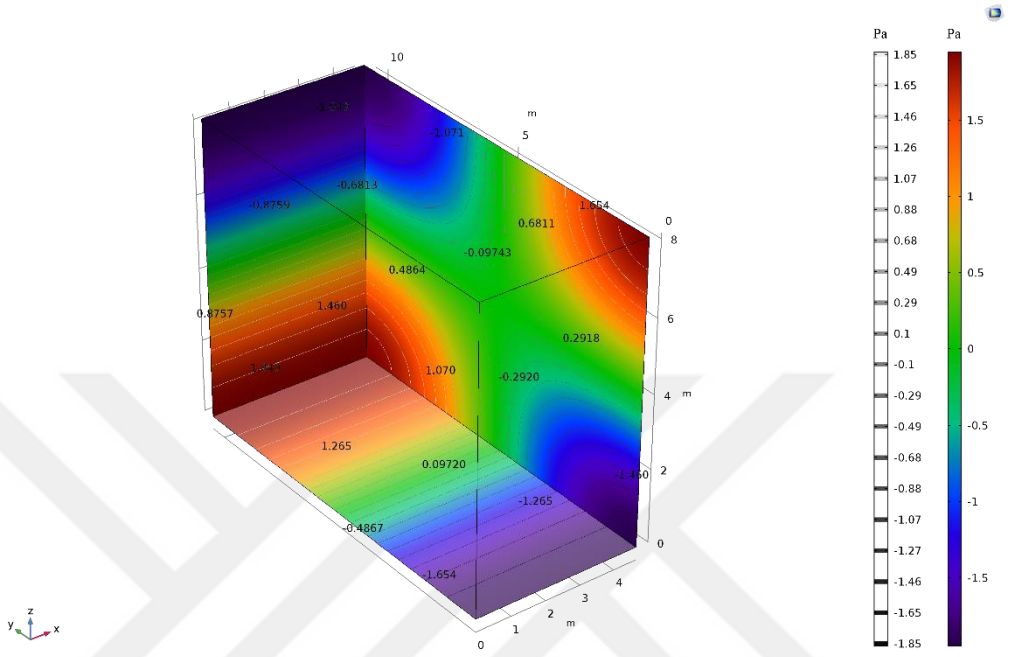
Şekil 4.102 : f_1=16.33 Hz. aksiyel modunun (A) ve f_2=36.72 Hz. oblik modunun (B) h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu.

1:0.57:1.28 oranlarındaki hacmin, aksiyel, teğet ve oblik mod frekansları Çizelge 4.17'de gösterilmektedir.

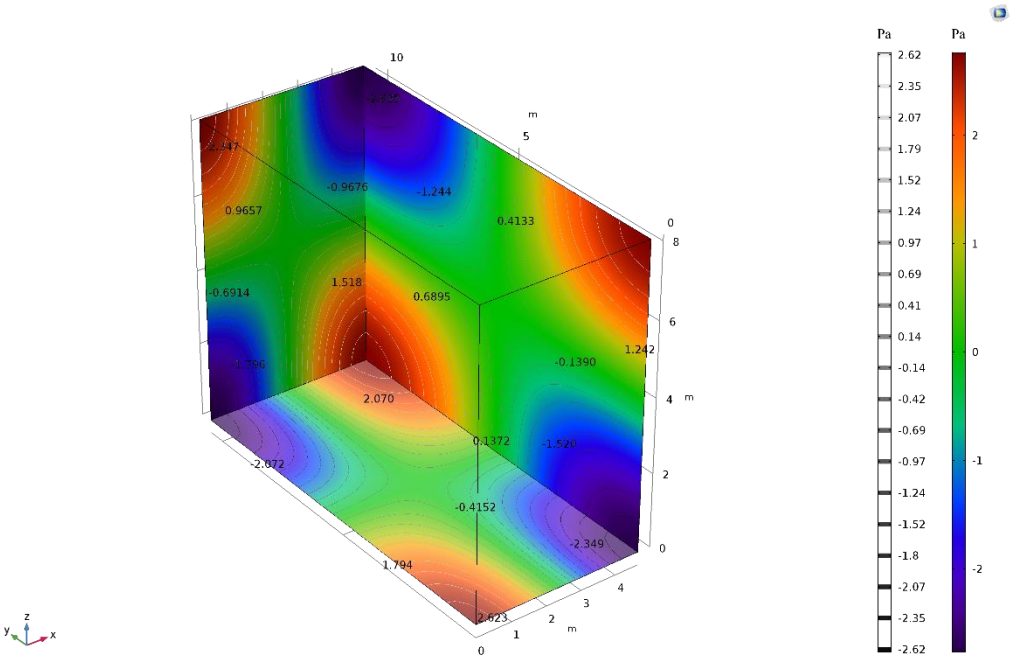
Çizelge 4.17 : 1:0.57:1.28 oranlarına sahip hacmin ilk 4 aksiyel,teğet ve oblik mod frekansları.

Mod Sayısı	Tam Sayı			Mod Frekansı	Artan Sırada Dizilim	Mod Mesafeleri	Renk.	
	p(L)	q(W)	r(H)				Gilford	Bonello
f_1	1	0	0	16.3333333	16.33333333	4.658098735	-	-
f_2	0	1	0	36.7237687	20.99143207	5.605898588	-	-
f_3	0	0	1	20.9914321	26.59733066	6.06933601	-	-
f_4	1	1	0	40.1922003	32.66666667	4.05710207		-
f_5	0	1	1	42.2998275	36.72376874	3.468431601		-
f_6	1	0	1	26.5973307	40.19220034	1.790663799		+
f_7	1	1	1	45.3437227	41.98286414	0.31696341		+
f_8	2	0	0	32.6666667	42.29982755	3.043895153	-	-
f_9	0	2	0	73.4475375	45.3437227	3.6562773	-	-
f_{10}	0	0	2	41.9828641	49	4.194661314	-	-
f_{11}	2	2	0	80.3844007	53.19466131	9.779634892		-
f_{12}	0	2	2	84.5996551	62.97429621	2.359037128		+
f_{13}	2	0	2	53.1946613	65.33333333	8.11420414		-
f_{14}	2	2	2	90.6874454	73.44753747	6.344454497		-
f_{15}	3	0	0	49	79.79199197	0.592408705	-	+
f_{16}	0	3	0	110.171306	80.38440068	1.282265991	-	+
f_{17}	0	0	3	62.9742962	81.66666667	2.299061608	-	+
f_{18}	3	3	0	120.576601	83.96572827	0.63392682		+
f_{19}	0	3	3	126.899483	84.59965509	6.087790306		-
f_{20}	3	0	3	79.791992	90.6874454	7.3125546		-
f_{21}	3	3	3	136.031168	98	6.957160343		-
f_{22}	4	0	0	65.3333333	104.9571603	1.432162284	-	+
f_{23}	0	4	0	146.895075	106.3893226	3.781983583	-	+
f_{24}	0	0	4	83.9657283	110.1713062	4.162027123	-	+
f_{25}	4	4	0	160.768801	114.3333333	6.24326768		-
f_{26}	0	4	4	169.19931	120.576601	5.371991398		-
f_{27}	4	0	4	106.389323	125.9485924	0.95089023		+
f_{28}	4	4	4	181.374891	126.8994826	3.767184026		+

Teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modlara ait basınç maksimumları hacmin köşe kesişim noktalarında oluşur. Teğet mod hacmin 4 köşesinde oluşur. Oblik mod hacmin 8 köşesinde oluşur. Şekil 4.103 ve Şekil 4.104 hacmin ilk teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modunu gösterir.

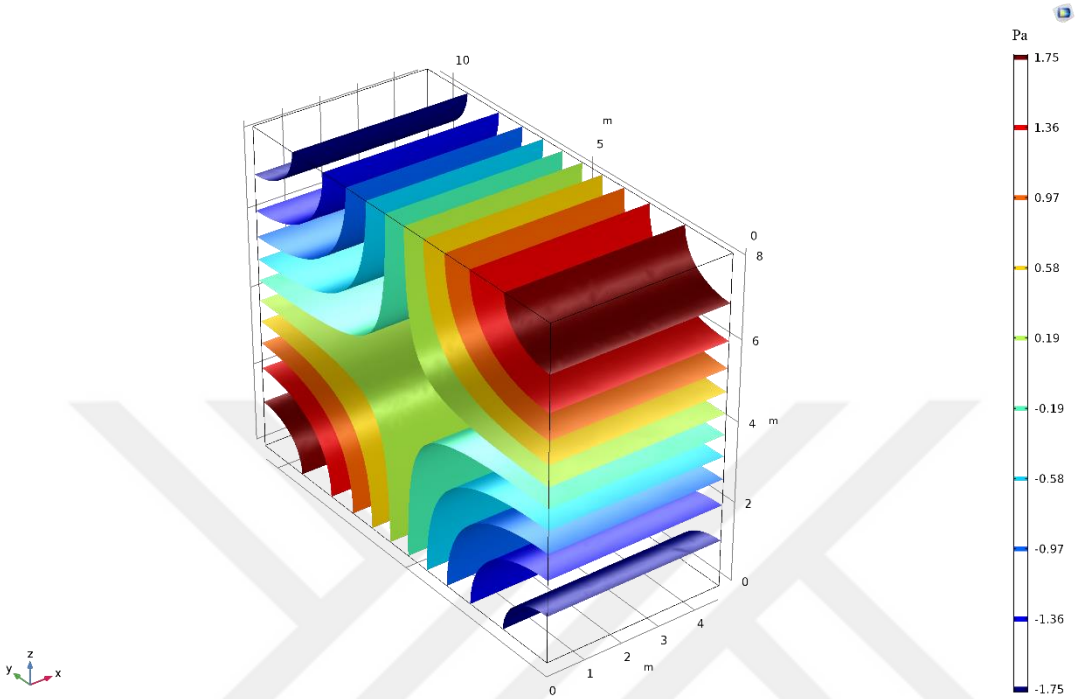


Şekil 4.103 : f_6=26.59 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

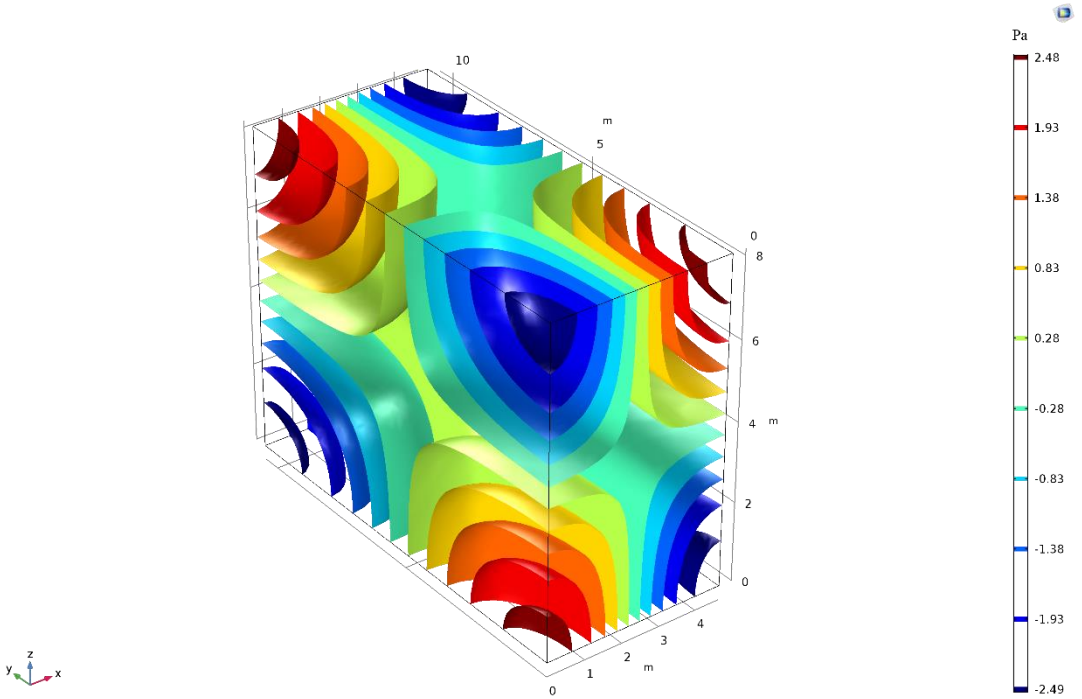


Şekil 4.104 : f_7=45.34 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

Şekil 4.105 ve Şekil 4.106 hacmin ilk teğet ve oblik modunun 3 boyutlu gösterimidir. 4 duvar yüzeyini dolaşan dalganın oluşturduğu ses yayılımının tabana da etkisi olmaktadır. Duvar yüzeylerinin kendi içinde ses basıncının yayılımını görüyoruz. 4 köşe birleşiminde ses basıncının yükseldiği görülmektedir.

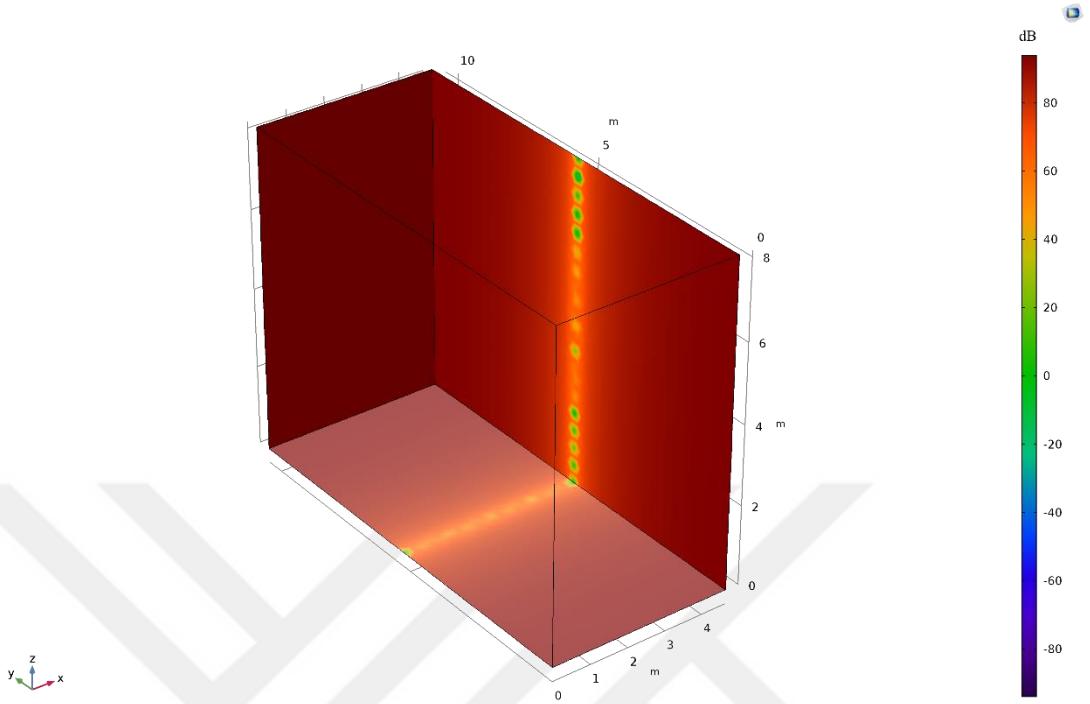


Şekil 4.105 : f_6=26.59 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).



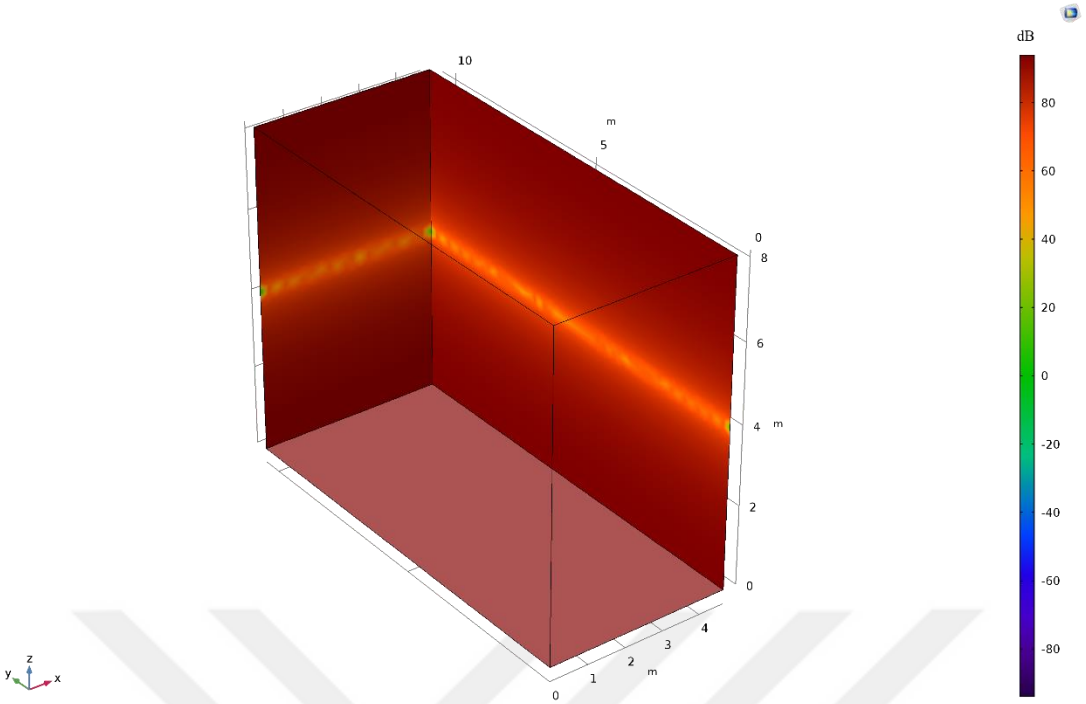
Şekil 4.106 : f_7=45.34 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).

Şekil 4.107, 4.108, 4.109 hacmin ilk aksiyel (xz yüzeyleri), teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modlarının ses basınç düzeylerini gösterir.

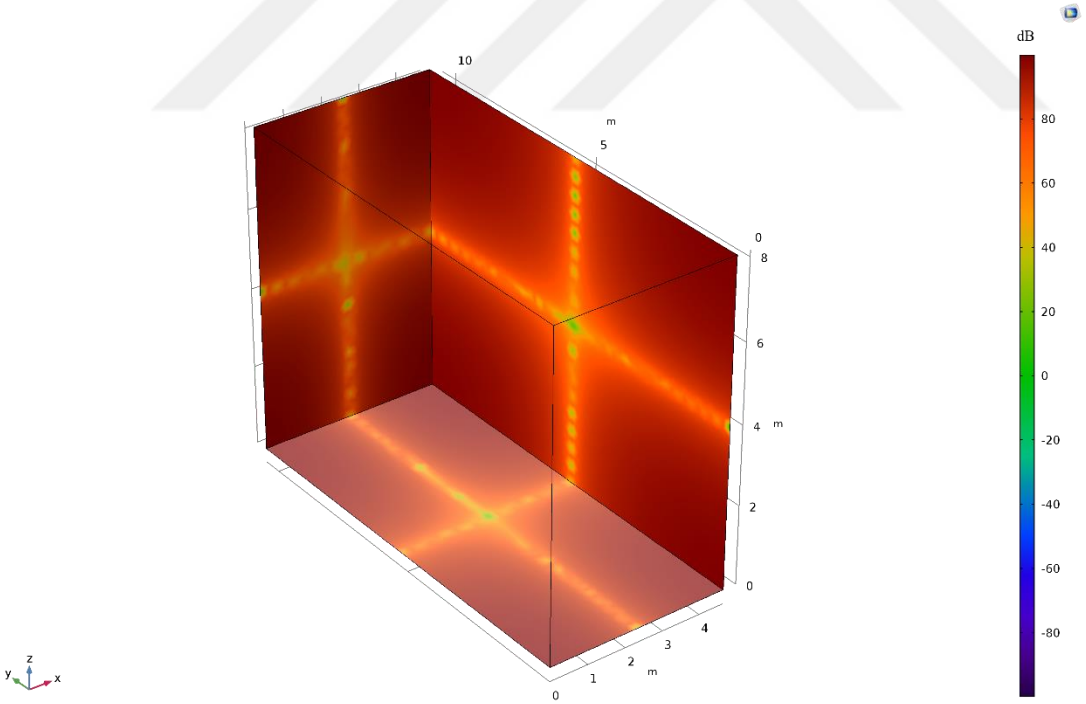


Şekil 4.107 : f_1=16.33 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).

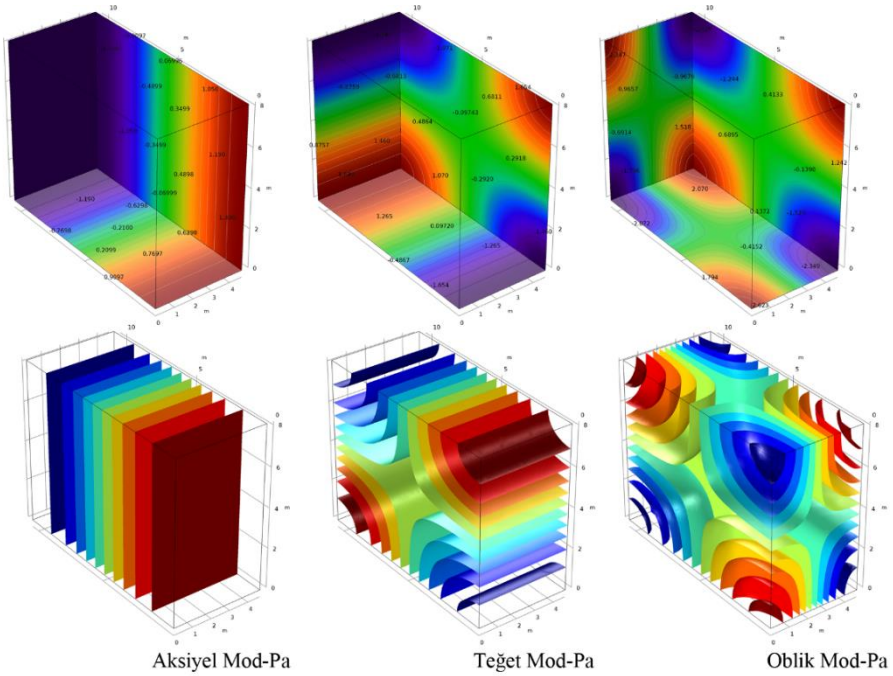
Desibel cinsinden ses basınç düzeyi üzerinden ifade edilir ise; f_1=16.33 aksiyel modu hacmin uzun kenarının orta noktasından kısa kenara paralel uzanan bir 0 basınç çizgisi oluşturur. f_3=20.99 aksiyel modu kısa kenarın orta noktasından uzun kenara paralel uzanan bir 0 basınç çizgisi oluşturur. f_4=40.19 teğet modu birinci ve ikinci aksiyel modların aynı düzlemde kesişimi biçiminde, kısa ve uzun kenarların orta noktalarından; kısa ve uzun kenarlara paralel iki adet 0 basınç çizgisi oluşturur. Bu çizgiler hacmin merkez noktasında kesişir. f_7=45.34 oblik modu tüm yüzeylerin en ve boy çizgilerine paralel ve orta noktalarında kesişen ve bunu hacmim üç yüzeyinde de tekrar eden bir 6 adet 0 basınç çizgisi oluşturur. Bu çizgiler üzerindeki basınç dağılımı yüzey merkezlerinden kenarlarına doğru artan basınç şeklindedir. Modların dağılımı bakımından homojene en yakın sonucu, boyutları arasında herhengi bir ortak bölen ilişkisi olmayan 1:0.57:1.28 oranlarına sahip hacim vermektedir. Hacmin mod karakteristiği dikdörtgen prizma odaların gösterdiği konum özelliklerini gösterir. Frekans dağılımı ve mod sayısı açısından farklılıklar her hacmin boyutsal ve oransal karakteristiğini gösterir.



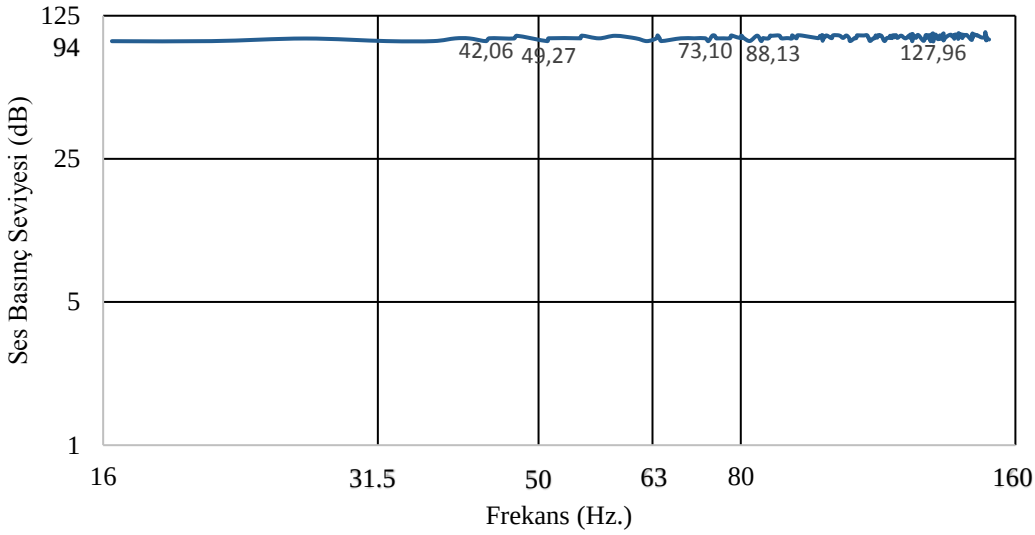
Şekil 4.108 : f_3=20.99 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).



Şekil 4.109 : f_7=45.34 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).



Şekil 4.110 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) ve ses basnç düzeyi (dB) gösterimleri.



Şekil 4.111 : 1:0.57:1.28 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi.

1:0.57:1.28 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekanslarda yataya yakın eğimde seyreder. Spektrum boyunca oluşan tepe ve vadi noktaları düzensizdir. 16 Hz. ile 80 Hz. arasında vadi ve tepe noktaları seyrektir. 80 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Hacmin frekans tepki eğrisinin eğimi yataya yakın bir seyirdedir. Hacimler içerisinde en az basınç farkı gösteren hacimdir. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 100 dB ile 95 dB arasındaki oldukça dar bir aralıkta görülmektedir.

4.3 Küçük Oda Oranlarının Değerlendirilmesinin Sonucu

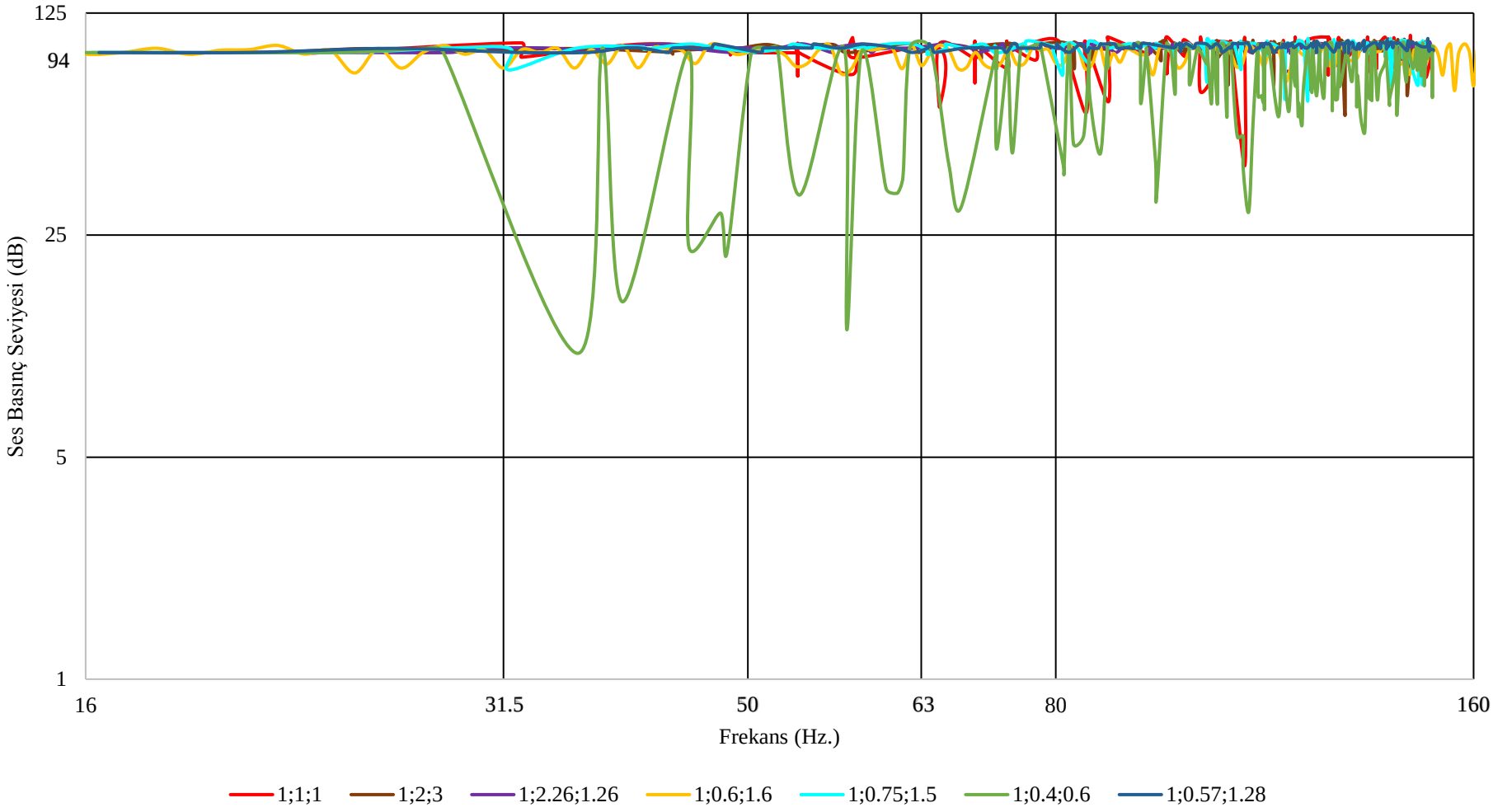
Tanımlanan 7 adet oran ve oda boyutu, eşit hacimde, üzerinde oda modları incelenmiştir. Mimaride görsel ve işitsel olarak kullanılan bu oda oranlarının modal karakteristikler açısından farklı frekans ve basınç değerleri verdikleri ancak modların konum ve şekil olarak dikdörtgen prizma hacim davranışlarını tekrarladığı görülmüştür. Örneklerde hacmin tüm yüzeylerinin orta aksında aksiyel mod; köşe noktalarında teğet mod oluşumu gözlemlenir.

Hacimler 1/3 oktav bant spektrumu boyunca incelendiğinde, düşük frekanslarda aynı mod sayısına (N) sahiptirler. Frekansın artması ile mod sayısında küçük değişiklikler gözlemlenir. Çizelge 4.18 spektrum boyunca oda oranlarının mod sayısını gösterir.

Çizelge 4.18 : Hacim oranlarının, 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayıları.

Oda Oranı	Frekans Spektrumu												
Yükseklik(H)-Genişlik(W)-Uzunluk(L)	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250
	Mod Sayısı (N)												
1:2:3	1	1	2	3	5	8	14	28	52	99	205	396	768
1:1.26:1.6	1	1	2	3	4	8	14	27	51	98	202	390	758
1:0.6:1.6	1	1	2	3	4	8	14	28	52	99	204	394	765
1:0.75:1.5	1	1	2	3	4	8	14	27	51	98	202	392	760
1:1:1	1	1	2	3	4	8	14	27	51	98	201	389	756
1:0.4:0.6	1	1	2	3	4	8	14	27	52	99	203	393	763
1:0.57:1.28	1	1	2	3	4	8	14	27	52	98	203	393	762

Hacimlerin mod bant genişliği (B), modlar arası mesafe (Δf) ve Schroeder frekansı (f_c=f_s) değerleri, hacim ve çınlama süresi parametreleri tüm oda oranlarında sabit kabul edildiğinden aynı değerlere sahiptir. Hacimlerin boyutları arasında bulunan sayısal oran ilişkileri nedeniyle, aynı frekansa sahip modların hacmin farklı yüzeylerinde tekrarlandığı görülmektedir. Bu çakışık modlar, modlar arası mesafeler kriterlerini sağlamaz. Bu kriter üzerinden incelendiğinde tüm yüzeyleri eşit olan küp hacmin yüzeylerinde (bakınız Çizelge 4.4 ve 4.5) aksiyel, teğet ve oblik mod frekansları tekrarlanır. Oranları arasında sayısal ortak bölen ilişkisi olmayan 1:0.57:1.28 ve 1:1.26:1.6 oranlarına sahip hacimlerde (bakınız Çizelge 4.9, 4.10 ve Çizelge 4.18 ve 4.19) çakısık mod olayı görülmez. Hacimler frekans tepki eğrileri (frekans-desibel ilişkisi) üzerinden incelendiğinde farklılıklar okunmaktadır. Şekil 4.112 hacimlerin frekans tepki eğrilerini göstermektedir.



Şekil 4.112 : 7 oran türüne ait hacimlerin frekans tepkisi eğrileri. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir.

Modlara ait benzetim görselleri incelendiğinde + ve – basınç değerlerinin olması sesin oda içerisinde homojen bir yayılım göstermediği ifade eder. Köşe noktalarında ses basıncı orta eksene göre artmaktadır. 60 dB bir konuşma sesi kabul edilirse köşe noktalarda düzeyinin yükseldiği ve küçük odada sesin anlaşılabilirliğini olumsuz etkilediğini gösterir.

1:1:1 oranlı küp hacmin frekans tepki eğrisi, ilk aksiyel mod frekansı olan 23.3 Hz. değerinin tam katlarında ses basıncı düzeyinde ani düşüşler oluşturduğu ve buna bağlı olarak eğri üzerinde düğüm noktaları oluşturduğu görülür. Spektrum boyunca frekans tepkisi düzensizdir. Spektrum boyunca 16 Hz. ile 63 Hz. arasında oluşan tepe ve vadi noktaları düzensiz ve seyrektir. 63 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 106.33 dB ile 41.21 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir.

1:2:3 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekans değerlerinde vadi ve tepe noktaları oluşturmaz. 40 Hz. üzerinde ses basınç düzeyinin tepe ve vadiler oluşturduğu görülür. Frekans arttıkça ses basınç düzeyi değişimleri daha net tepe ve vadiler oluşturur. Spektrum boyunca 16 Hz. ile 50 Hz. arasında oluşan tepe ve vadi noktaları düze yakın bir seyirdedir. 63 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır ve tepe ve vadi noktaları daha belirgin olmaktadır. Frekans tepki eğrisi küp hacme göre nispeten daha düzenlidir. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 99.19 dB ile 59.49 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir.

1:2.26:1.26 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekanslarda düzensiz bir seyirdedir. 125 Hz. üzerinde eğri yataya yakın bir eğimde ses basınç düzeyi değişiklikleri gösterir. Spektrum boyunca ses basınç düzeyi farkları birbirine yakın bir skalada seyreder. 80 Hz. üzerinde ses basınç düzeyinin daha sık tepe ve vadiler oluşturduğu görülür. Spektrum boyunca oluşan tepe ve vadi noktaları düzensizdir. 90 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Frekans tepki eğrisi 1. ve 2. hacme göre daha düzenlidir. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 100 dB ile 93 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir.

1:0.6:1.6 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, diğer hacimlere göre daha net ve açık bir seyir gösterir. Tepe ve vadi noktalarında çakışma düğümleri oluşturmaz. Ses basınç düzeyi belirli bir aralıkta (100 dB - 80 dB) değişim gösterir. Derin vadi ve tepe noktaları oluşturmaz. Düşük frekans değerlerinden itibaren vadi ve tepe noktaları oluşturur. 80 Hz. üzerinde ses basınç düzeyinin daha sık tepe ve vadiler oluşturduğu görülse de bu noktalar tüm spektrum boyunca görülür. Spektrum boyunca oluşan tepe ve vadi noktaları düzensizdir. Diğer hacimlerde görülen frekansa bağlı artış durumu bu hacimde diğer hacimlerde olduğu kadar belirgin değildir. Frekans tepki eğrisi diğer hacimlere kıyasla daha fazla pik noktası oluşturur. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 96 dB ile 71 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir.

1:0.75:1.5 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekanslarda düzensiz bir seyir sergiler. Yüksek frekanslarda ise seyrin ani düşüşler ile eğride vadi noktaları oluşturduğu görülür. Bu ani ses basınç düzeyi değişimleri spektrum boyunca düzensiz ve orantısızdır. Düşük frekans değerlerinden itibaren vadi ve tepe noktaları oluşturur. 16 Hz. ile 63 Hz. arasında vadi ve tepe noktaları seyrek ve azdır. 80 Hz. üzerinde ses basınç düzeyinin daha sık tepe ve vadiler oluşturduğu görülür. Spektrum boyunca oluşan tepe ve vadi noktaları düzensizdir. 90 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 96 dB ile 66 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir.

1:0.4:0.6 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, diğer hacimlerin ses basınç düzeyi skalaları ile kıyaslandığında oldukça düşük seviyeleri gösterir. Eğri boyunca oluşan tepe ve vadi noktaları daha geniş bir skalada oluşur. Vadi noktalarının oluşumu frekans arttıkça sıklaşır ve sayısı artar. Düşük frekans değerlerinden itibaren çok net ve büyük vadi ve tepe noktaları oluşturur. Spektrum boyunca oluşan tepe ve vadi noktaları düzensizdir. Vadi ve tepe noktaları arasında diğer hacimlerde görülmeyen ses basınç seviyesi farkları görülmektedir. Hacmin yükseklik boyutunun diğer boyutlarına kıyasla fazla olması bu basınç dalgalanmasına sebep olmaktadır. 115 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 101 dB ile 10 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir.

1:0.57:1.28 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekanslarda düzensiz ve yataya yakın eğimde seyreder. Yüksek frekanslarda tepe ve vadi noktalarının sayısı artar ve sıklaşır. Çok dar bir ses basınç düzeyi skalasında (100 dB - 95 dB) değişimler görülür. Düşük frekanslarda yataya yakın eğimde seyreder. Spektrum boyunca oluşan tepe ve vadi noktaları düzensizdir. 16 Hz. ile 80 Hz. arasında vadi ve tepe noktaları seyrektir. 80 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Hacmin frekans tepki eğrisinin eğimi yataya yakın bir seyirdedir. Hacimler içerisinde en az basınç farkı gösteren hacimdir. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 100 dB ile 95 dB arasındaki oldukça dar bir aralıkta görülmektedir.

Hacimler içerisinde frekans tepki eğrisi en düzenli ve okunabilir olarak 1:0.6:1.6 hacminde görülür. Yüzey boyutları arasında tam sayı ilişkisi olmadığından ses basıncı hacim içerisinde tepe ve vadi noktalarını düzensiz oluşturmaz.

Gilford kriterine göre iki aksiyel mod arasında 20 Hz.'den fazla mesafe olmalıdır. 20 Hz.'den fazla mesafe olması renklenme oluşturur ve her bir mod ayrı olarak işitilir. Bonello kriterine göre aksiyel, teğet, oblik modlar arasındaki mesafe; ilgili modun frekansının %5'den az olmamalıdır. Modlar arasında %5'den az mesafe olması renklenme oluşturur. Çizelge 4.19 incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilir.

1:1:1 oranlı hacimde; iki aksiyel mod arasındaki mesafe 0 Hz. olarak oluşur. f_1 ve f_2 aksiyel modları arasındaki mesafe 20 Hz. olmalıdır (Gilford); ancak tüm yüzeyler birbirine eşit olduğundan $f_1=f_2$ olarak oluşur. Bu iki aksiyel mod arasında mesafe bulunmamaktadır. Bu durum çakışık modu ifade eder. Hacimde tüm boyutlar eşit olduğundan en, boy ve yükseklik eksenleri tarafından desteklenen aynı frekans değerinde modlar bulunmaktadır. f_1 aksiyel modu için mesafe 23.30 x 5/100 = 1.165 Hz. olarak hesaplanır (Bonello). Hacimdeki f_1 (aksiyel) ve f_4 (teğet) modları arasındaki mesafe 9.65 Hz. olarak oluşur. Bu değer %5 değerinden büyük olduğundan renklenme durumu oluşturmaz.

1:2:3 oranlı hacimde; iki aksiyel mod arasındaki mesafe 7.07 Hz. olarak oluşur. f_1 ve f_2 aksiyel modları arasındaki mesafe 20 Hz. olmalıdır (Gilford). Bu mod mesafesi renklenme durumunu oluşturmaz. f_1 aksiyel modu için mesafe 14.10 x 5/100 = 0.705 Hz. olarak hesaplanır (Bonello). Hacimdeki f_1 (aksiyel) ve f_4 (teğet) modları arasındaki

mesafe 11.34 Hz. olarak oluşur. Bu değer %5 değerinden büyük olduğundan renklenme durumu oluşturmaz.

1:1.26:1.26 oranlı hacimde; iki aksiyel mod arasındaki mesafe 4.99 Hz. olarak oluşur. f_1 ve f_2 aksiyel modları arasındaki mesafe 20 Hz. olmalıdır (Gilford). Bu mod mesafesi renklenme durumunu oluşturmaz. f_1 aksiyel modu için mesafe 18.38 x 5/100 = 0.919 Hz. olarak hesaplanır (Bonello). Hacimdeki f_1 (aksiyel) ve f_4 (teğet) modları arasındaki mesafe 11.35 Hz. olarak oluşur. Bu değer %5 değerinden büyük olduğundan renklenme durumu oluşturmaz.

1:0.6:1.6 oranlı hacimde; iki aksiyel mod arasındaki mesafe 8.61 Hz. olarak oluşur. f_1 ve f_3 aksiyel modları arasındaki mesafe 20 Hz. olmalıdır (Gilford). Bu mod mesafesi renklenme durumunu oluşturmaz. f_1 aksiyel modu için mesafe 14.35 x 5/100 = 0.717 Hz. olarak hesaplanır (Bonello). Hacimdeki f_1 (aksiyel) ve f_6 (teğet) modları arasındaki mesafe 12.73 Hz. olarak oluşur. Bu değer %5 değerinden büyük olduğundan renklenme durumu oluşturmaz.

1:0.75:1.5 oranlı hacimde; iki aksiyel mod arasındaki mesafe 8.09 Hz. olarak oluşur. f_1 ve f_3 aksiyel modları arasındaki mesafe 20 Hz. olmalıdır (Gilford). Bu mod mesafesi renklenme durumunu oluşturmaz.. f_1 aksiyel modu için mesafe 16.13 x 5/100 = 0.806 Hz. olarak hesaplanır (Bonello). Hacimdeki f_1 (aksiyel) ve f_6 (teğet) modları arasındaki mesafe 12.97 Hz. olarak oluşur. Bu değer %5 değerinden büyük olduğundan renklenme durumu oluşturmaz.

1:0.4:0.6 oranlı hacimde; iki aksiyel mod arasındaki mesafe 9.66 Hz. olarak oluşur. f_1 ve f_3 aksiyel modları arasındaki mesafe 20 Hz. olmalıdır (Gilford). Bu mod mesafesi renklenme durumunu oluşturmaz. f_3 aksiyel modu için mesafe 14.46 x 5/100 = 0.723 Hz. olarak hesaplanır (Bonello). Hacimdeki f_1 (aksiyel) ve f_6 (teğet) modları arasındaki mesafe 5.00 Hz. olarak oluşur. Bu değer %5 değerinden büyük olduğundan renklenme durumu oluşturmaz.

1:0.57:1.28 oranlı hacimde; iki aksiyel mod arasındaki mesafe 4.66 Hz. olarak oluşur. f_1 ve f_3 aksiyel modları arasındaki mesafe 20 Hz. olmalıdır (Gilford). Bu mod mesafesi renklenme durumunu oluşturmaz. f_1 aksiyel modu için mesafe 16.33 x 5/100 = 0.816 Hz. olarak hesaplanır (Bonello). Hacimdeki f_1 (aksiyel) ve f_6 (teğet) modları arasındaki mesafe 10.27 Hz. olarak oluşur. Bu değer %5 değerinden büyük olduğundan renklenme durumu oluşturmaz.

Çizelge 4.19 : Hacimlerde modlar arasındaki mesafelerin oluşumu.

Oran Türü				Mod Frekansı								Hesaplanan ardışık iki mod arası mesafe		Ardışık iki mod arası mesafe	
	Yükseklik	Genişlik	Uzunluk	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	Gilford	Bonello	Gilford	Bonello
	H	W	L	1,0,0	0,1,0	0,0,1	1,1,0	0,1,1	1,0,1	1,1,1	2,0,0	(aksiyel)	(aks., teğ., obl.)	(aksiyel)	(aks., teğ., obl.)
Harmonik	1	2	3	14.10	21.17	42.35	25.44	47.34	44.63	49.40	28.21	7.07 (f_2-f_1) < 20	11.34 (f_4-f_1) > %5	20	0.70 (f_1 x %5)
Altın Oran	1	1.26	1.6	18.38	23.37	29.42	29.73	37.57	34.69	41.82	36.76	4.99 (f_2-f_1) < 20	11.35 (f_4-f_1) > %5	20	0.91 (f_1 x %5)
European	1	0.6	1.6	14.35	38.28	22.96	40.88	44.64	27.08	46.89	28.70	8.61 (f_3-f_1) < 20	12.73 (f_6-f_1) > %5	20	0.71 (f_1 x %5)
Alberti	1	0.75	1.5	16.13	32.30	24.22	36.10	40.37	29.10	43.48	32.27	8.09 (f_3-f_1) < 20	12.97 (f_6-f_1) > %5	20	0.80 (f_1 x %5)
Birim	1	1	1	23.30	23.30	23.30	32.95	32.95	32.95	40.36	46.60	0.00 (f_2-f_1) < 20	9.65 (f_4-f_1) > %5	20	1.16 (f_1 x %5)
Alberti	1	0.4	0.6	24.12	36.18	14.46	43.48	38.96	28.12	45.83	48.24	9.66 (f_1-f_3) < 20	5.00 (f_6-f_1) > %5	20	0.72 (f_3 x %5)
Alberti	1	0.57	1.28	16.33	36.72	20.99	40.19	42.30	26.60	45.34	32.67	4.66 (f_3-f_1) < 20	10.27 (f_6-f_1) > %5	20	0.81 (f_1 x %5)

Modlar arasındaki mesafeler en düşük frekanslı ilk iki aksiyel mod frekans değeri üzerinden hesaplanmıştır. (Gilford)

Modlar arasındaki mesafeler en düşük frekanslı aksiyel ve teğet modların frekans değerleri üzerinden hesaplanmıştır. (Bonello)

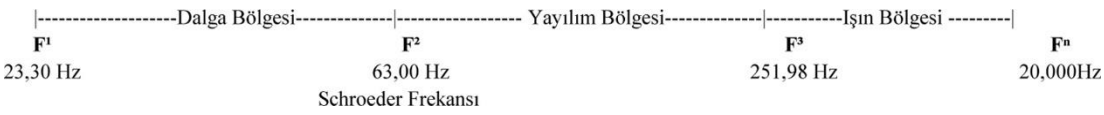
Renklenme koşulu; Gilford = Δf > 20 Hz. ise "Renklenme Var", Δf < 20 Hz. ise " Renklenme Yok"

Bonello = Δf < %5 Hz. ise " Renklenme Var", Δf > %5 Hz. ise " Renklenme Yok"

4.4 Birim Küp Hacmin Akustik Açıdan İncelemesi

Küp hacmin modal akustik incelemesine ek olarak, odanın köşe noktalarına ve yüzeylerine yapılabilecek değişiklikler ile hacmin modal karakteristiğinin değişimi incelenmiştir. Yapılan değişiklikler hacmin eksenleri olan yüzeylere ve bu eksenlerin kesişimi olan köşe noktaları üzerindedir. Hacmin mevcut boyutları içerisinde yapılan bu şekil değişikliği, oda boyutları ve boyutların matematiksel ilişkilerini iyileştirerek modal davranışın düzenlenmesini, sesin hacimde homojen yayılmasını ve 0 basınç noktalarının oluşumunu en aza indirmeyi, konumlarını hacmin kullanımında olası alıcı noktarında oluşmasını önlemeyi (hacmin orta noktasında oluşan bu sıfır basınç noktasını kaydırmayı), amaçlamaktadır. Köşe değişiklikleri, düşük frekanslı modların etkin olduğu köşe noktalarında uygulanarak hacmin yüzey düzensizliğini sağlamayı ve sesin merkezde sıfır basınç noktası oluşturmasını önlenmeyi amaçlamaktadır.

Küp hacme ait en düşük aksiyel mod, kritik frekans, Schroeder frekansı ve frekans bölgesi verileri kullanılarak hacimde yapılacak şekil değişikliklerinin boyutsal özellikleri belirlenmiştir. Küp hacmin mod bölgesi Şekil 4.113'te gösterilmektedir. Hacimde RT=0.4 s olarak kabul edildiğinde Schroeder frekansı 63 Hz. olarak hesaplanır.



Şekil 4.113 : Küp hacmin frekans bölgesi ve sınır frekans değerleri

Hacmin birinci aksiyel mod frekansı f_1=23.3 Hz. ve dalga boyu (c_0/f)(C_0=343 m/s) λ_1=14,72 m olarak hesaplanır. Frekanslara ait dalga boylarının birbirleriyle ilişkileri ve matematiksel oranları Çizelge 4.20'de gösterilmektedir.

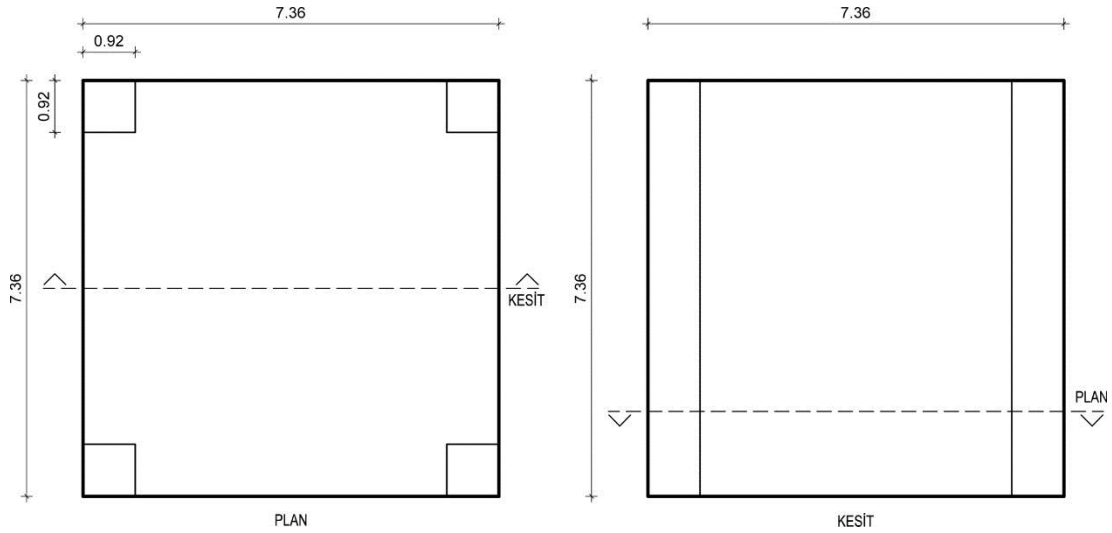
Çizelge 4.20 : 1:1:1 oranlarına sahip hacmin frekans ve dalga boyu değerleri

	Frekans (Hz.)(f)	Dalga Boyu (m)(λ)		
f_1	*23.3*	14.72	λ_1	λ
f_2	*46.6*	7.36	λ_2	$\lambda/2$
f_3	*69.9*	3.68	λ_3	$\lambda/4$
f_4	*93.2*	1.84	λ_4	$\lambda/8$
f_5	*116.5*	0.92	λ_5	$\lambda/16$
f_6	*139.8*	0.46	λ_6	$\lambda/32$
f_7	*163.1*	0.23	λ_7	$\lambda/64$
f_8	*186.4*	0.115	λ_8	$\lambda/128$

Modlara ait dalga boyları hacmin boyutları ile ilişkili olduğundan, hacim içerisinde yapılacak değişiklikler boyutsal olarak bu dalga boyu değerlerine uygun ve ilişkili yapılmıştır. λ/4, λ/8, λ/16 değerleri hacim içerisindeki boyutsal uygunlukları ve akustik işlemlerindeki yaygın kullanımlara yakın değerlerde olmalarından dolayı seçilmiştir.

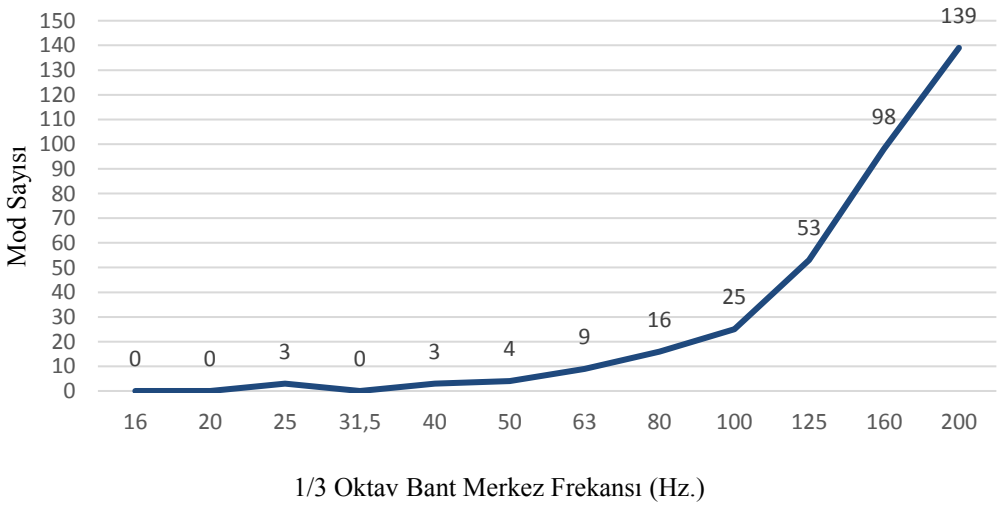
4.4.1 Birim küp hacmin köşe ve yüzey şekillerinin değiştirilerek incelenmesi

Küp hacme uygulanan ilk köşe değişimi; odanın dört köşesine yerleştirilen ve oda yüksekliğince devam eden, 0,92x0,92 m ebatlarında kare köşe elemanları kullanılmasıdır. Hacmin plan ve kesit çizimleri Şekil 4.114'te gösterilmektedir.



Şekil 4.114 : Küp hacme uygulanan köşe elemanlarının plan ve kesit görünüşleri.

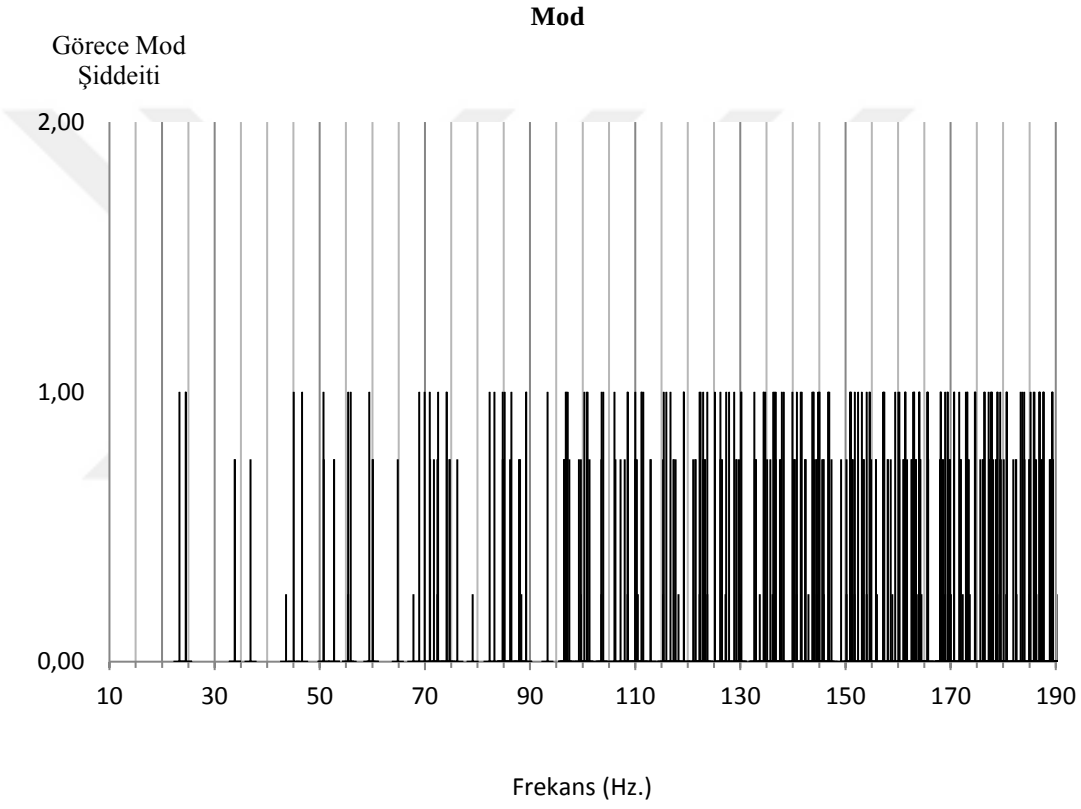
Hacmin modal yoğunluğu Şekil 4.115'te gösterilmektedir.



Şekil 4.115 : Birinci hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı.

Mod sayısı frekans ile doğru orantılı olarak artar. Hacmin modal yoğunluğu 50 Hz.'den sonra düzenli bir artış gösterir. 160 Hz.'de en büyük artışı gösterir. Şekil 4.102 hacmin modal yoğunluğunu ve dağılımını frekanslara bağlı olarak göstermektedir.

Şekil 4.116 hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarına ait modal yoğunluğunu ve dağılımını göstermektedir. Modların yansımalardan kaynaklı enerji düşüşleri ve farkları üzerinden modların ifadesi için bir ölçek oluşturulmuştur. Modlar düşey eksende farklı görece mod şiddetleri ile ifade edilirler. Aksiyel mod=1, teğet mod=0.75 ve oblik mod=0.25 değeri ile ifade edilir.



Şekil 4.116 : Birinci hacmin modal yoğunluk grafiği.

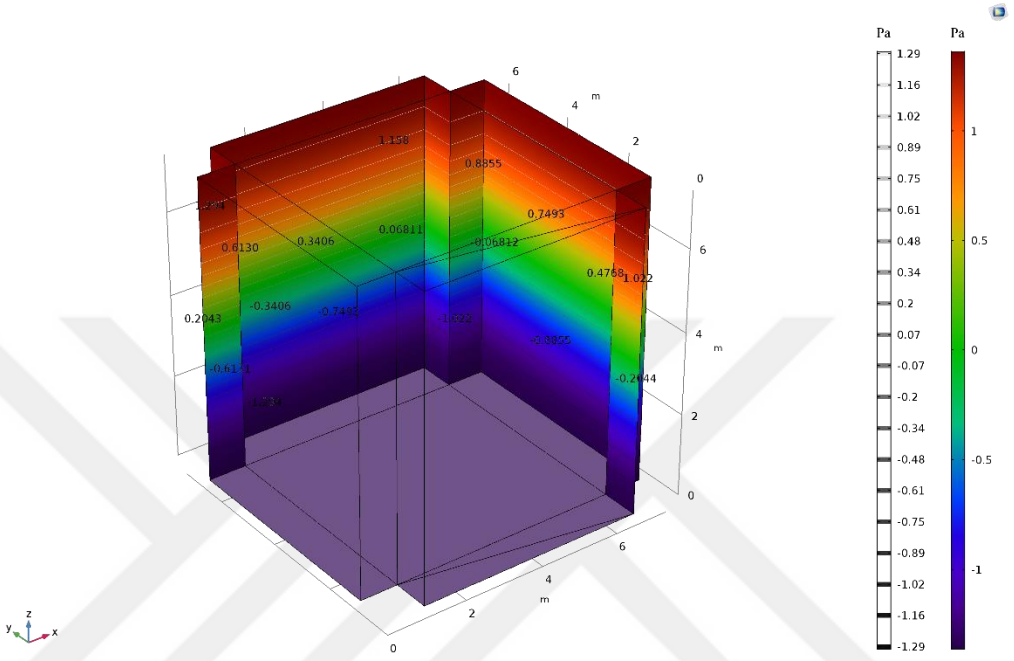
Sadece bir boyut (eksen) tarafından desteklenen tekil frekanslar mevcuttur. Örneğin, 24.56 Hz hacmin iki boyutu tarafından desteklenir. Hacmin mod frekansları kontrol hacmi olan küp hacmine kıyasla düşük frekans değerlerinde etkili bir değişim göstermemiştir. Köşelere uygulanan şekil değişikliği hacimde oluşan ilk aksiyel modun frekansında bir etki oluşturmamıştır.

Hacmin ilk 4 aksiyel, teğet, oblik mod frekansları Çizelge 4.21'de gösterilmektedir. Hacmin en (W), boy (L), yükseklik (H) boyutlarının ilk aksiyel mod frekansları sırasıyla f_W=23.3 Hz, f_L=24.56 Hz, f_H=24.56 Hz frekanslarında oluşmaktadır.

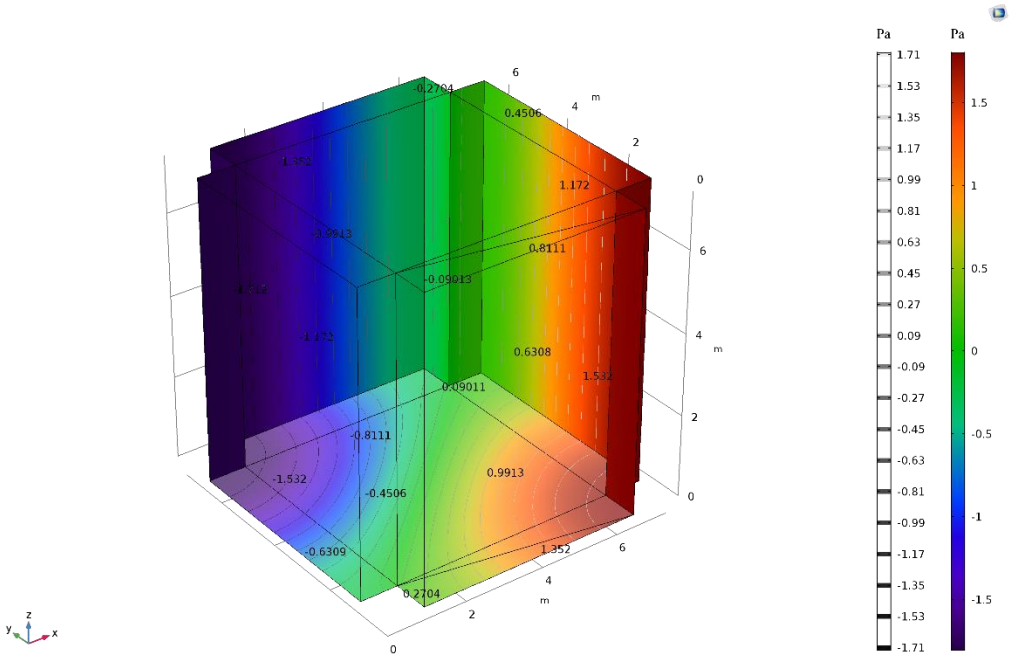
Çizelge 4.21 : Birinci hacmin ilk ilk 4 aksiyel,teğet, oblik frekansları.

Mod Sayısı	Tam Sayı			Mod Frekansı	Artan Sırada Dizilim	Mod Mesafeleri	Renk.	
	p (W)	q (L)	r (H)				Gilford	Bonello
f_1	1	0	0	23.31540025	23.31540025	1.245464783	-	+
f_2	0	1	0	24.56086503	24.56086503	0.000221252	-	+
f_3	0	0	1	24.56108628	24.56108628	9.304039412	-	-
f_4	1	1	0	33.86512569	33.86512569	0.000269999		+
f_5	0	1	1	33.86539569	33.86539569	2.975326072		-
f_6	1	0	1	36.84072176	36.84072176	6.758539198		-
f_7	1	1	1	43.59926096	43.59926096	1.462721877		+
f_8	2	0	0	45.06198284	45.06198284	1.570059243	-	+
f_9	0	2	0	46.63204208	46.63204208	4.103972928	-	-
f_{10}	0	0	2	50.73601501	50.73601501	0.033902383	-	+
f_{11}	2	2	0	50.76991739	50.76991739	1.935912632		+
f_{12}	0	2	2	52.70583003	52.70583003	0.000265185		+
f_{13}	2	0	2	52.70609521	52.70609521	2.671328399		+
f_{14}	2	2	2	55.37742361	55.37742361	0.002658241		+
f_{15}	3	0	0	55.38008185	55.38008185	0.488866456	-	+
f_{16}	0	3	0	55.86894831	55.86894831	3.562975756	-	-
f_{17}	0	0	3	59.43192406	59.43192406	0.653060323	-	+
f_{18}	3	3	0	60.08498439	60.08498439	0.003931965		+
f_{19}	0	3	3	60.08891635	60.08891635	4.762875018		-
f_{20}	3	0	3	64.85179137	64.85179137	2.941521927		+
f_{21}	3	3	3	67.7933133	67.7933133	1.148789519		+
f_{22}	4	0	0	68.94210281	68.94210281	1.013820482	-	+
f_{23}	0	4	0	69.9559233	69.9559233	0.998126422	-	+
f_{24}	0	0	4	70.95404972	70.95404972	0.003068176	-	+
f_{25}	4	4	0	70.95711789	70.95711789	0.7311826		+
f_{26}	0	4	4	71.68830049	71.68830049	0.71543204		+
f_{27}	4	0	4	72.40373253	72.40373253	0.003256569		+
f_{28}	4	4	4	72.4069891	72.4069891	0.104770626		+

Şekil 4.117 hacmin xy eksenine paralel (tavan ve döşeme yüzeyleri arasında) oluşan ilk aksiyel modunu gösterir. İlk aksiyel mod üzerinde uygulanan şekil değişiminin bir etkisi olmamıştır. Şekil 4.118'de gösterilen ikinci aksiyel mod hacmin plan köşegeni üzerinde oluşmaktadır. Dikdörtgen prizma hacimde boyut eksenlerine paralel oluşan modun, bu hacimde yönü ve konumu değişmiştir.

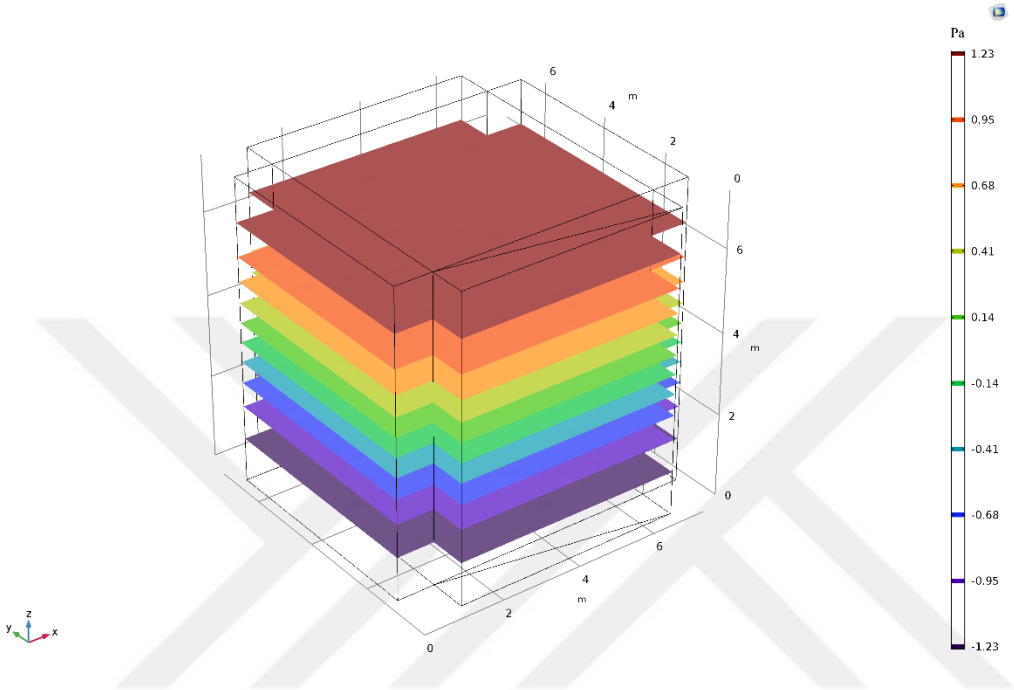


Şekil 4.117 : Hacimde oluşan birinci aksiyel mod (xy yüzeyleri) f_1=23.31 Hz. in ses basıncı (Pa).

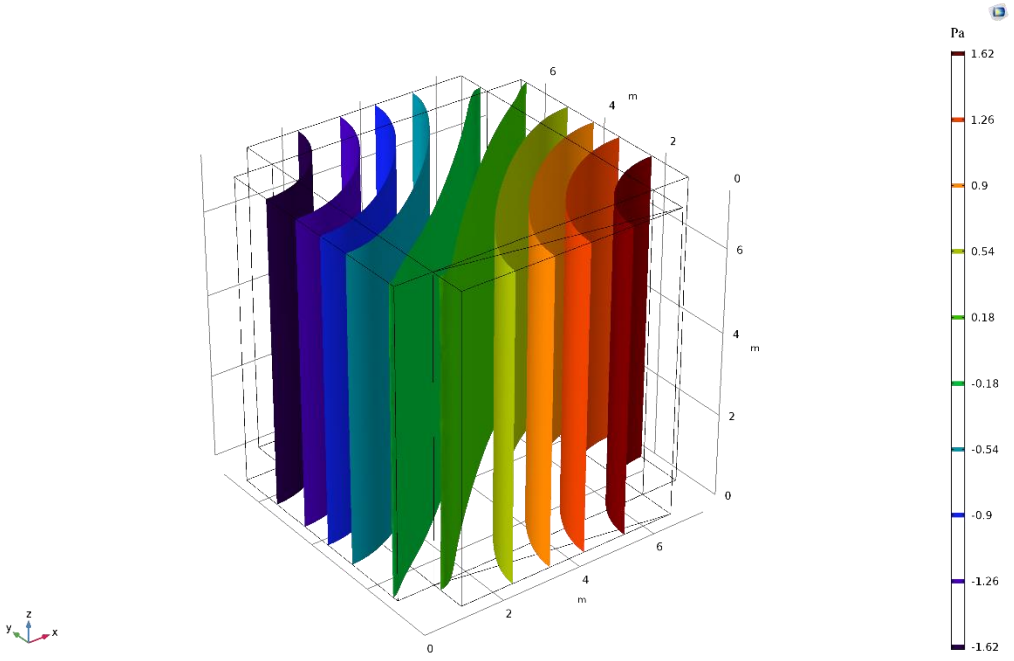


Şekil 4.118 : Hacimde oluşan ikinci aksiyel mod f_2=24.56 Hz. in ses basıncı (Pa).

Modların 3 boyutlu görseli Şekil 4.119 ve Şekil 4.120'te gösterilmektedir. Gösterim basınç değeri (Pa) üzerinden, minimum (0 Pa) ve maksimum (1 Pa) olarak ifade edilir. Eksi basınç değerleri hacmin orta ekseni orjin kabul edildiğinde basıncın konumunun zıt yönde olduğunu ifade eder. Kullanılan renkler bir dilimlenme halini ifade eder. Yükseklik eksenindeki (z ekseni) ses basınç değerlerinin değişimini ifade etmez.

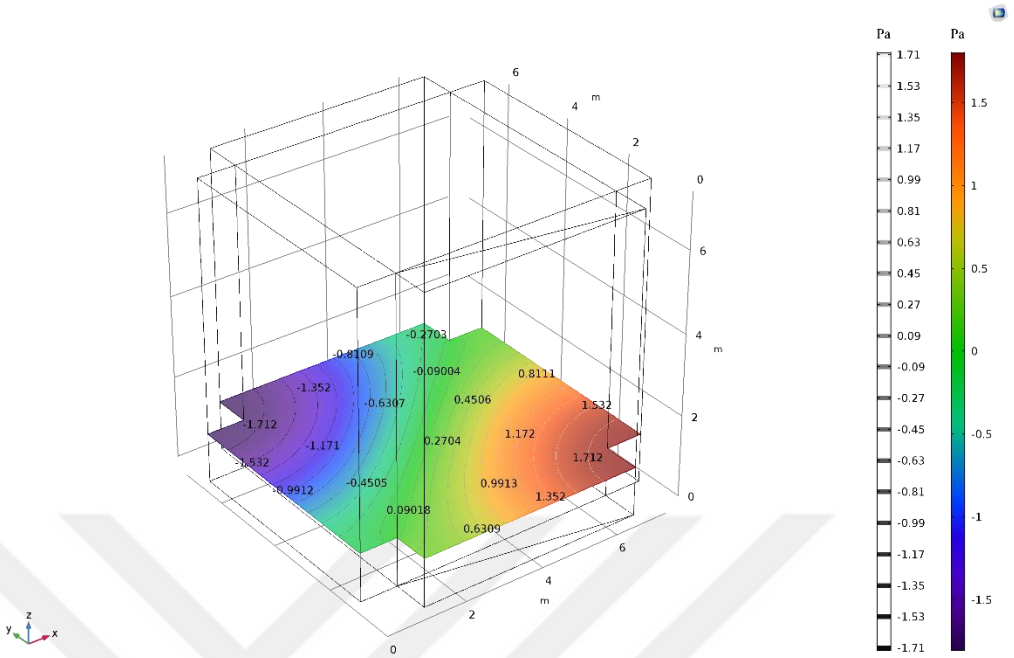


Şekil 4.119 : f_1=23.31 Hz. aksiyel modunun (xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).



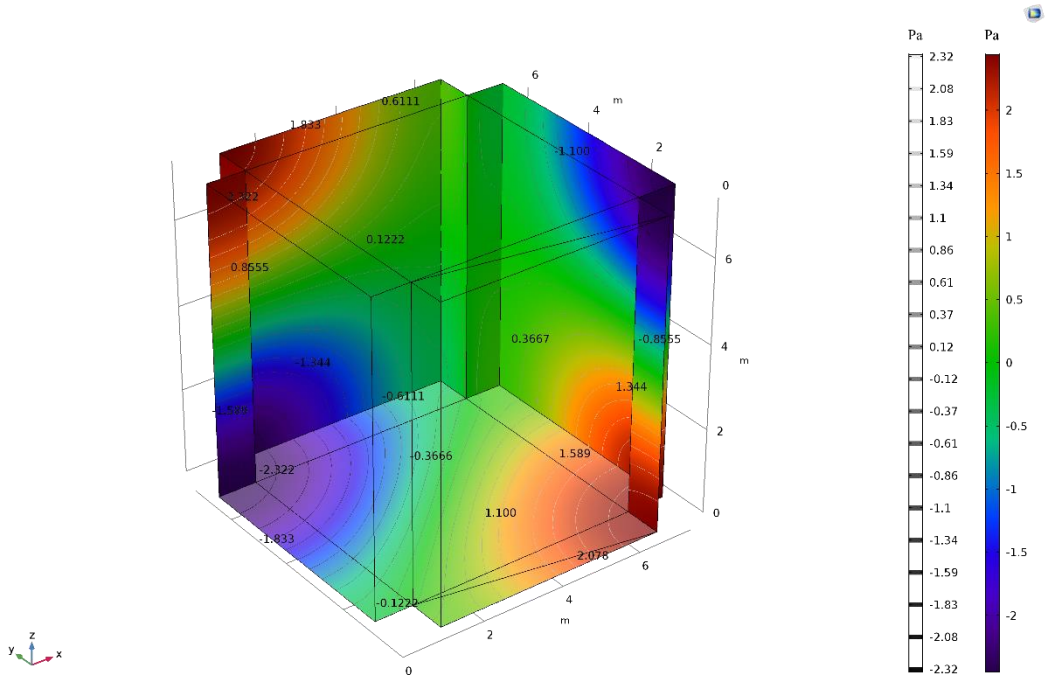
Şekil 4.120 : f_2=24.56 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa).

Modun h=1.2 m farazi alıcı konumu düzlemindeki ses basınç değerleri Şekil 4.121'de gösterilmektedir.

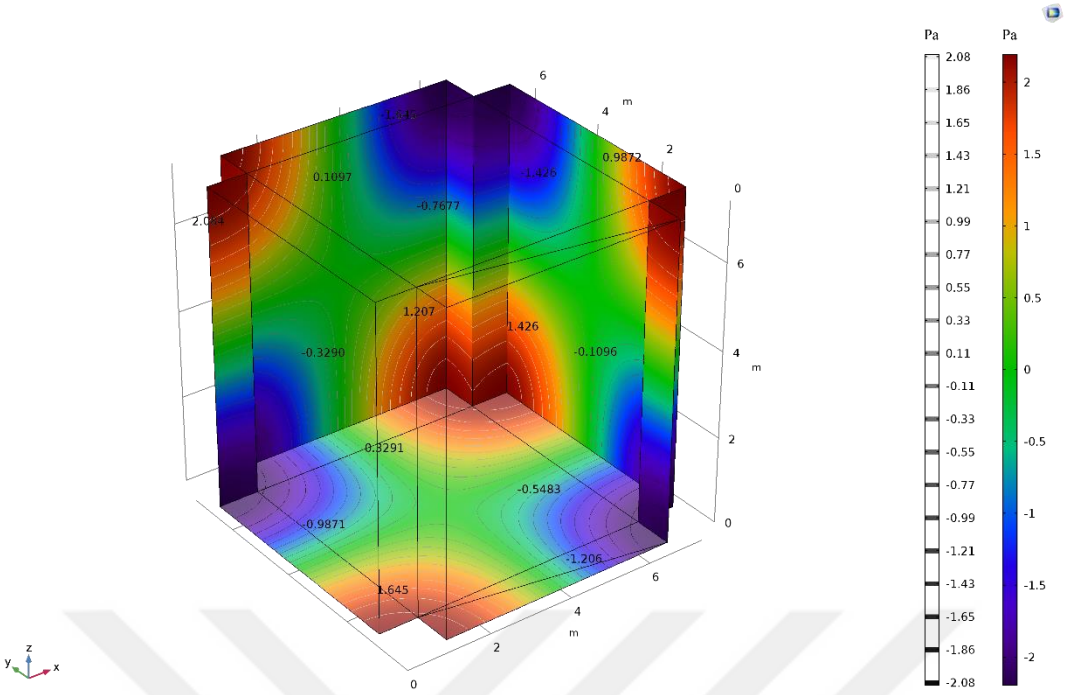


Şekil 4.121 : f_2=24.56 Hz. aksiyel modunun h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu.

Teğet ve oblik modlara ait basınç maksimumları diğer hacimlerde olduğu gibi köşe kesişim noktalarında oluşmaktadır. Şekil 4.122 ve Şekil 4.123 hacmin ilk teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modunu gösterir.

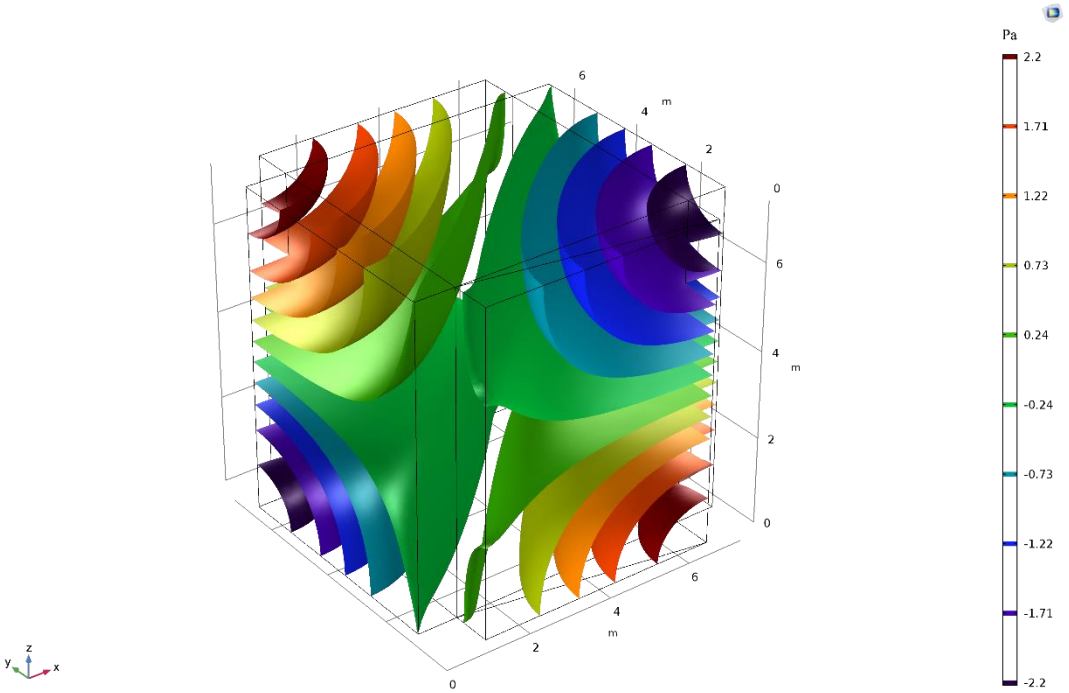


Şekil 4.122 : f_5=33.86 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

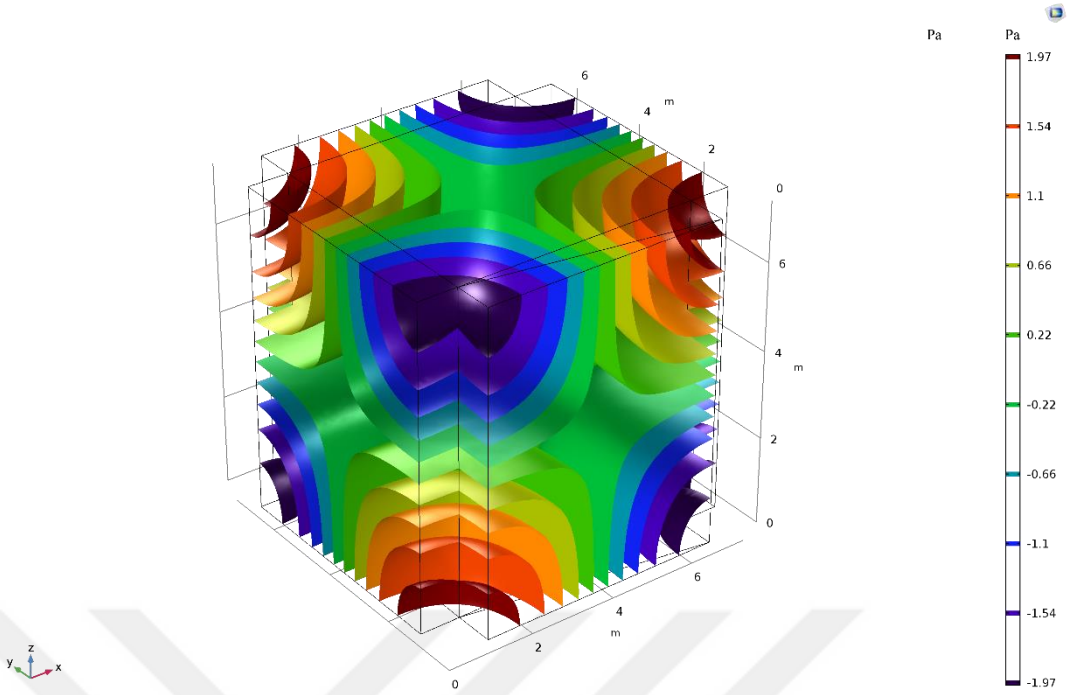


Şekil 4.123 : f_7=43.59 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

Şekil 4.124 ve Şekil 4.125 hacmin ilk teğet ve oblik modunun 3 boyutlu gösterimidir. 4 duvar yüzeyini dolaşan dalganın oluşturduğu ses yayılımının tabana da etkisi olmaktadır. Duvar yüzeylerinin kendi içinde ses basıncının yayılımını görüyoruz. 4 köşe birleşiminde ses basıncının yükseldiği görülmektedir.

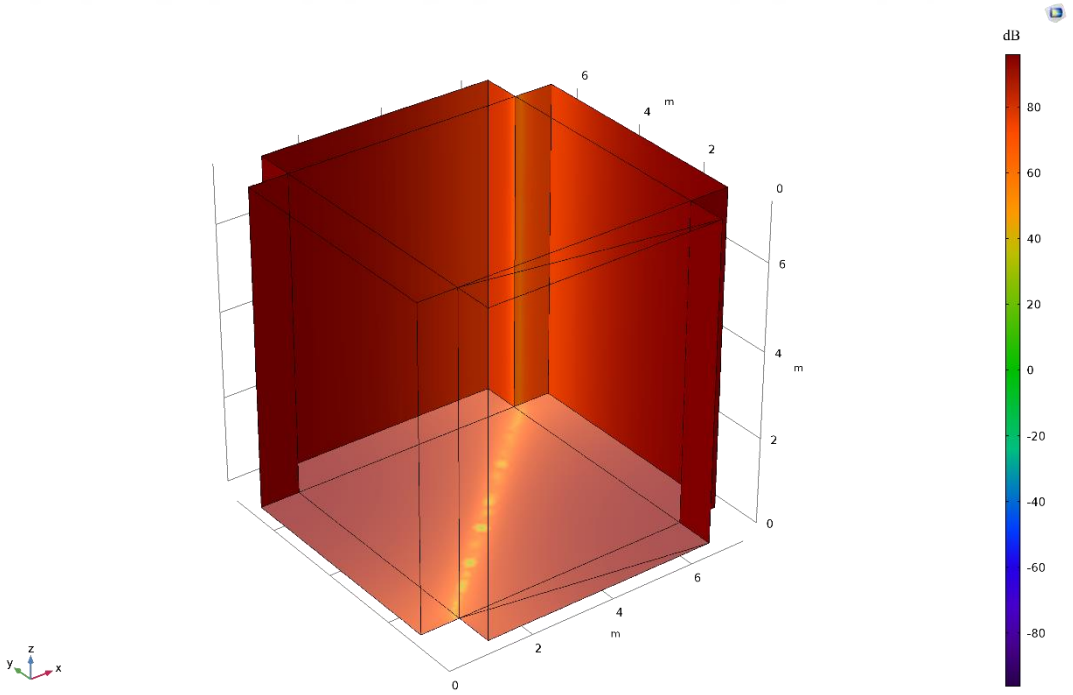


Şekil 4.124 : f_5=33.86 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).



Şekil 4.125 : f_7=43.59 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).

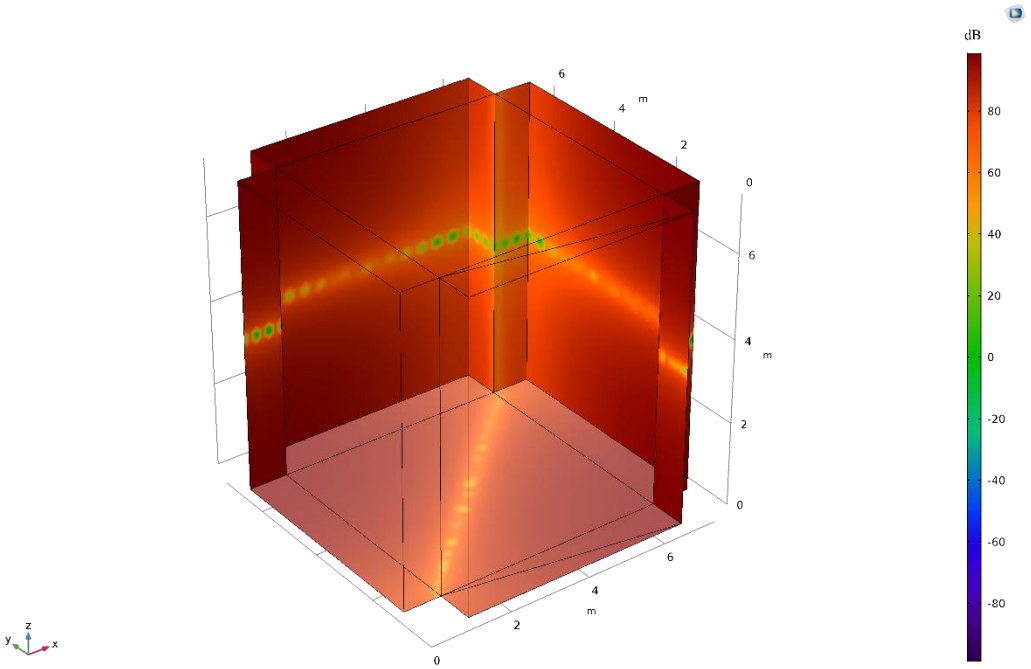
Şekil 4.126, 4.127, 4.128 hacmin ilk aksiyel, teğet ve oblik modlarının ses basınç düzeylerinin (dB değerinden) gösterimidir.



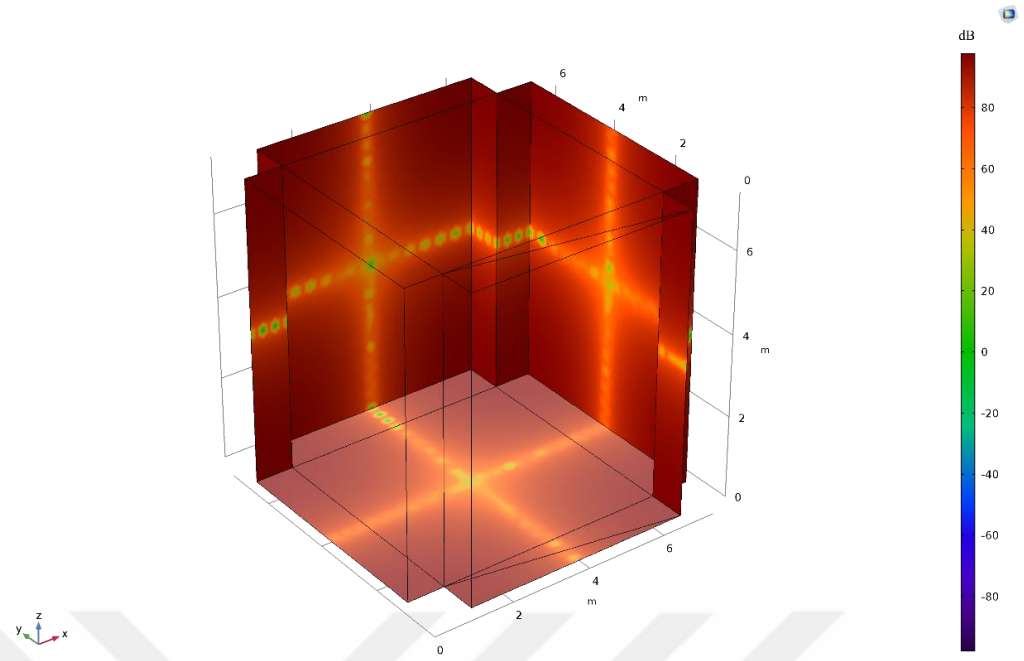
Şekil 4.126 : f_2=24.56 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).

Desibel cinsinden ses basınç düzeyi üzerinden ifade edilir ise; f_1=23.31 aksiyel modu hacmin plan eksenine paralel uzanan bir 0 basınç çizgisi oluşturur. f_2=24.56 aksiyel modu hacmin köşegeni üzerinde bir 0 basınç çizgisi oluşturur (Şekil 4.126). Bu mod frekansı hacmin iki köşegeni için de oluşur. f_4=33.86 teğet modu hacmin köşe noktalarında düşey eksen boyunca uzanan basınç maksimumları oluşturur. Hacmin merkezinde ve yüzeylerinde 0 basınç çizgisi oluşur (Şekil 4.127). f_7=43.59 oblik modu tüm köşe noktalarında maksimum basınç noktası oluşturur. Bu basınç noktaları küp hacme benzer şekil ve konumda oluşur. Hacme uygulanan yüzey değişikliği sonucunda genel mod karakteristiği dikdörtgen prizma odaların gösterdiği konum özelliklerini tekrarlar. Daha büyük boyutlu şekil değişiklikleri hacmin kullanılabilir alanında azalmalara sebep olacağından ilk aksiyel mod frekansı dalga boyunun 16'da biri olan bu boyut üzerinde durulmuştur. Köşe noktalarına uygulalanan değişiklikler düşük frekanslarda yüzey boyutları (0.92 m) itibari ile etkili olmamıştır.

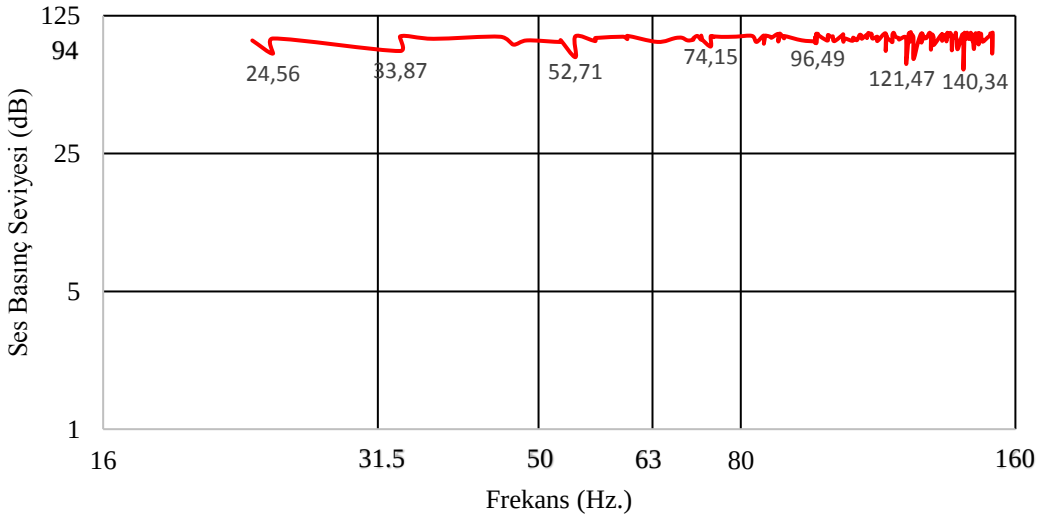
Hacme yapılan işlem sonucunda amaçlanan oda merkezinde oluşan basınç minimumu noktasını, merkezden uzaklaştırmak ve olası alıcı konumu ile çakışmayacağı bir konumda oluşmasını sağlama düşüncesi bu hacimde sağlanamamaktadır. Modlara ait frekans değerlerinde farklılıklar okunsa da modların konum özellikleri birim küp hacimden farklı değildir.



Şekil 4.127 : f_4=33.86 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).



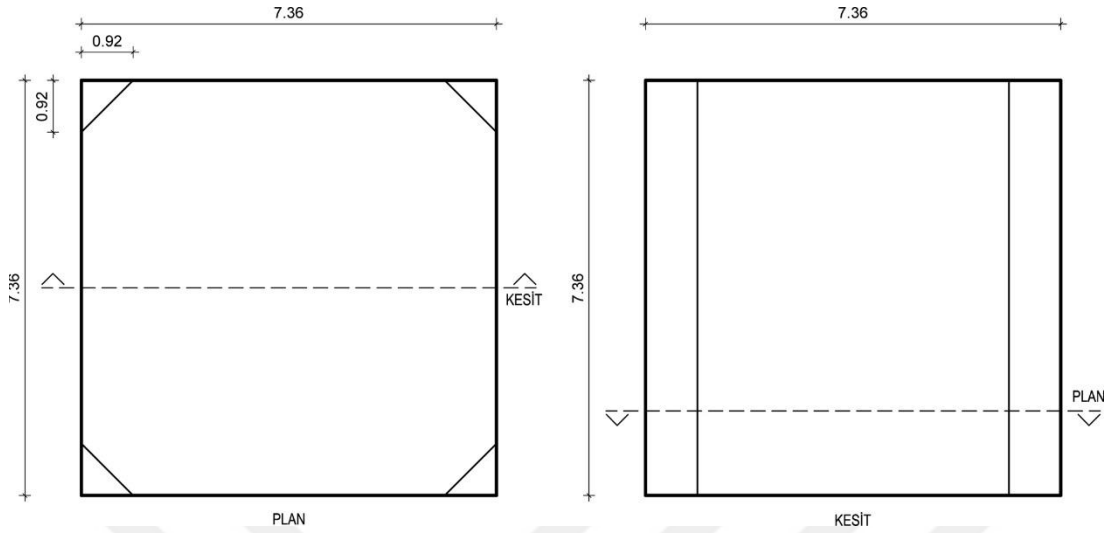
Şekil 4.128 : f_7=43.59 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).



Şekil 4.129 : Birinci hacmin frekans tepki eğrisi.

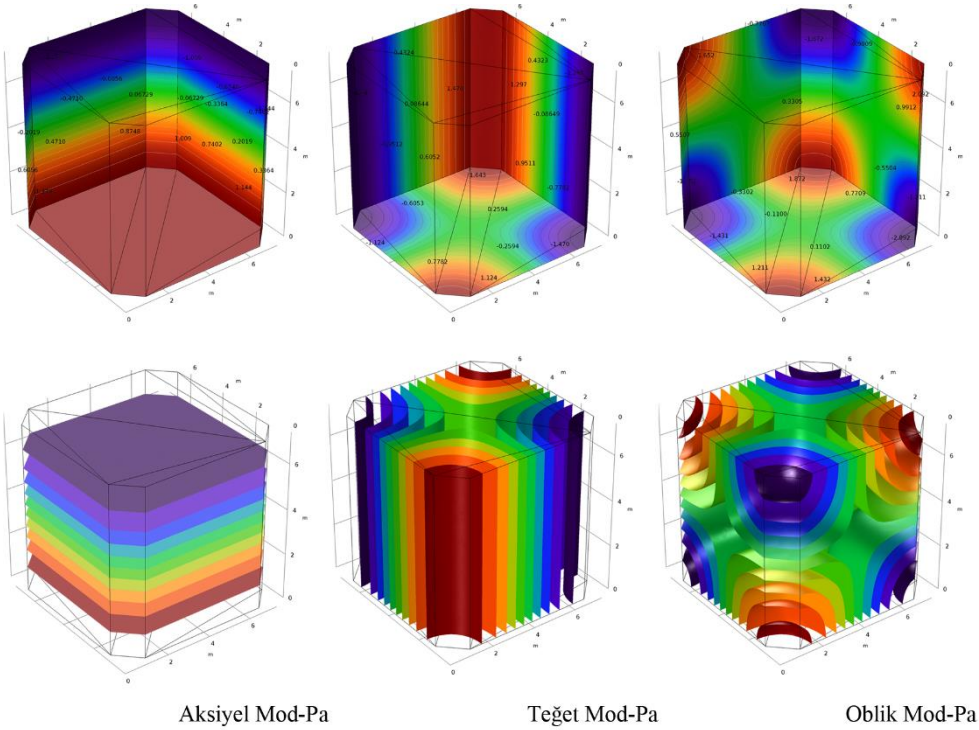
Birinci hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekans değerlerinden itibaren vadi ve tepe noktaları oluşturur. Spektrum boyunca 16 Hz. ile 80 Hz. arasında oluşan tepe ve vadi noktaları düzensiz ve seyrektir. 80 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Frekans tepki eğrisi, pik noktaların aralıkları ve oluşum bölgeleri açısından küp hacim ile benzerdir. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 98 dB ile 66 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir. Bu aralık birim küp hacme göre daha dar bir skaladadır.

Küp hacme uygulanan ikinci köşe değişimi; oda köşelerinin pahlanması olmuştur. Hacmin plan ve kesit çizimleri Şekil 4.130'da gösterilmektedir.



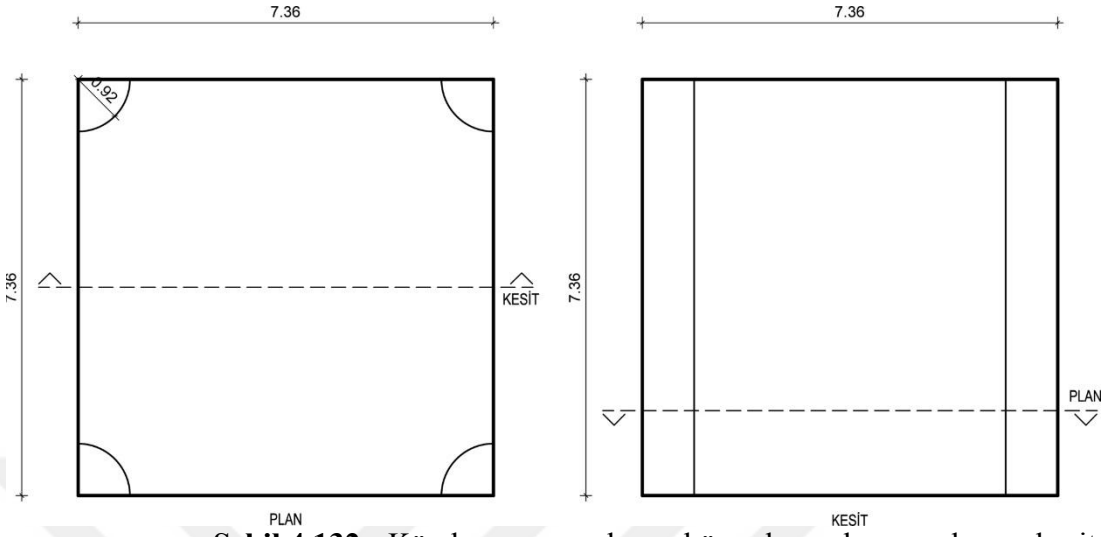
Şekil 4.130 : Küp hacme uygulanan köşe elemanlarının plan ve kesit görünüşleri.

Bu işlem sonrasında ikinci hacmin modal frekansları uygulanan birinci hacim ile benzer olmuştur. İlk aksiyel mod frekansı değeri (f_1=23,31, f_2=23.99, f_3=23.99, f_4=33.46, f_5=33.46, f_6=34.92, f_7=41.98) aynıdır. Modların hacim içerisindeki konumları ise aynı şekilde oluşmuştur. Yüzeyin boyutu hacmin ilk modları üzerinde etkili olmamıştır. Yüzey formunun benzerliğinden dolayı detaylı olarak bahsedilmesine gerek duyulmamıştır.



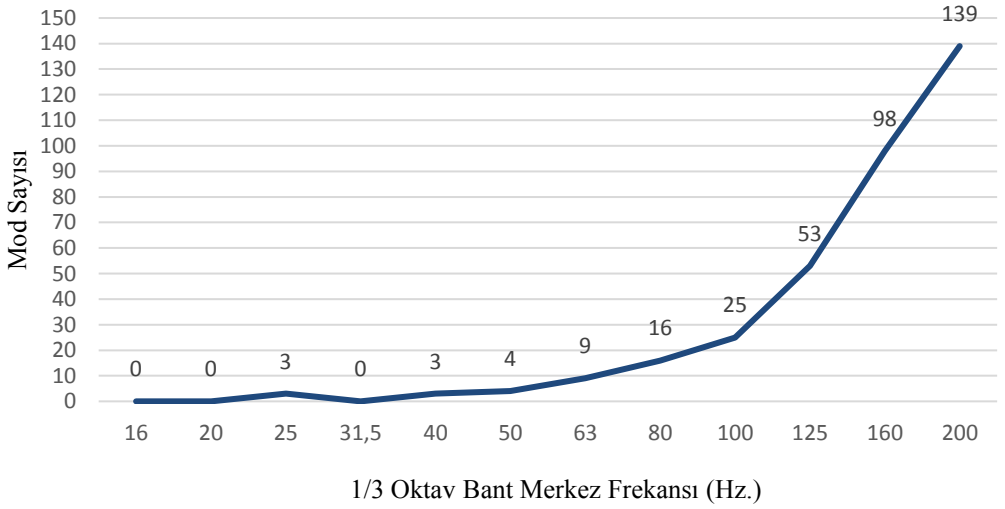
Şekil 4.131 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) gösterimleri.

Küp hacme uygulanan üçüncü köşe değişimi; odanın dört köşesine yerleştirilen ve oda yüksekliğince devam eden, 0,92 m yarı çapında dış bükey silindirik elemanlar kullanılmasıdır. Hacmin plan ve kesit çizimleri Şekil 4.132'de gösterilmektedir.



Şekil 4.132 : Küp hacme uygulanan köşe elemanlarının plan ve kesit görünüşleri.

Hacmin modal yoğunluğu Şekil 4.133'te gösterilmektedir. modlara ait basınç değeri

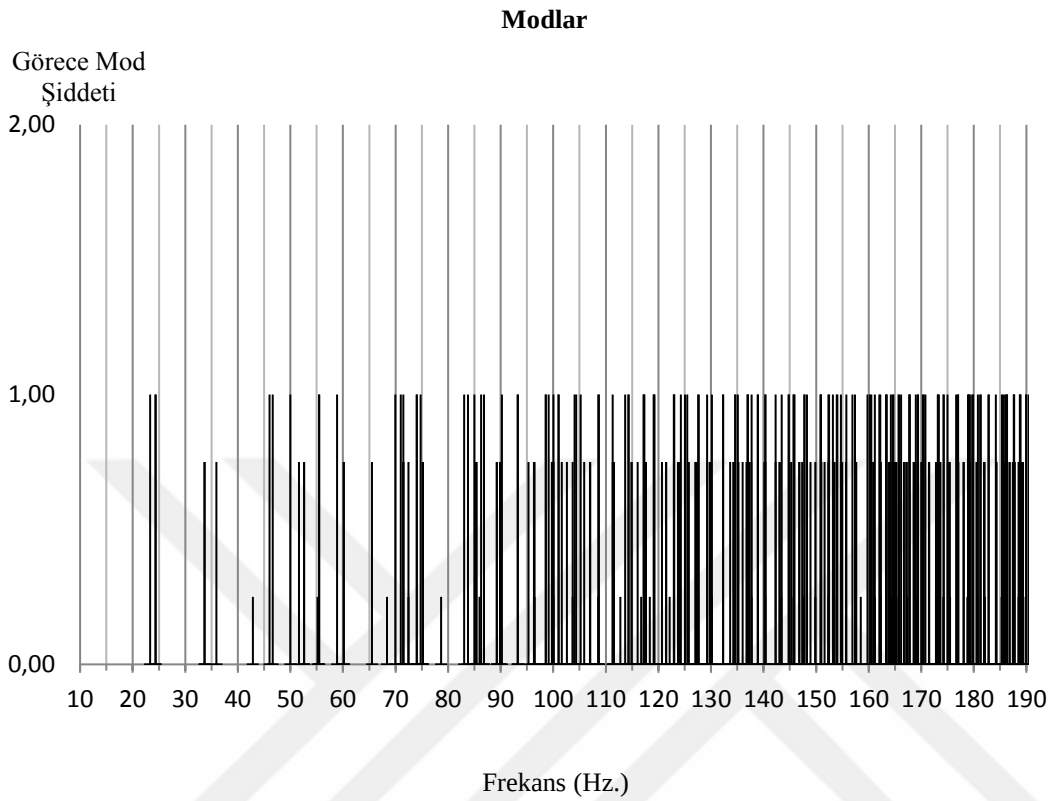


Şekil 4.133 : Üçüncü hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı.

Mod sayısı frekans ile doğru orantılı olarak artar. Hacmin modal yoğunluğu 40 Hz.'den sonra düzenli bir artış gösterir. 125 Hz.'de en büyük artışı gösterir.

Şekil 4.134 hacmin modal yoğunluğunu ve dağılımını frekanslara bağlı olarak göstermektedir. Şekil hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarına ait modal yoğunluğunu ve dağılımını göstermektedir. Modların yansımalardan kaynaklı enerji düşüşleri ve farkları üzerinden modların ifadesi için bir ölçek oluşturulmuştur. Modlar düşey

eksende farklı görece mod şiddetleri ile ifade edilirler. Aksiyel mod=1, teğet mod=0.75 ve oblik mod=0.25 değeri ile ifade edilir.



Şekil 4.134 : Üçüncü hacmin modal yoğunluk grafiği.

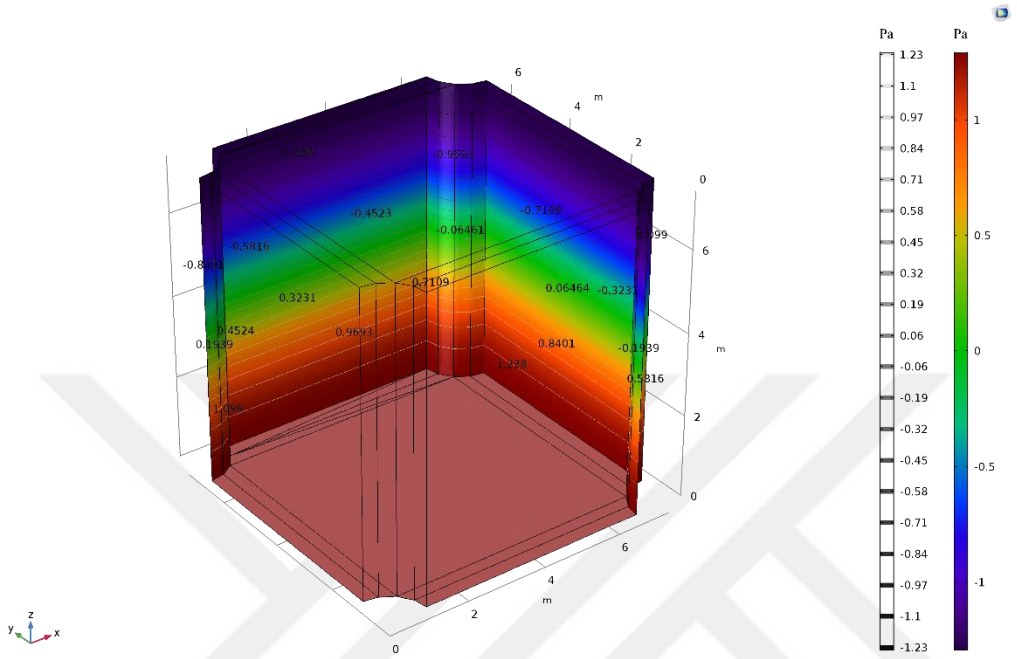
Sadece bir boyut (eksen) tarafından desteklenen tekil frekanslar ve birden fazla boyut tarafından desteklenen çakışık frekanslar mevcuttur. Örneğin, 23.31 Hz. hacmin tek bir boyutu, 24.32 Hz. hacmin iki boyutu tarafından desteklenir. Hacmin mod frekansları kontrol hacmi olan küp hacmine kıyasla düşük frekans değerlerinde etkili bir değişim göstermemiştir. Köşelere uygulanan şekil değişimi hacimde oluşan ilk aksiyel modun frekansında bir etki oluşturmamıştır. Hacmin modal yoğunluğu belirli frekans aralıklarında sıklaşırken özellikle düşük frekans bölgesinde belirgin bir seyreklik gösterir. 165 Hz. ve üzerinde modal sıklık oldukça fazladır. 90 Hz. ile 110 Hz. bölgesinde seyrelme gözlemlenir. Bu seyrelme durumu 40 Hz., 60 Hz., 110 Hz., 130 Hz., 145 Hz., 160 Hz. frekans bölgelerinde de gözlenir. Frekans arttıkça seyrelme bölgelerinin genişliği azalır.

Hacmin ilk 4 aksiyel, teğet, oblik mod frekansları Çizelge 4.22'de gösterilmektedir. Hacmin en (W), boy (L), yükseklik (H) boyutlarının ilk aksiyel mod frekansları sırasıyla f_W=23.31 Hz, f_L=24.32 Hz, f_H=33.69 Hz. frekanslarında oluşmaktadır.

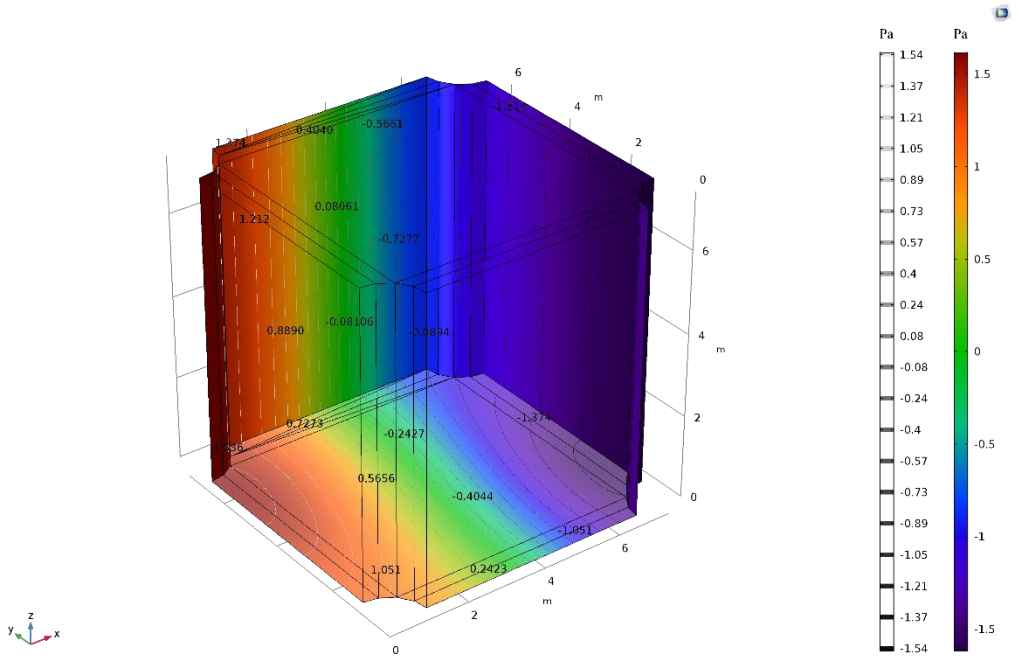
Çizelge 4.22 : Üçüncü hacmin ilk 4 aksiyel,teğet, oblik mod frekansları.

Mod Sayısı	Tam Sayı			Mod Frekansı	Artan Sırada Dizilim	Mod Mesafeleri	Renk.	
	p (W)	q (L)	r (H)				Gilford	Bonello
f_1	1	0	0	23.315402	23.315402	1.014034439	-	+
f_2	0	1	0	24.32943644	24.32943644	2.94489E-05	-	-
f_3	0	0	1	24.32946588	24.32946588	9.368318132	-	-
f_4	1	1	0	33.69778402	33.69778402	5.49245E-05		-
f_5	0	1	1	33.69783894	33.69783894	2.243893636		-
f_6	1	0	1	35.94173258	35.94173258	6.900539832		-
f_7	1	1	1	42.84227241	42.84227241	3.209969167		-
f_8	2	0	0	46.05224158	46.05224158	0.579829369	-	+
f_9	0	2	0	46.63207094	46.63207094	3.36281762	-	-
f_{10}	0	0	2	49.99488856	49.99488856	1.623950616	-	+
f_{11}	2	2	0	51.61883918	51.61883918	0.979622277		+
f_{12}	0	2	2	52.59846146	52.59846146	8.00437E-05		-
f_{13}	2	0	2	52.5985415	52.5985415	2.567048084		+
f_{14}	2	2	2	55.16558958	55.16558958	0.278030683		+
f_{15}	3	0	0	55.44362027	55.44362027	0.000610116	-	+
f_{16}	0	3	0	55.44423038	55.44423038	3.434578619	-	-
f_{17}	0	0	3	58.878809	58.878809	1.269084478	-	+
f_{18}	3	3	0	60.14789348	60.14789348	0.000842673		+
f_{19}	0	3	3	60.14873615	60.14873615	5.395364883		-
f_{20}	3	0	3	65.54410104	65.54410104	2.829257813		+
f_{21}	3	3	3	68.37335885	68.37335885	1.582778147		+
f_{22}	4	0	0	69.956137	69.956137	1.066521241	-	+
f_{23}	0	4	0	71.02265824	71.02265824	0.435461624	-	+
f_{24}	0	0	4	71.45811986	71.45811986	0.024043333	-	+
f_{25}	4	4	0	71.4821632	71.4821632	0.000310362		+
f_{26}	0	4	4	71.48247356	71.48247356	0.972699654		+
f_{27}	4	0	4	72.45517321	72.45517321	0.000536723		+
f_{28}	4	4	4	72.45570993	72.45570993	1.614352041		+

Şekil 4.135 hacmin xy eksenine paralel (tavan ve döşeme yüzeyleri arasında) oluşan ilk aksiyel modunu gösterir. İlk aksiyel mod üzerinde uygulanan şekil değişiminin bir etkisi olmamıştır. Şekil 4.136'da gösterilen ikinci aksiyel mod dikdörtgen prizma hacimlerde tipik olarak oluştuğu gibi yüzeye paralel oluşmamıştır.

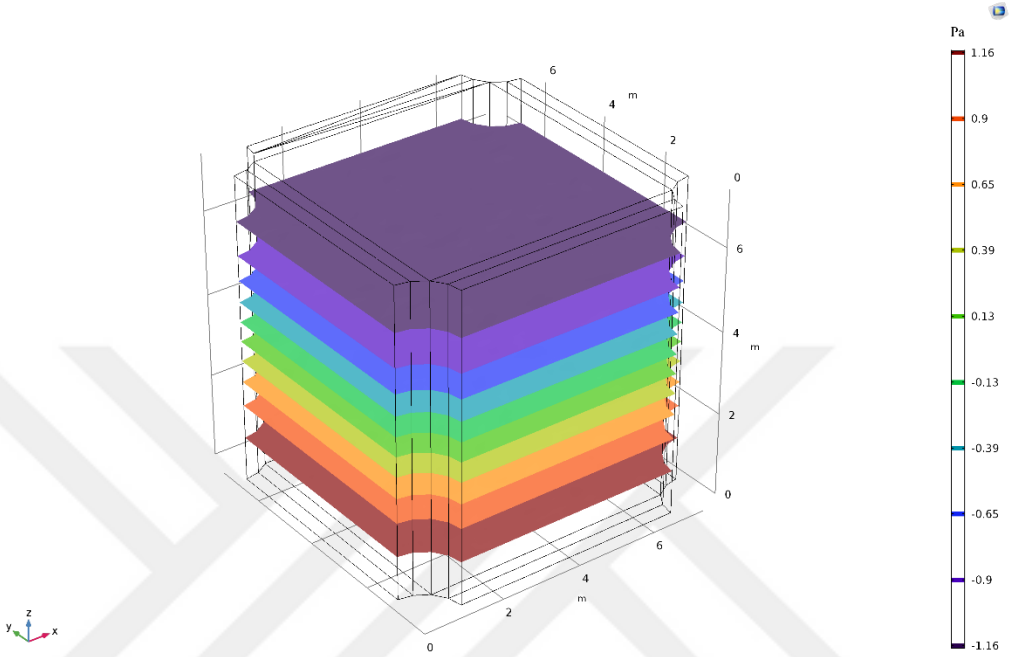


Şekil 4.135 : Hacimde oluşan birinci aksiyel mod f_1=23.31 Hz. in ses basıncı (Pa).

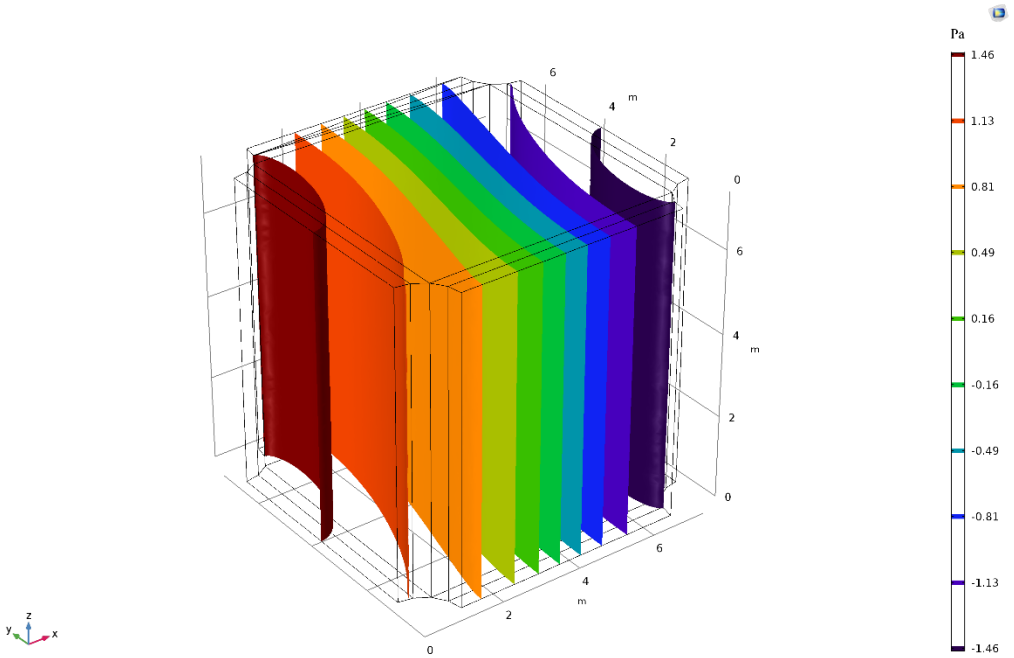


Şekil 4.136 : Hacimde oluşan ikinci aksiyel mod f_2=24.32 Hz. in ses basıncı (Pa).

Bir eğri biçiminde 0 basınç çizgisi oluşmuştur. Uygulanan şekil değişimi ikinci aksiyel modun konum ve biçim özelliklerini etkilemiştir. Dış bükey yüzey formu hacimde paralelliği bozmuştur. Dış bükey formun merkezde oluşan 0 basınç çizgisinin konumunu değiştirdiği görülür. Modların 3 boyutlu görseli Şekil 4.137 ve Şekil 4.138'de gösterilmektedir.

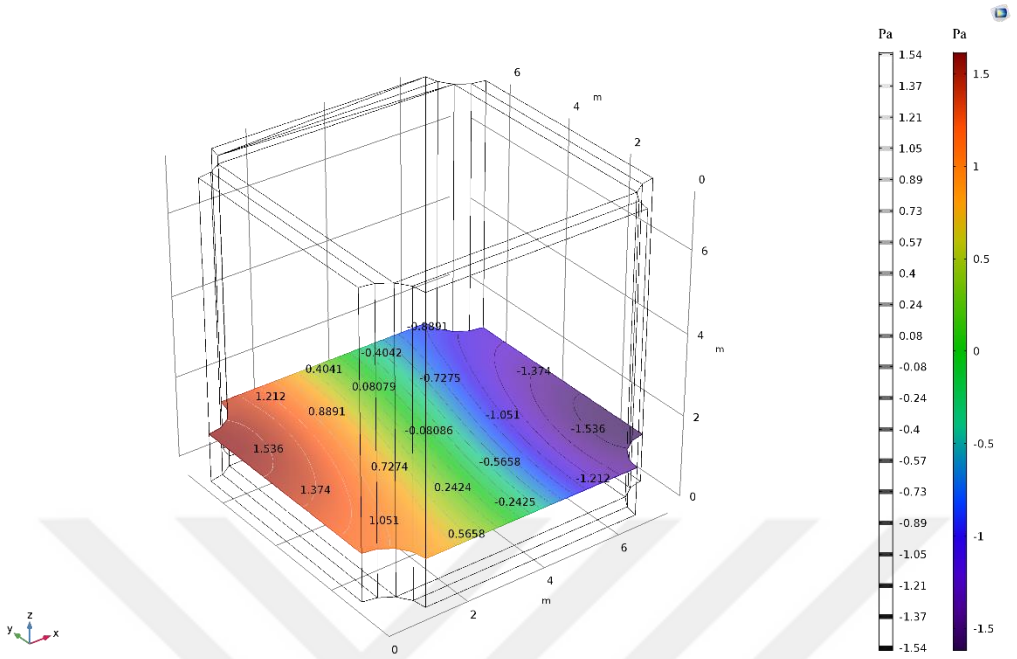


Şekil 4.137 : f_1=23.31 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa).



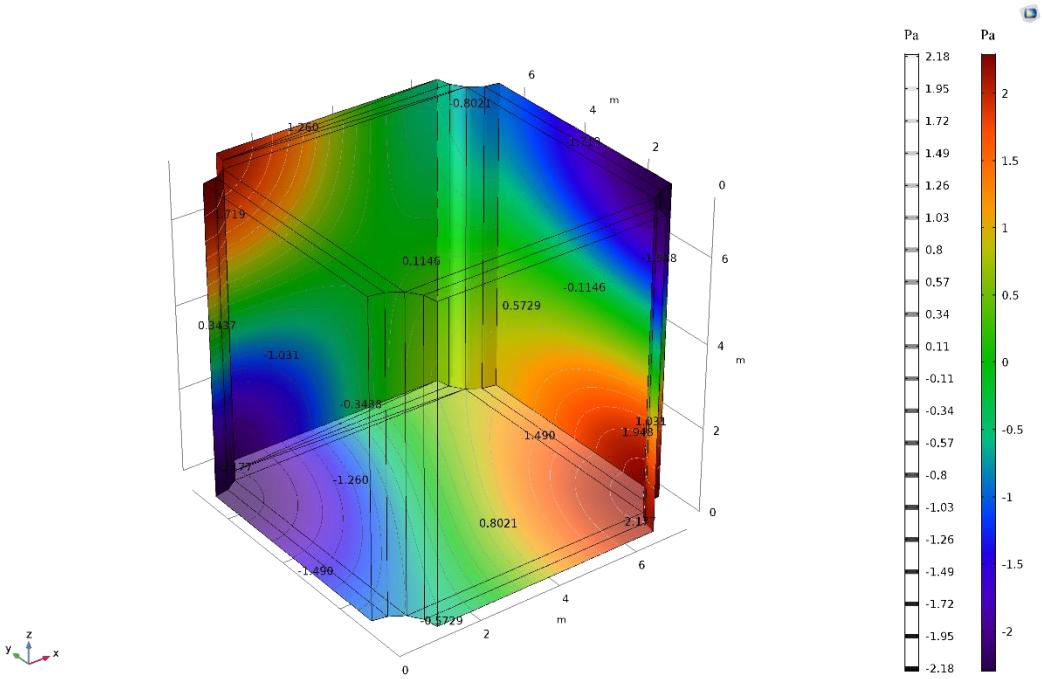
Şekil 4.138 : f_2=24.32 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa).

Modun h=1.2 m farazi alıcı konumu düzlemindeki ses basınç değerleri Şekil 4.139'da gösterilmektedir.

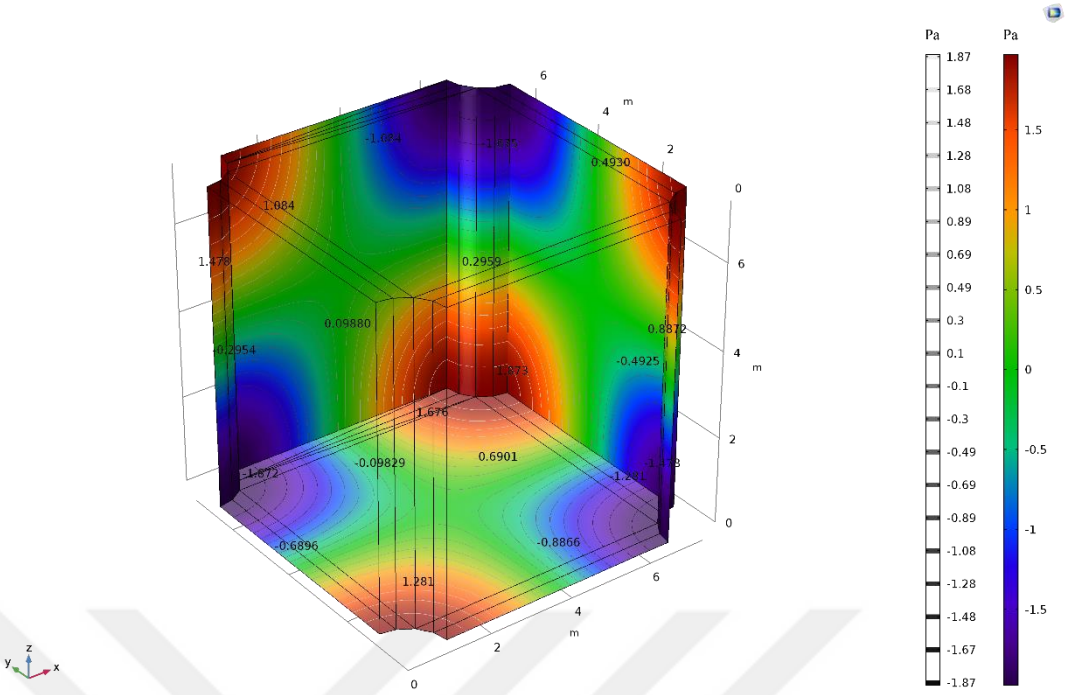


Şekil 4.139 : f_2=24.32 Hz. aksiyel modunun h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu.

Teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modlara ait basınç maksimumları diğer hacimlerde olduğu gibi köşe kesişim noktalarında oluşmaktadır. Şekil 4.140 ve Şekil 4.141 hacmin ilk teğet ve oblik modunu gösterir.

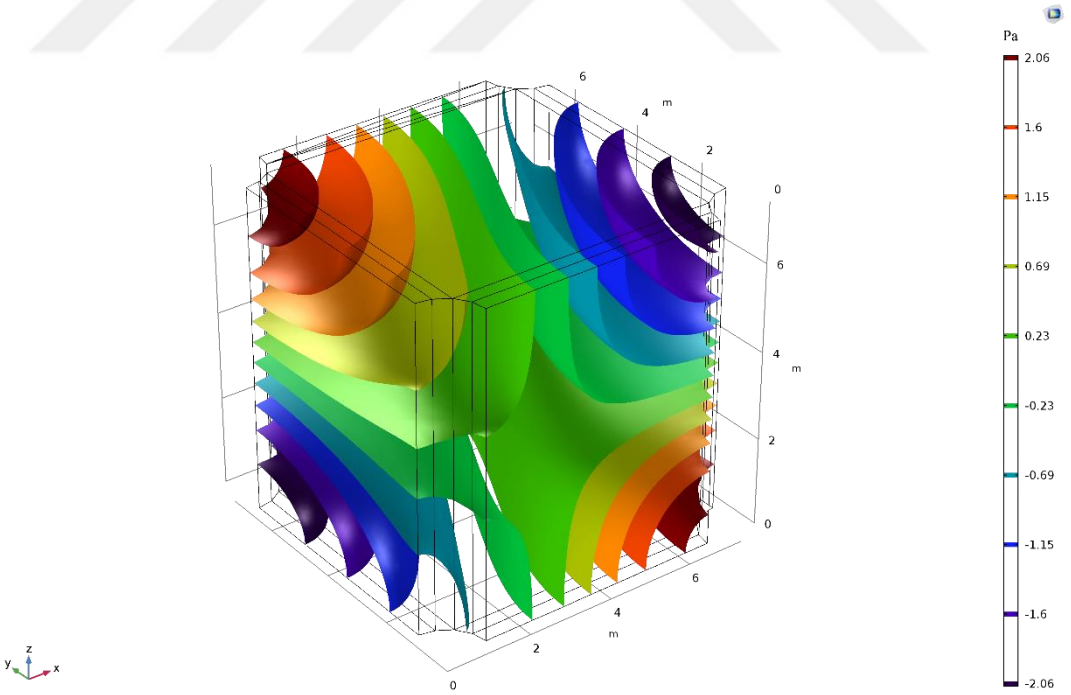


Şekil 4.140 : f_5=33.69 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

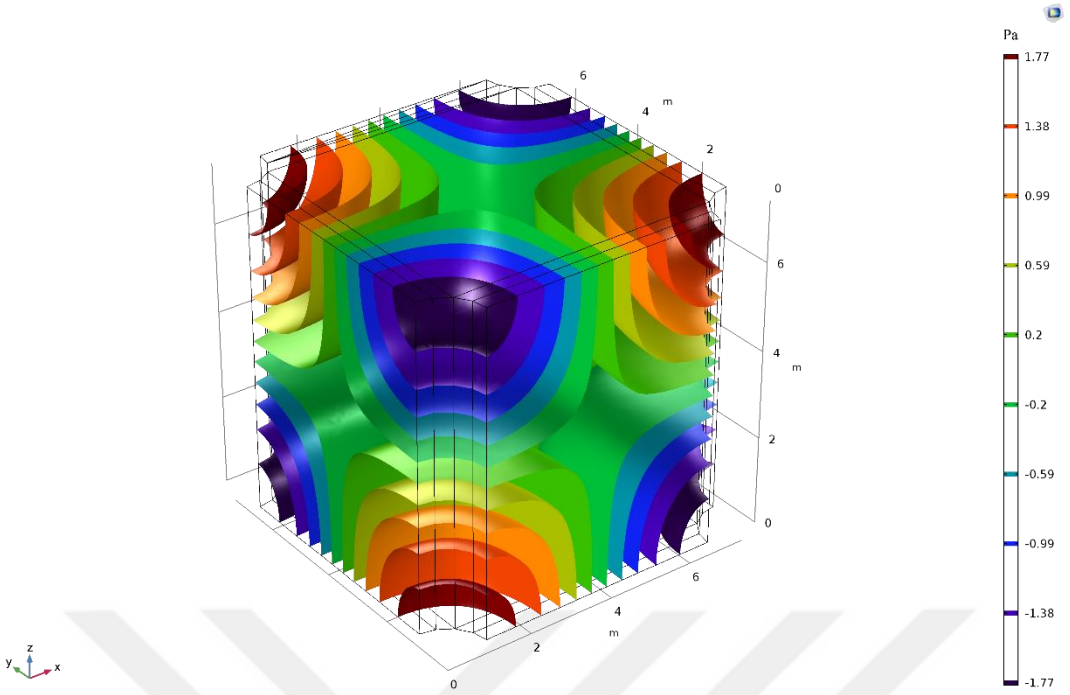


Şekil 4.141 : f_7=42.84 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

Şekil 4.142 ve Şekil 4.143 hacmin ilk teğet ve oblik modunun 3 boyutlu gösterimidir.

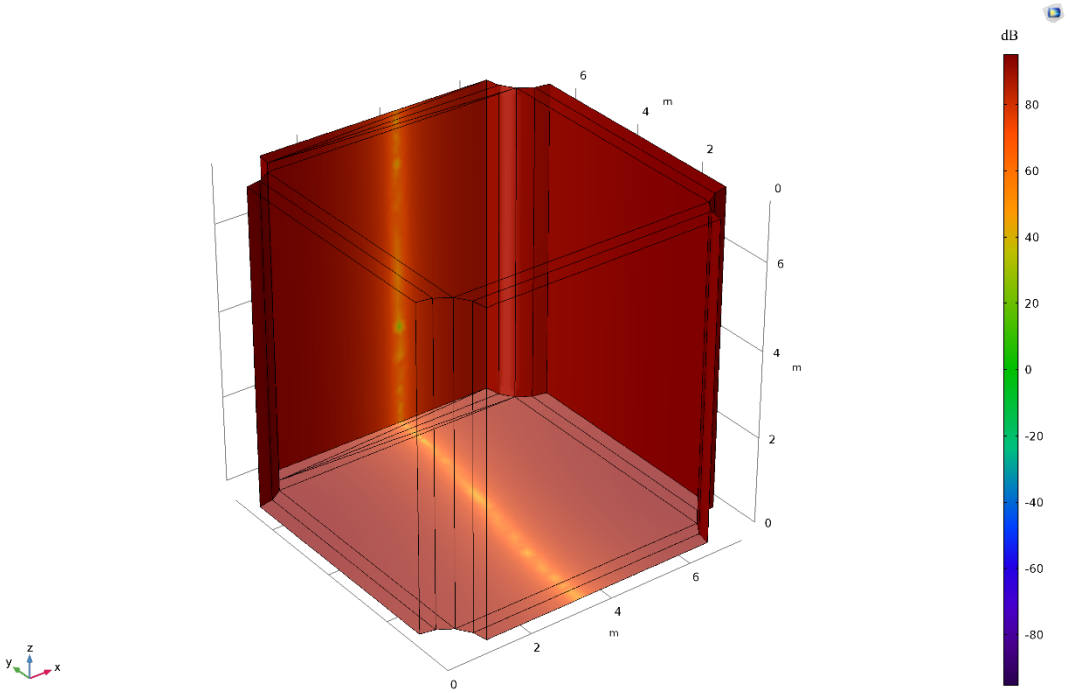


Şekil 4.142 : f_5=33.69 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).



Şekil 4.143 : f_7=42.84 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).

Şekil 4.144, 4.145, 4.146 hacmin ilk aksiyel, teğet ve oblik modlarının ses basınç düzeylerinin (dB değerinden) gösterimidir. Duvar yüzeylerinin kendi içinde ses basıncının yayılımını görüyoruz. 4 köşe birleşiminde ses basıncının yükseldiği görülmektedir.



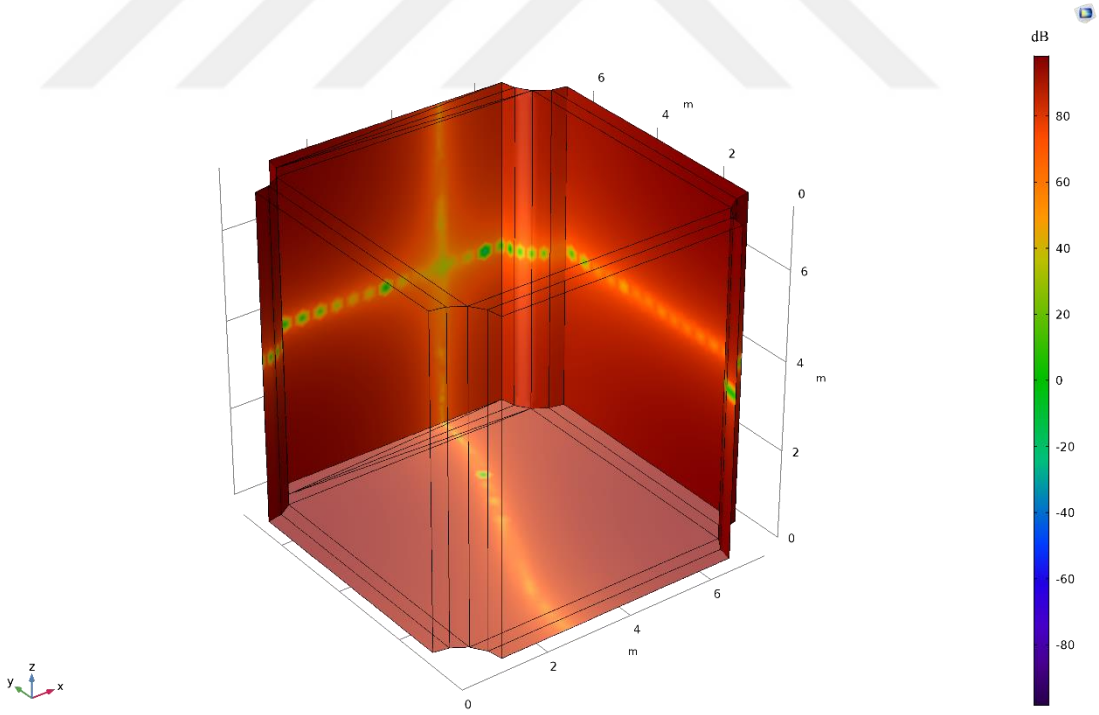
Şekil 4.144 : f_2=24.32 Hz. aksiyel (yz yüzeyleri) modunun 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).

Desibel cinsinden ses düzeyi üzerinden ifade edilir ise; f_1=23.31 aksiyel modu hacmin plan eksenine paralel hacmin yükseklik ekseninin orta noktasında bir 0 basınç çizgisi oluşturur. f_2=24.32 aksiyel modu hacmin y eksene yaklaşık olarak paralel uzanan bir 0 basınç çizgisi oluşturur (Şekil 4.144).

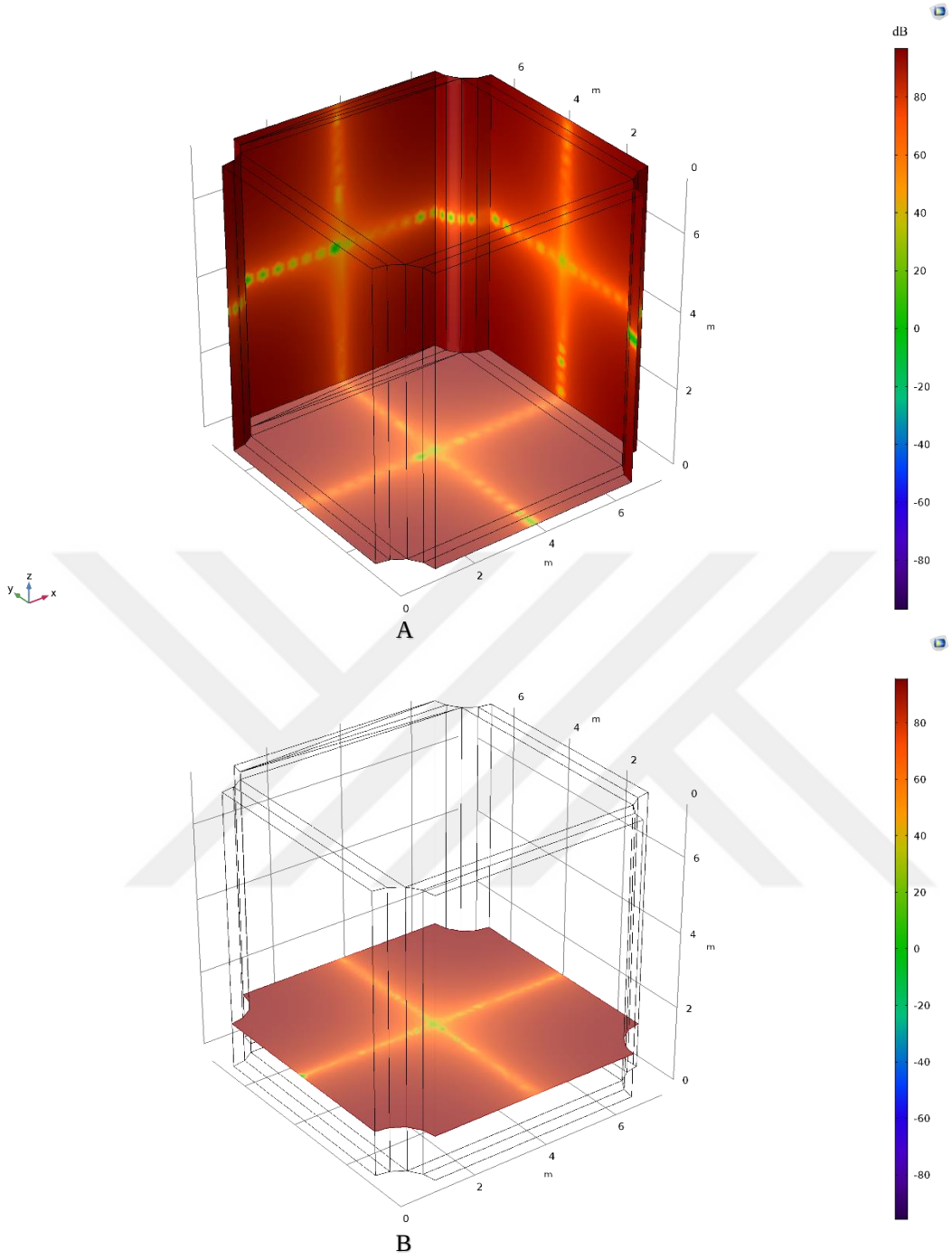
Daha önceki çalışmalarda bu çizgi eksene tam olarak paralel oluşurken bu çalışmada çizgi hacmin köşe noktasına doğru bükülmüştür. Bu mod frekansı hacmin iki boyut ekseni x ve y için oluşur. f_4=33.69 teğet modu için de köşe noktalarında paralelliği bozan bükülmeler oluşur.

Hacmin merkezinde ve yüzeylerinde 0 basınç çizgisi oluşur (Şekil 4.145). f_7=42.84 oblik modu tüm köşe noktalarında maksimum basınç noktası oluşturur. Bu basınç noktaları küp hacme benzer şekil ve konumda oluşur.

Daha büyük boyutlu şekil değişiklikleri hacmin kullanılabilir alanında azalmalara sebep olacağından ilk aksiyel mod frekansı dalga boyunun 16'da biri olan bu boyut üzerinde durulmuştur. Köşe noktalarına uygulalanan işlem düşük frekanslarda yüzey boyutları (0.92 m) itibari ile etkili olmamıştır.

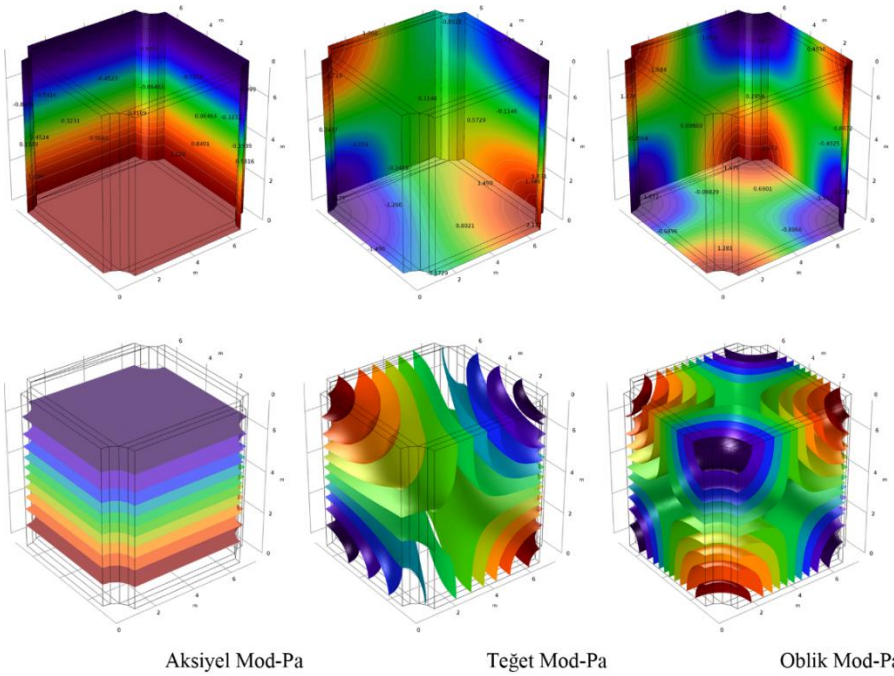


Şekil 4.145 : f_4=33.69 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).

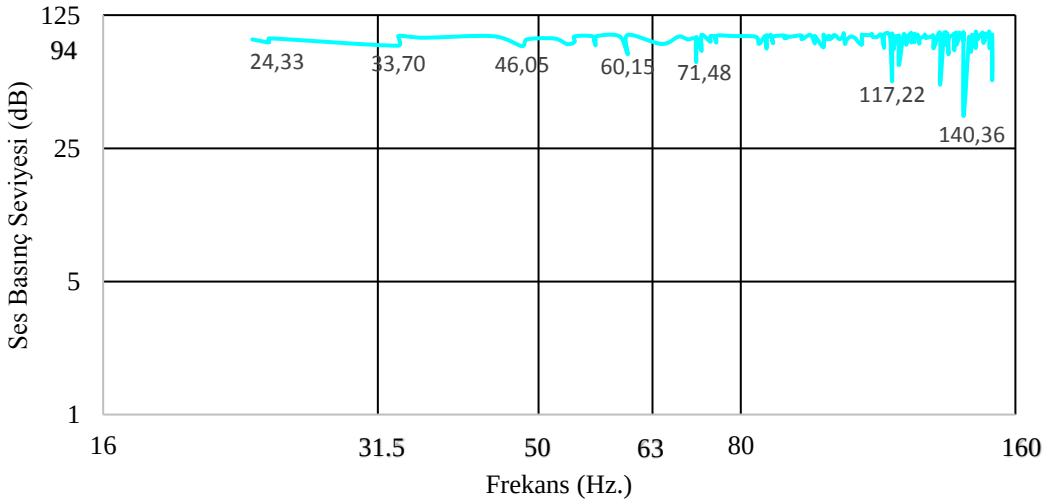


Şekil 4.146 : f_7=42.84 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu (A) ve h=1.2 düzlemindeki (B) ses basınç düzeyi (dB).

Hacme yapılan köşe şekil değişimi sonucunda amaçlanan oda merkezinde oluşan basınç minimumu noktasını, merkezden uzaklaştırmak ve olası alıcı konumu ile çakışmayacağı bir konumda oluşmasını sağlama düşüncesi bu hacimde kısmen çizginin bükülmesi ile sağlanabilmektedir ancak yeterli değildir. Modlara ait frekans değerlerinde farklılıklar okunsa da modların konum özellikleri birim küp hacimden farklı değildir.



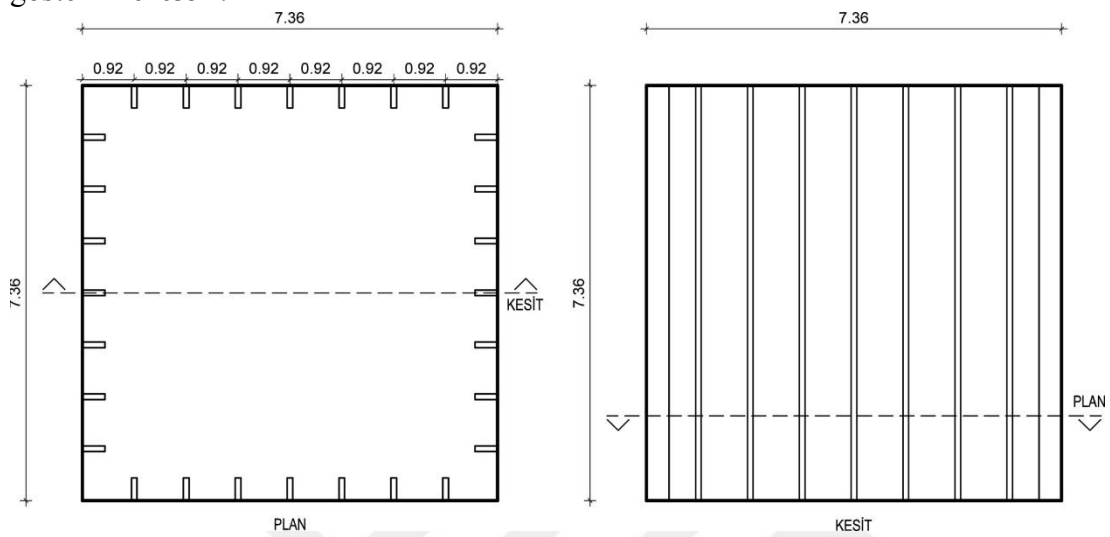
Şekil 4.147 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) gösterimleri.



Şekil 4.148 : Üçüncü hacmin frekans tepki eğrisi.

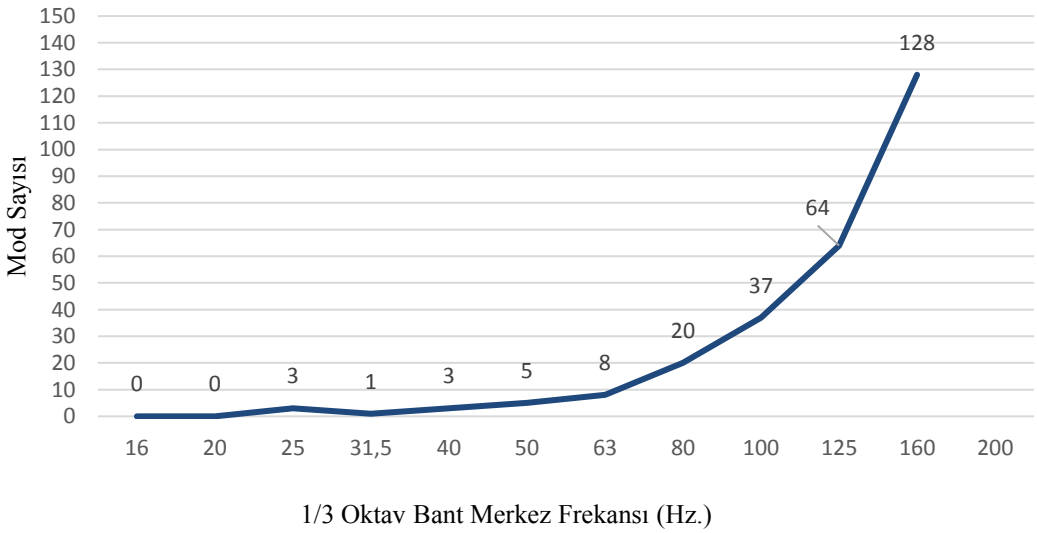
Üçüncü hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekans değerlerinden itibaren vadi ve tepe noktaları oluşturur. Spektrum boyunca 16 Hz. ile 80 Hz. arasında oluşan tepe ve vadi noktaları düzensiz ve seyrektir. 80 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Frekans tepki eğrisi, pik noktaların sıklığı ve basınç seviyeleri açısından küp hacimden farklıdır. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 101 dB ile 36 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir. Bu aralık birim küp hacme nispeten daha yakın bir skaladadır.

Küp hacme uygulanan dördüncü yüzey değişimi; odanın yüzeyleri boyunca yerleştirilen ve oda yüksekliğince devam eden, 10 x 40 cm boyutlarında latalar kullanılmasıdır. Latalar arası mesafe lata aksından 92 cm olacak şekilde hacmin dört duvar yüzeyine konumlandırılmıştır. Hacmin plan ve kesit çizimleri Şekil 4.149'da gösterilmektedir.



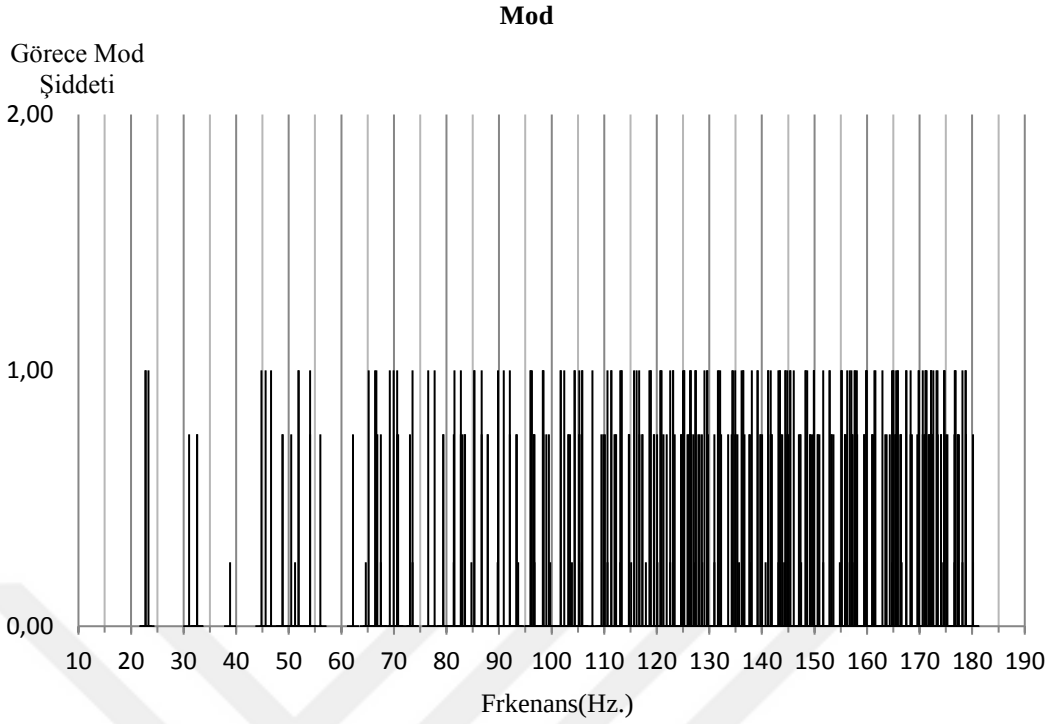
Şekil 4.149 : Küp hacme uygulanan köşe elemanlarının plan ve kesit görünüşleri.

Hacmin modal yoğunluğu Şekil 4.150'de gösterilmektedir.



Şekil 4.150 : Dördüncü hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı.

Mod sayısı frekans ile doğru orantılı olarak artar. Hacmin modal yoğunluğu 40 Hz.'den sonra düzenli bir artış gösterir. 125 Hz.'de en büyük artışı gösterir. Şekil 4.151 hacmin modal yoğunluğunu ve dağılımını frekanslara bağlı olarak göstermektedir.



Şekil 4.151 : Dördüncü hacmin modal yoğunluk grafiği.

Sadece bir boyut (eksen) tarafından desteklenen tekil frekanslar ve birden fazla boyut tarafından desteklenen çakışık frekanslar mevcuttur. Örneğin, 23.31 Hz. frekansı hacmin tek bir boyutu, 22.77 Hz. frekansı hacmin iki boyutu tarafından desteklenir. Hacmin mod frekansları kontrol hacmi olan küp hacmine kıyasla düşük frekans değerlerinde etkili bir değişim göstermemiştir. Oda yüzeylerine uygulanan şekil değişimi hacimde oluşan ilk aksiyel modun frekansında bir etki oluşturmamıştır.

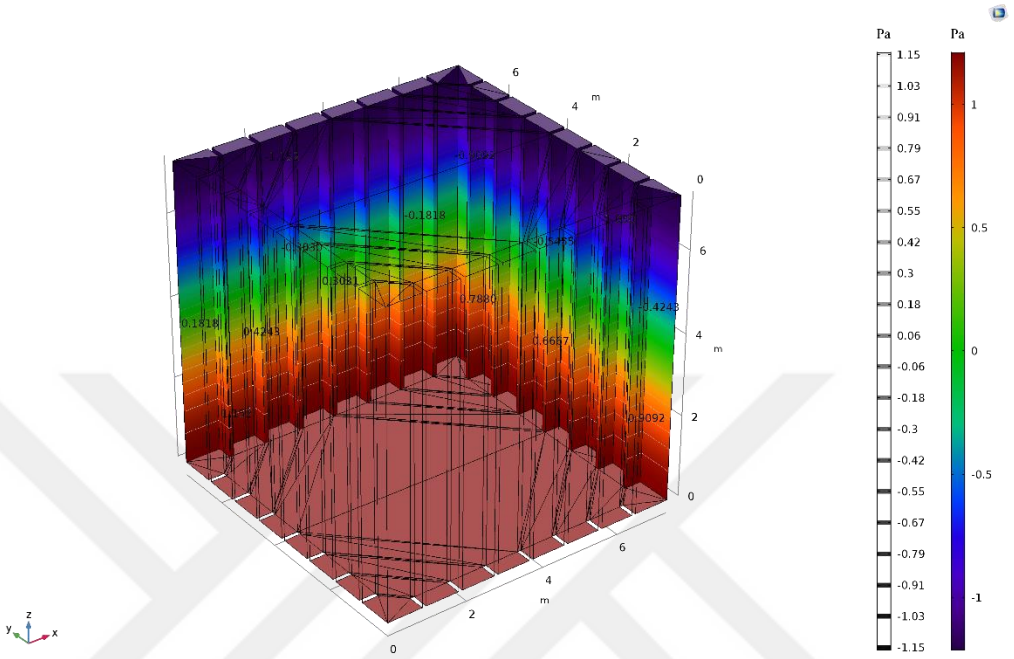
Hacmin modal yoğunluğu belirli frekans aralıklarında sıklaşırken özellikle düşük frekans bölgesinde belirgin bir seyreklik gösterir. 125 Hz. ve üzerinde modal sıklık oldukça fazladır. 75 Hz. ile 85 Hz. bölgesinde seyrelme gözlemlenir. Bu seyrelme durumu 40 Hz., 60 Hz., 100 Hz., 110 Hz., 150 Hz., 155 Hz. frekans bölgelerinde de gözlenir. Frekans arttıkça seyrelme bölgelerinin genişliği azalır.

Hacmin ilk 4 aksiyel,teğet, oblik mod frekansları Çizelge 4.23'te gösterilmektedir. Hacmin en (W), boy (L), yükseklik (H) boyutlarının ilk aksiyel frekansları sırasıyla f_W=22.77 Hz, f_L=22.77 Hz, f_H=23.31 Hz. frekanslarında oluşmaktadır.

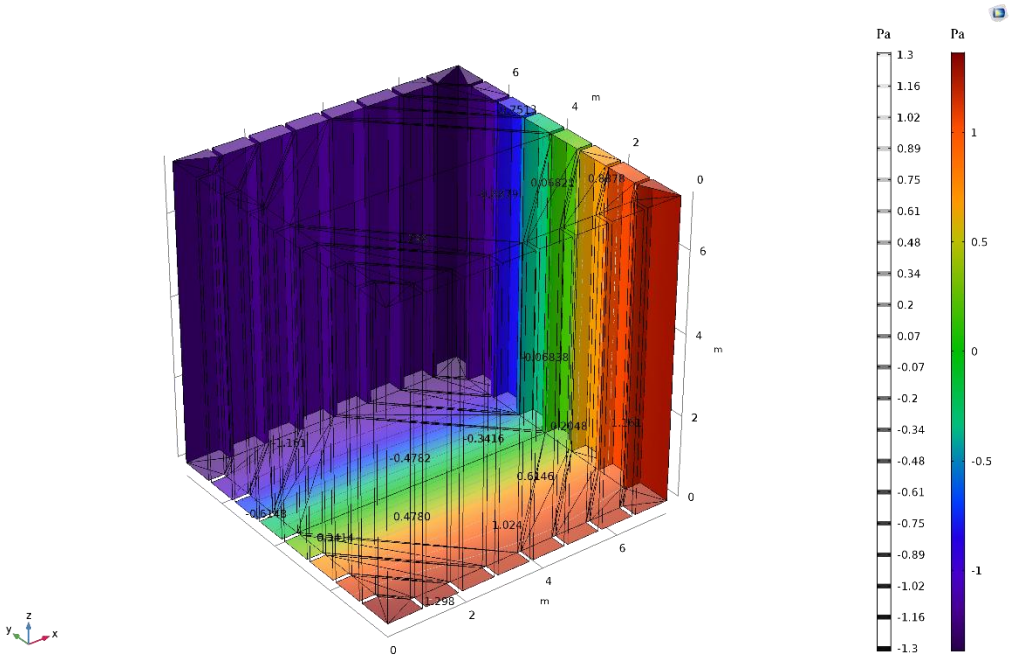
Çizelge 4.23 : Dördüncü hacmin ilk 4 aksiyel,teğet, oblik mod frekansları

Mod Sayısı	Tam Sayı			Mod Frekansı	Artan Sırada Dizilim	Mod Mesafeleri	Renk.	
	p (W)	q (L)	r (H)				Gilford	Bonello
f_1	1	0	0	22.77393694	22.77393694	0.000430423	-	+
f_2	0	1	0	22.77436736	22.77436736	0.541011766	-	+
f_3	0	0	1	23.31537913	23.31537913	7.753316753	-	-
f_4	1	1	0	31.06869588	31.06869588	1.522197526		+
f_5	0	1	1	32.59089341	32.59089341	0.000626737		+
f_6	1	0	1	32.59152014	32.59152014	6.248615542		-
f_7	1	1	1	38.84013569	38.84013569	5.954271004		-
f_8	2	0	0	44.79440669	44.79440669	0.816065545	-	+
f_9	0	2	0	45.61047224	45.61047224	1.020869356	-	+
f_{10}	0	0	2	46.63134159	46.63134159	2.171511265	-	+
f_{11}	2	2	0	48.80285286	48.80285286	0.002232454		+
f_{12}	0	2	2	48.80508531	48.80508531	1.688200838		+
f_{13}	2	0	2	50.49328615	50.49328615	0.727987958		+
f_{14}	2	2	2	51.22127411	51.22127411	0.674783134		+
f_{15}	3	0	0	51.89605724	51.89605724	0.000171436	-	+
f_{16}	0	3	0	51.89622868	51.89622868	2.180822738	-	+
f_{17}	0	0	3	54.07705141	54.07705141	0.00425745	-	+
f_{18}	3	3	0	54.08130886	54.08130886	1.953688052		+
f_{19}	0	3	3	56.03499692	56.03499692	6.182111923		-
f_{20}	3	0	3	62.21710884	62.21710884	2.446650257		+
f_{21}	3	3	3	64.6637591	64.6637591	0.567631059		+
f_{22}	4	0	0	65.23139016	65.23139016	1.203133776	-	+
f_{23}	0	4	0	66.43452393	66.43452393	0.239884665	-	+
f_{24}	0	0	4	66.6744086	66.6744086	0.001375006	-	+
f_{25}	4	4	0	66.6757836	66.6757836	0.183173907		+
f_{26}	0	4	4	66.85895751	66.85895751	0.644637579		+
f_{27}	4	0	4	67.50359509	67.50359509	0.001433179		+
f_{28}	4	4	4	67.50502827	67.50502827	1.731239879		+

Şekil 4.152 hacmin xy eksenine paralel (tavan ve döşeme yüzeyleri arasında) oluşan üçüncü aksiyel modunu gösterir. Birinci ve ikinci aksiyel modlar hacmin xz ve yz eksenleri tarafından desteklenir. Şekil 4.153'te gösterilen birinci aksiyel mod üzerinde de konum ve biçim yönünden bir değişim olmamıştır.

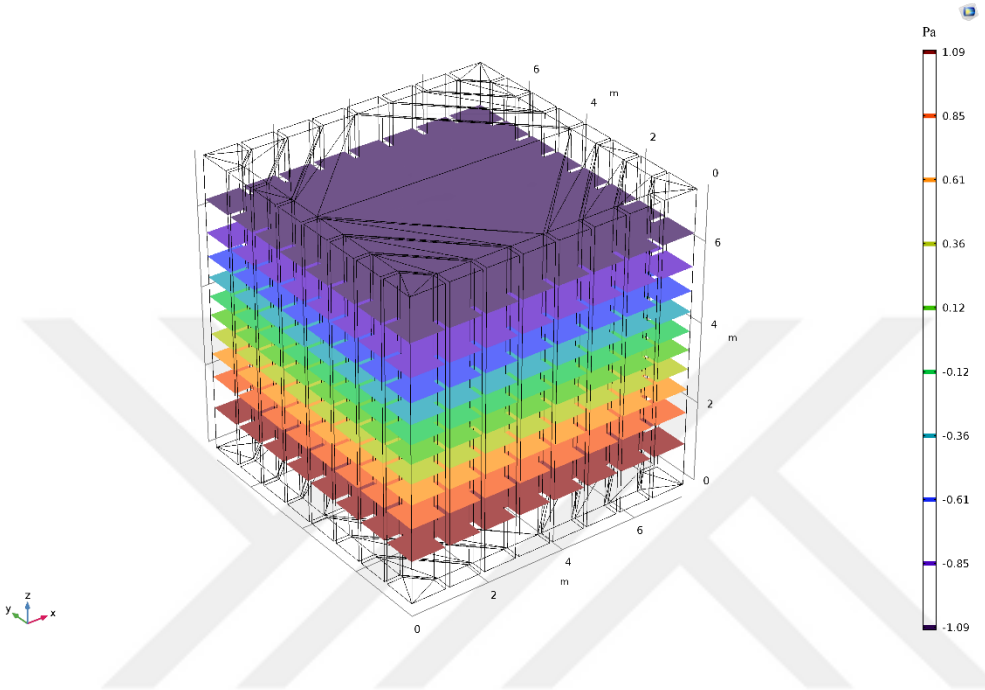


Şekil 4.152 : Hacimde oluşan üçüncü aksiyel (xy yüzeyleri) mod f_3=23.31 Hz. in ses basıncı (Pa).

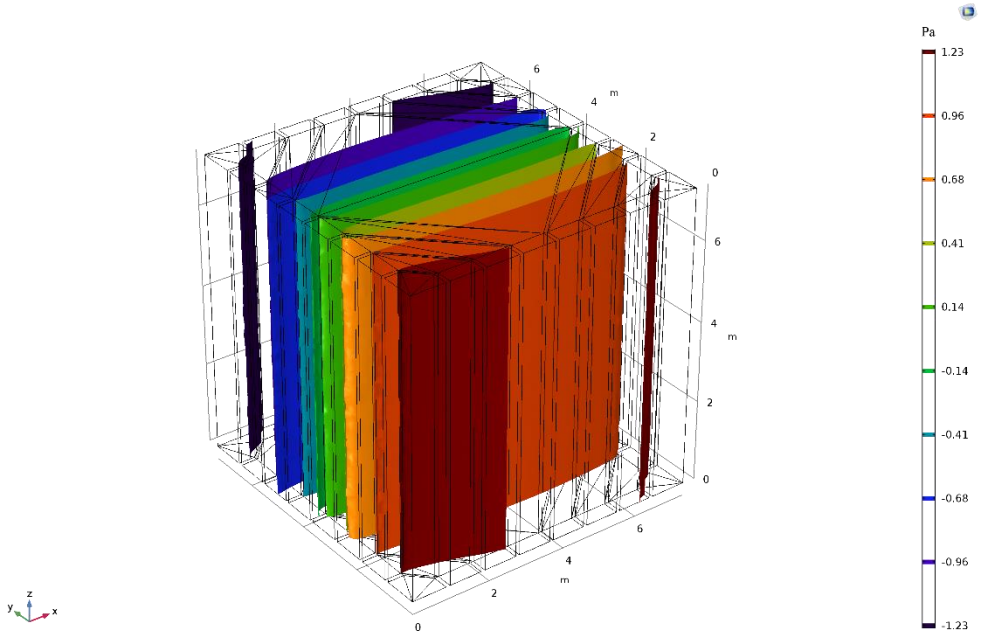


Şekil 4.153 : Hacimde oluşan birinci aksiyel (xz yüzeyleri) mod f_1=22.77 Hz. in ses basıncı (Pa).

Birinci ve ikinci aksiyel modlar köşe noktalarında basınç düzleminin hacmin diğer basınç düzlemlerine göre açı değiştirdiği Şekil 4.155'te görülür. Bu durum köşe noktaya en yakın iki latanın yeni bir köşe düzlemi oluşturacak şekilde boyut ve biçim özelliği göstermesinden kaynaklanır. Bu durum plan düzlemine paralel oluşan üçüncü aksiyel modda gözlemlenmez.

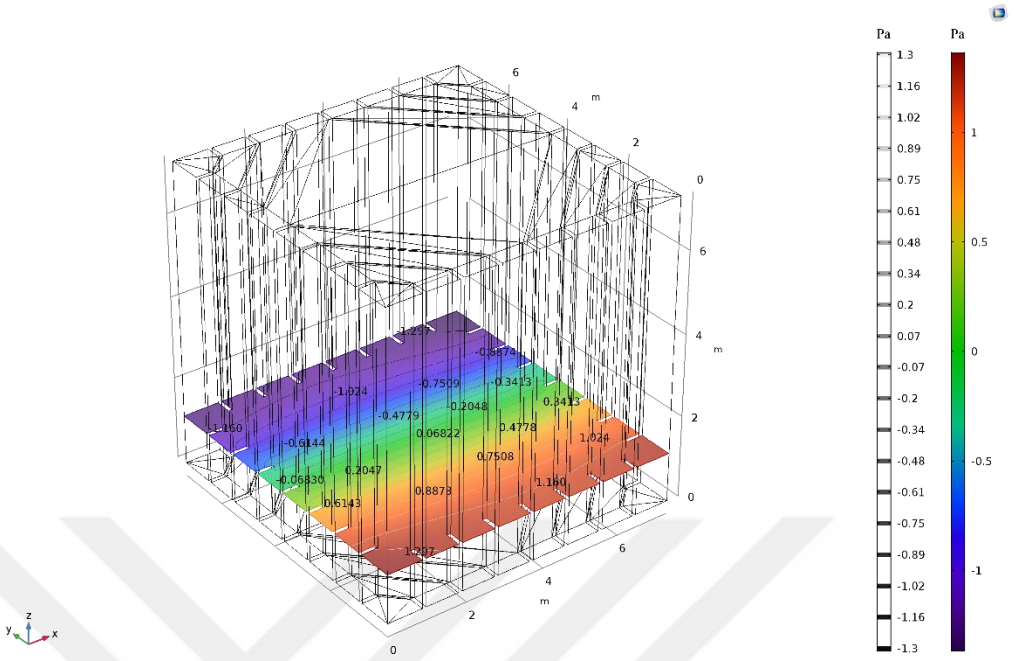


Şekil 4.154 : f_3=23.31 Hz. aksiyel modunun (xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).



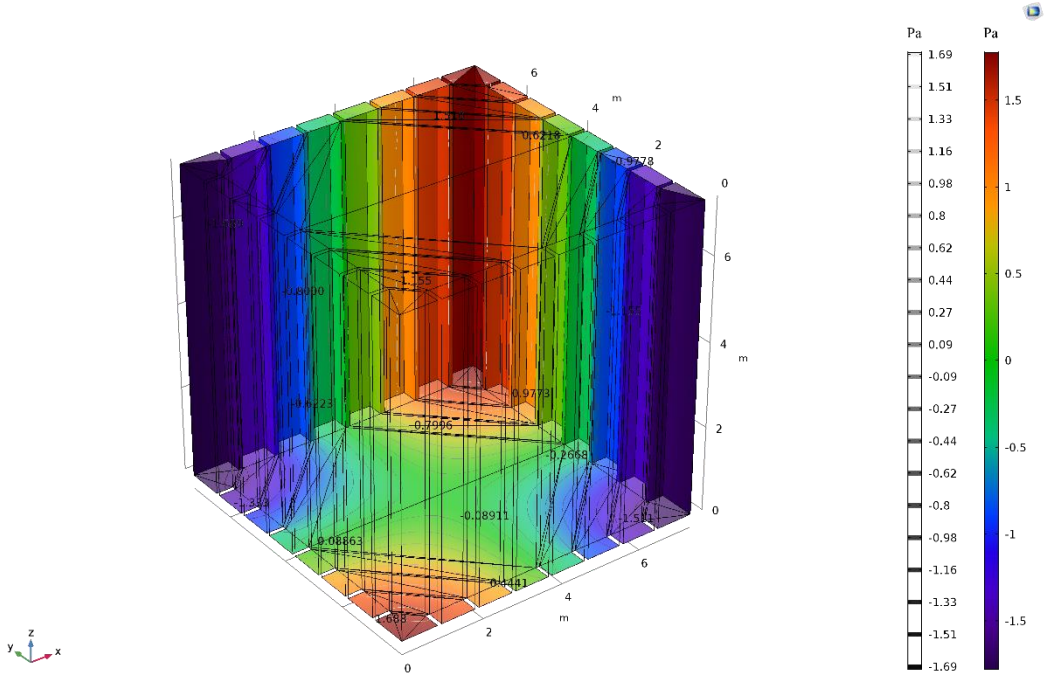
Şekil 4.155 : f_1=22.77 Hz. aksiyel modunun (xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).

Modun h=1.2 m farazi alıcı konumu düzlemindeki ses basınç değerleri Şekil 4.156'da gösterilmektedir.

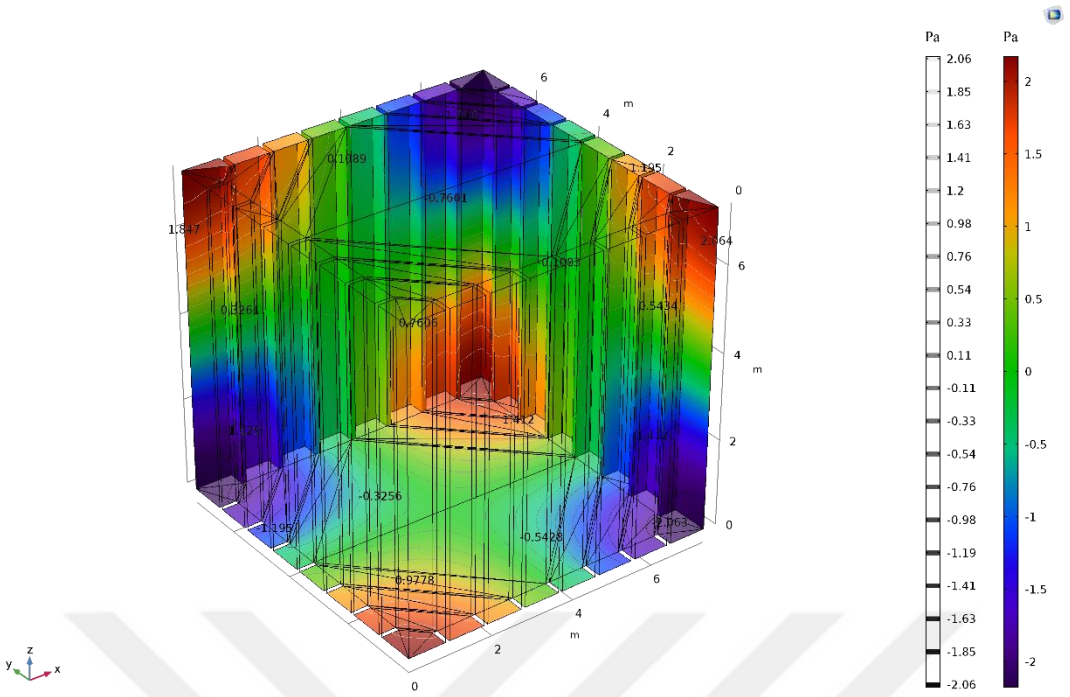


Şekil 4.156 : f_1=22.77 Hz. aksiyel modunun h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu.

Teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modlara ait basınç maksimumları diğer hacimlerde olduğu gibi köşe kesişim noktalarında oluşmaktadır. Şekil 4.157 ve Şekil 4.158 hacmin ilk teğet ve oblik modunu gösterir.

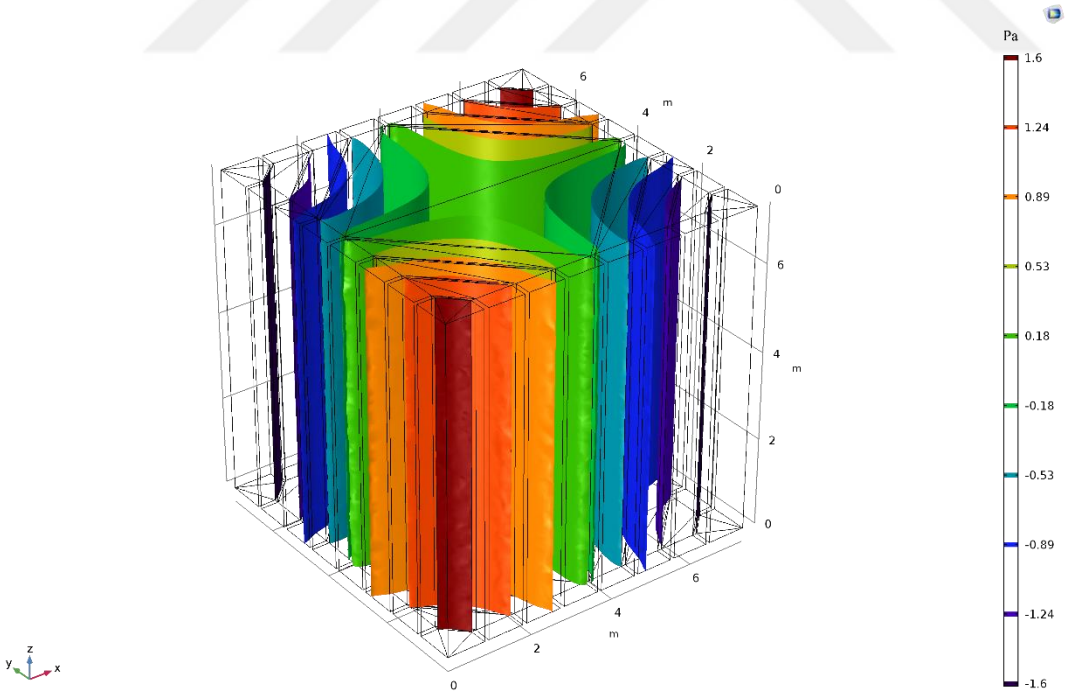


Şekil 4.157 : f_4=31.06 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

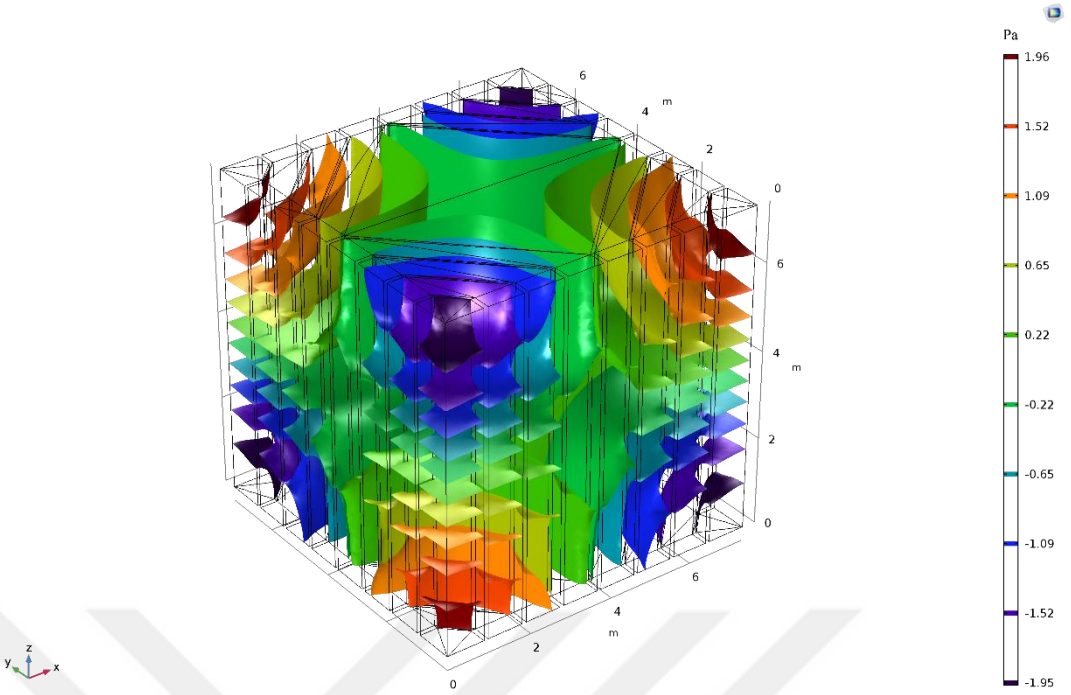


Şekil 4.158 : f_7=38.84 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

Şekil 4.159 ve Şekil 4.160 hacmin ilk teğet ve oblik modunun 3 boyutlu gösterimidir.

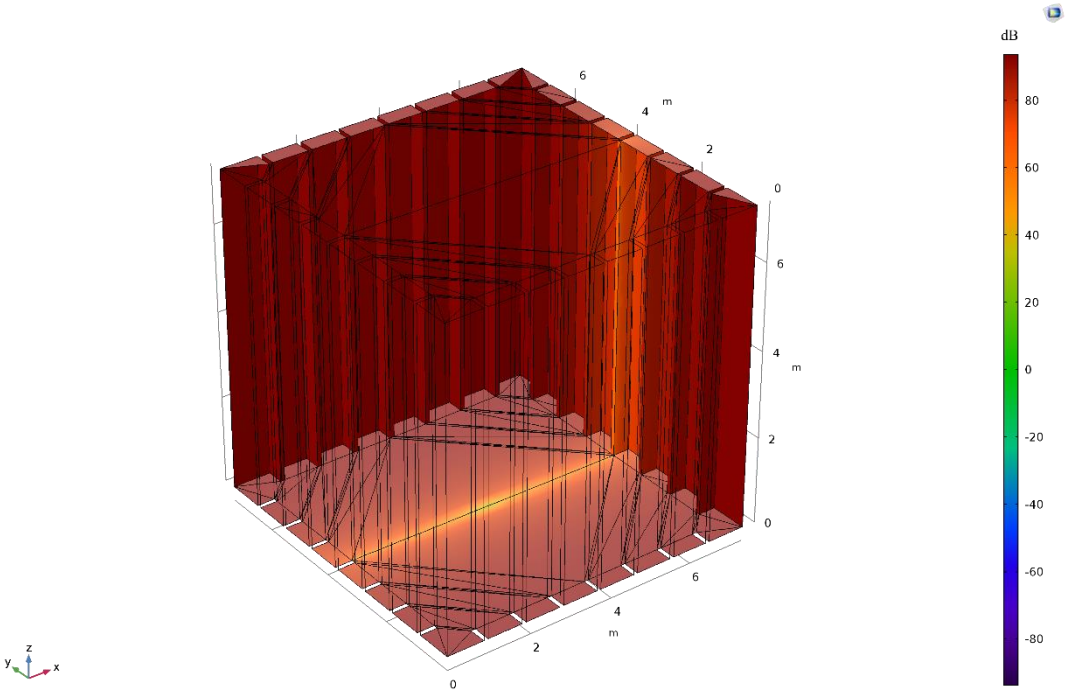


Şekil 4.159 : f_4=31.06 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).



Şekil 4.160 : f_7=38.84 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu gösterimi (Pa).

Şekil 4.161, 4.162, 4.163 hacmin ilk aksiyel (xz ekseni), teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modlarının ses basınç düzeylerinin (dB değerinden) gösterimidir.

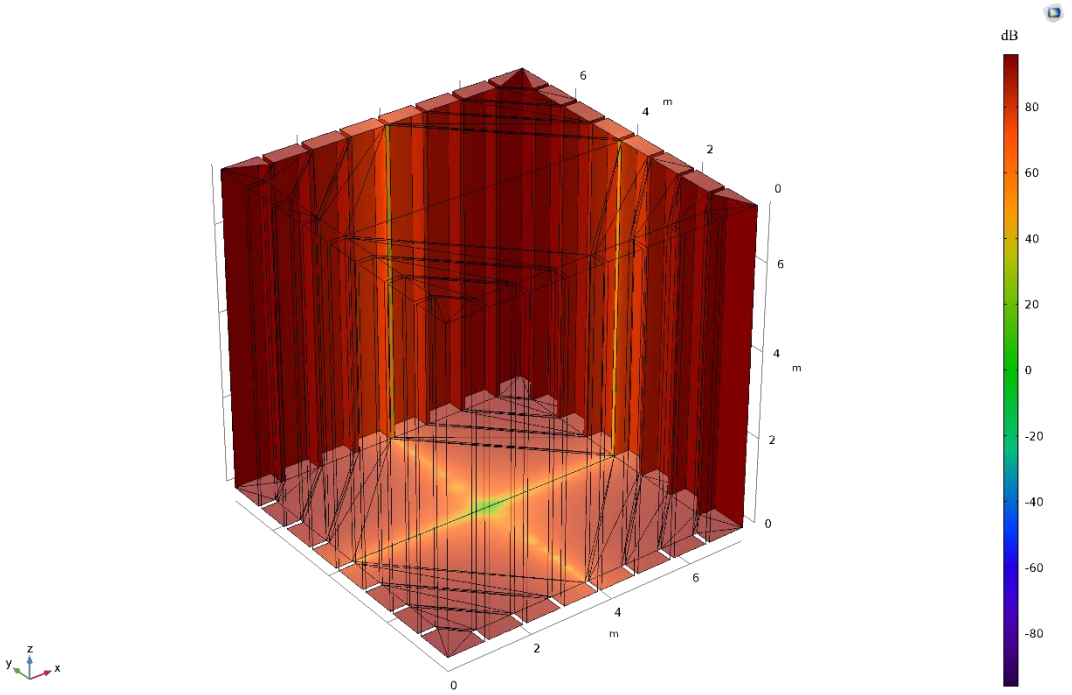


Şekil 4.161 : f_1=22.77 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).

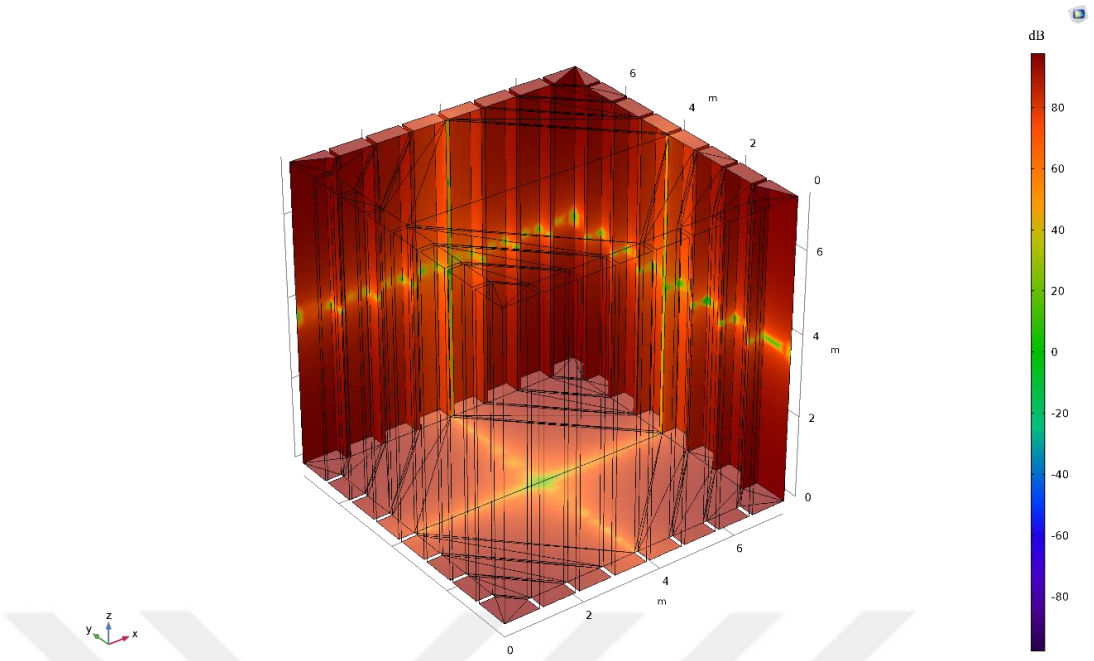
Desibel cinsinden ses düzeyi üzerinden ifade edilir ise; f_1=22.77 aksiyel modu hacmin xz ve yz eksenine paralel olarak iki kez oluşur ve hacmin sırası ile xz ve yz ekseninin orta noktasında ayrı ayrı bir 0 basınç çizgisi oluşturur (Şekil 4.143). f_2=22.77 aksiyel modu hacmin plan düzlemine paralel bir 0 basınç çizgisi oluşturur. f_4=31.06 teğet modu birim küp hacimdeki konum ve şekil özelliklerini gösterir. Hacmin merkezinde ve yüzeylerinde 0 basınç çizgisi oluşur. f_7=38.84 oblik modu (Şekil 4.144) tüm köşe noktalarında maksimum basınç noktası oluşturur. Bu basınç noktaları küp hacme benzer şekil ve konumda oluşur.

Daha büyük boyutlu şekil değişiklikleri hacmin kullanılabilir alanında azalmalara sebep olacağından ilk aksiyel mod frekansı dalga boyunun 16'da biri olan bu boyut üzerinde durulmuştur. Köşe noktalarına uygulalanan işlem düşük frekanslarda yüzey boyutları (0.92 m) itibari ile etkili olmamıştır.

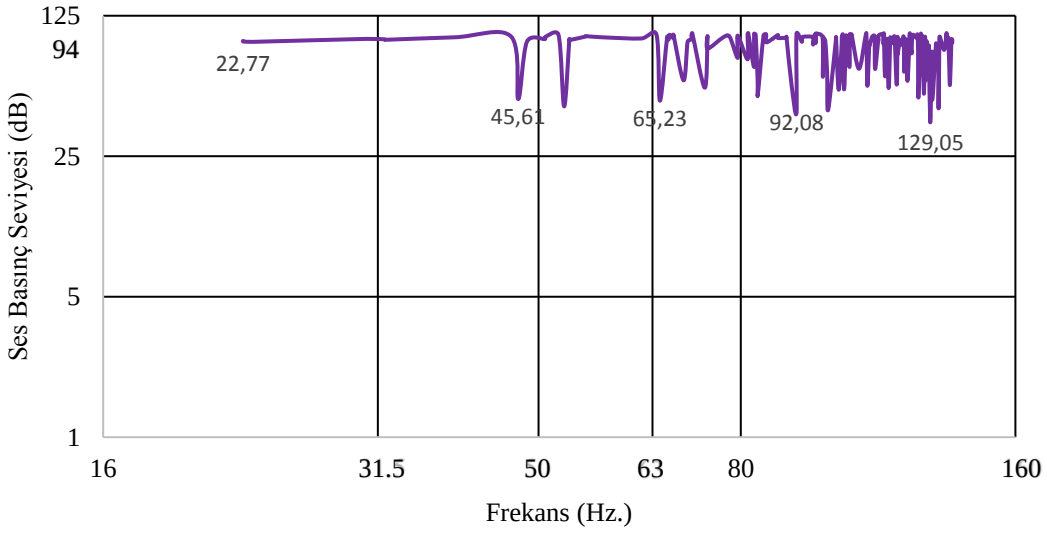
Hacme yapılan şekil değişikliği sonucunda amaçlanan oda merkezinde oluşan basınç minimumu noktasını, merkezden uzaklaştırmak ve olası alıcı konumu ile çakışmayacağı bir konumda oluşmasını sağlama düşüncesi bu hacimde sağlanamamaktadır. Modlara ait frekans değerlerinde farklılıklar okunsa da modların konum özellikleri birim küp hacimden farklı değildir.



Şekil 4.162 : f_4=31.06 Hz. teğet modunun (yz ve xz yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).



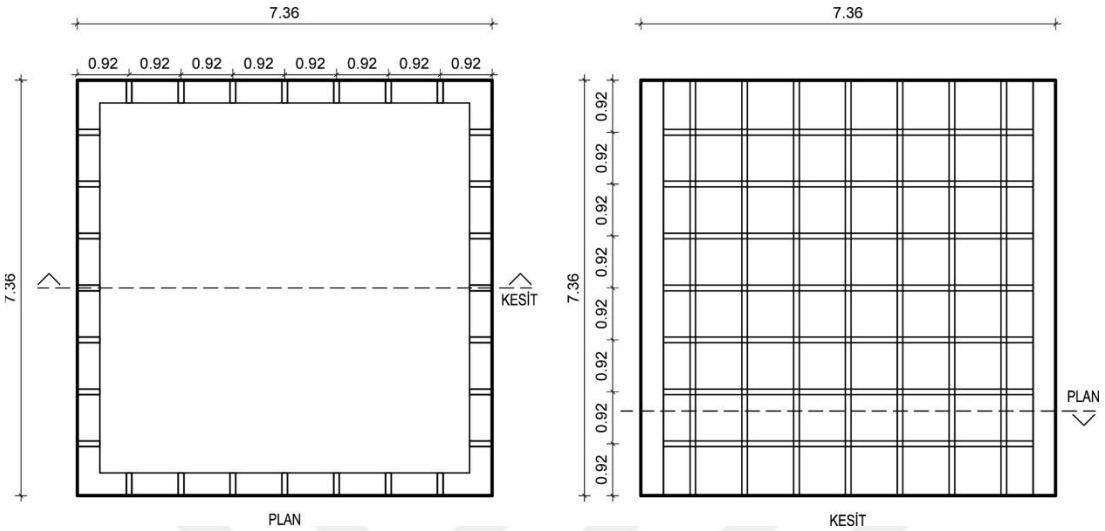
Şekil 4.163 : f_7=38.84 Hz. oblik modunun (yz, xz ve xy yüzeyleri) 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).



Şekil 4.164 : Dördüncü hacmin frekans tepki eğrisi.

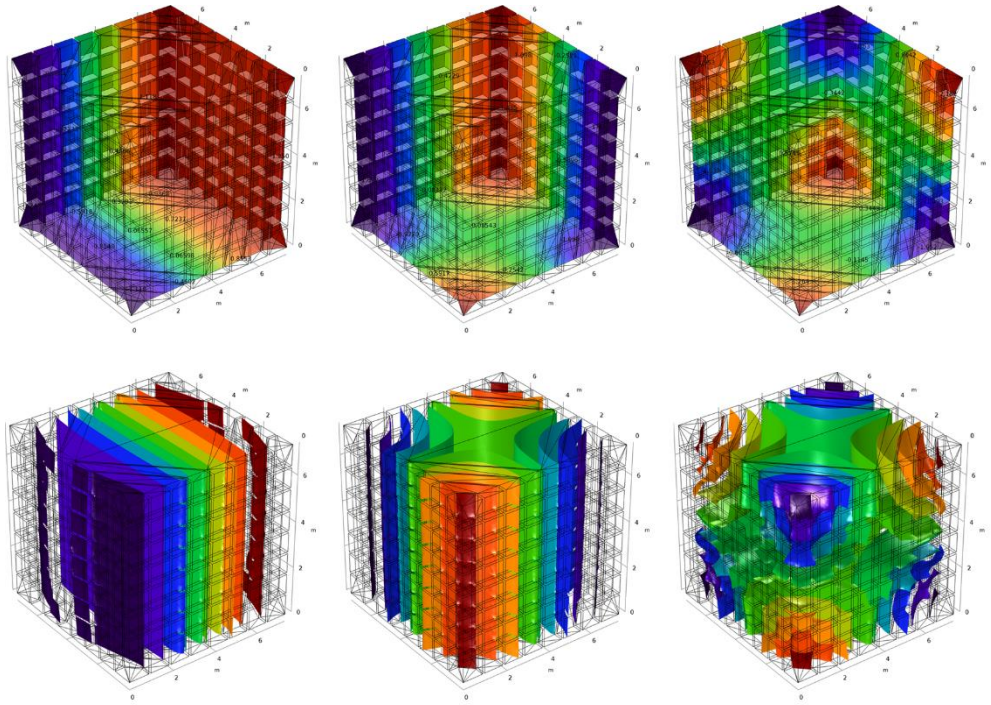
Dördüncü hacmin frekans tepki eğrisi, 40 Hz. frekansından itibaren vadi ve tepe noktaları oluşturur. Spektrum boyunca 16 Hz. ile 63 Hz. arasında oluşan tepe ve vadi noktaları düzensiz ve seyrektir. 63 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Frekans tepki eğrisi, pik noktaların sıklığı ve basınç seviyeleri açısından küp hacimden farklıdır. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 100 dB ile 36 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir. Bu aralık birim küp hacme nispeten daha yakın bir skaladadır.

Küp hacme uygulanan beşinci yüzey değişimi; düşey olarak uygulanan lataların yatay olarak da uygulanarak bir ızgara sisteminin oluşturulmasıdır. Hacmin plan ve kesit çizimleri Şekil 4.165'te gösterilmektedir.



Şekil 4.165 : Küp hacme uygulanan köşe elemanlarının plan ve kesit görünüşleri.

Bu işlem sonrasında hacmin modal frekansları uygulanan dördüncü hacim ile benzer olmuştur. İlk aksiyel mod frekansı değeri f_1=21,90, f_2=23.03, f_3=23.03, f_4=31.19, f_5=31.20, f_6=31.48, f_7=37.36 şeklindedir.

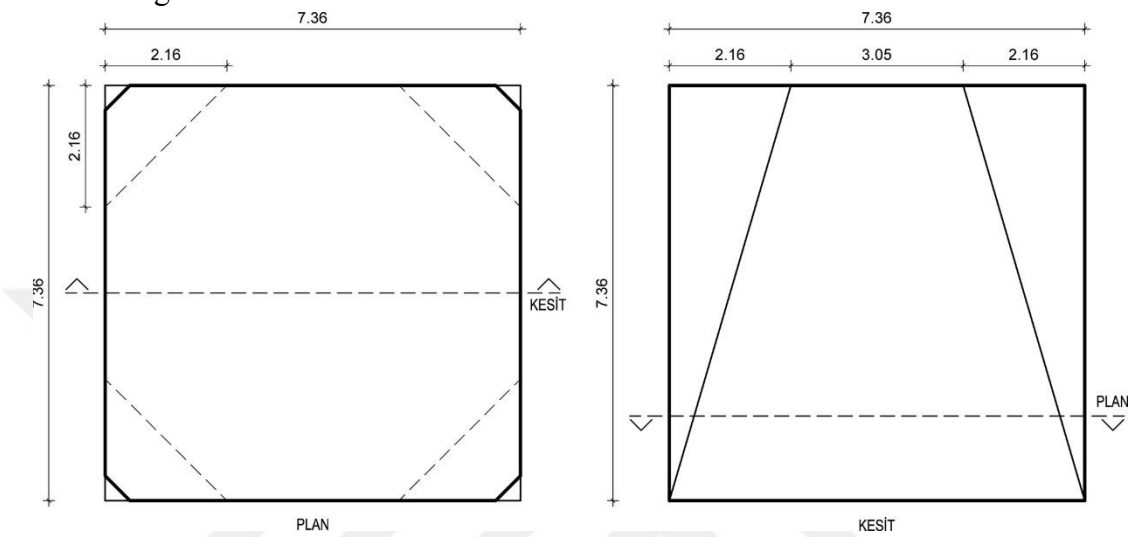


Aksiyel Mod-Pa Teğet Mod-Pa Oblik Mod-Pa

Şekil 4.166 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) gösterimleri.

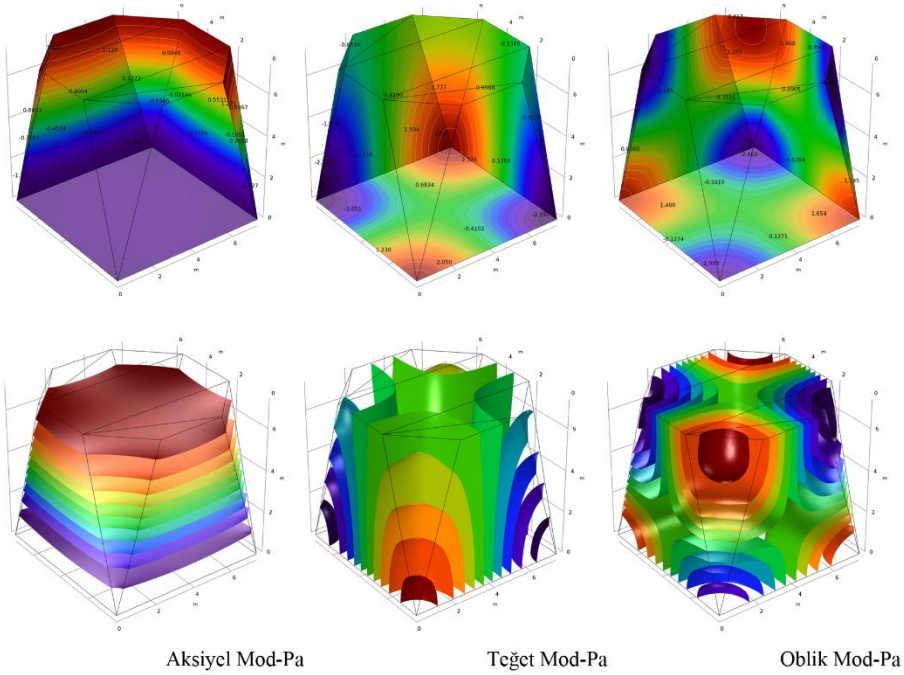
Modların hacim içerisindeki konum ve biçim özellikleri aynı şekilde oluşmuştur. Yüzey formunun benzerliğinden ve benzer sonuçları elde edilmesinden dolayı detaylı olarak bahsedilmesine gerek duyulmamıştır.

Küp hacme uygulanan altıncı köşe değişimi; zemin kotundan başlayarak tavan kotuna kadar devam eden eğimli bir pah yapılmasıdır. Hacmin plan ve kesit çizimleri Şekil 4.167'de gösterilmektedir.



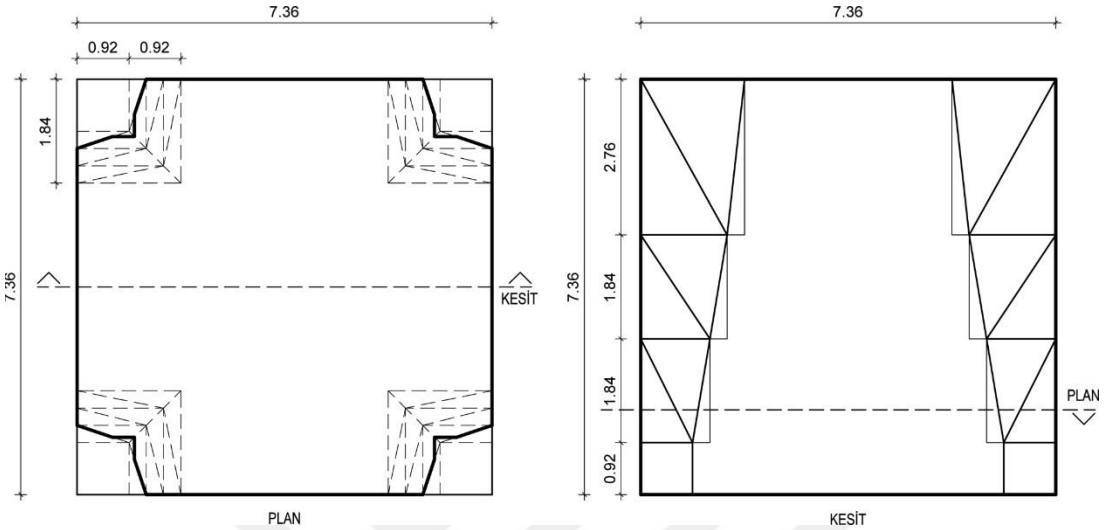
Şekil 4.167 : Küp hacme uygulanan köşe elemanlarının plan ve kesit görünüşleri.

Bu işlem sonrasında hacmin modal frekansları birinci hacim ile benzer oluşmuştur. İlk aksiyel mod frekansı değeri f_1=23.50, f_2=23.33, f_3=24.33, f_4=34.16, f_5=34.16, f_6=35.27, f_7=44.96 şeklindedir.



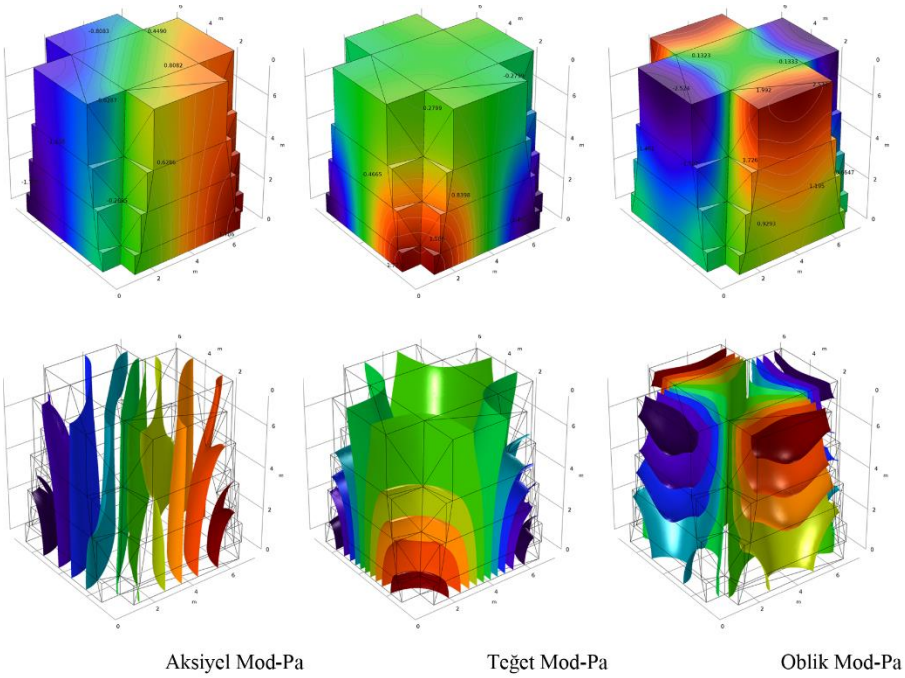
Şekil 4.168 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) gösterimleri.

Küp hacme uygulanan yedinci köşe değişimi; zemin kotundan başlayarak tavan kotuna kadar devam eden kademeli bir köşe yapısı düşünülmüştür. Kademeler birbirlerine üçgen yüzeyler ile bağlanarak yüzey paralelliği bozulmak istenmiştir. Hacmin plan ve kesit çizimleri Şekil 4.169'da gösterilmektedir.



Şekil 4.169 : Küp hacme uygulanan köşe elemanlarının plan ve kesit görünüşleri.

Bu işlem sonrasında hacmin modal frekansları uygulanan birinci ve altıncı hacim ile benzer olmuştur. İlk aksiyel mod frekansı değeri f_1=23.26, f_2=25.59, f_3=25.59, f_4=34.52, f_5=34.52, f_6=40.32, f_7=40.40 şeklindedir.



Şekil 4.170 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) gösterimleri.

Modların hacim içerisindeki konum ve biçim özellikleri aynı şekilde oluşmuştur. Birinci hacimde alınan modlara ait konum ve biçim özellikleri ile birbirine benzer oluşmaktardır. Yüzey formunun benzerliğinden ve benzer sonuçları elde edilmesinden dolayı detaylı olarak bahsedilmesine gerek duyulmamıştır.

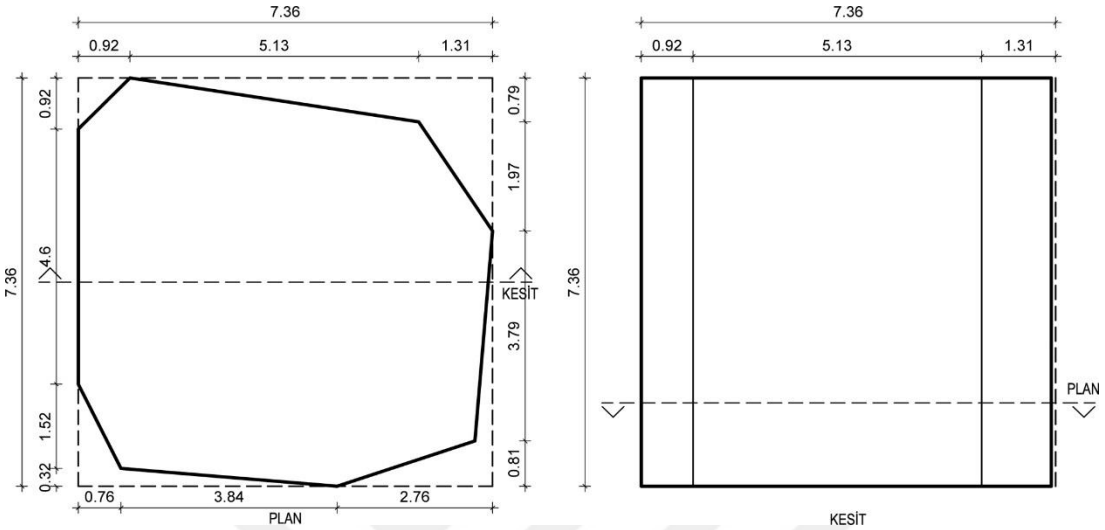
Oluşan modlar hacmin merkezinde bir 0 basınç noktasını ve köşelerinde basınç maksimumu gösterir. Oblik mod diğer örneklerden farklı olarak hacmin iç köşe noktalarında, iki iç köşe noktası boyunca tek bir basınç noktası oluşturacak şekilde gözlemlenir.

Bu iki örnek üzerinden bir ön değerlendirme yapmak gerekirse, hacme uygulanan yüzey ve köşe işlemleri hacmin merkezinde bir 0 basınç noktası oluşumunu düzeltememektedir. Frekans değerlerinden okunduğunda ise hacmin birim küpten farklılaşamadığı, hacmin biçim olarak birim kübe yakın davrandığı görülmektedir. Yüzeylere malzeme atanması, özellikle yutucu malzemeler, frekans değerlerini ve basınç değerlerini düşürmekte ancak modlara ilişkin konum ve biçim özelliklerini etkilememektedir.

Hacim içerisinde ilk tasarım yaklaşımı olarak birbirine paralel yüzeylerin kurgulanmaması modlar üzerinde bir etki oluşturabilir. Paralel olmayan yüzeyler modların matematiksel hesabı ve konum bilgilerinin tahmin edilmesini zorlaştırmaktadır.

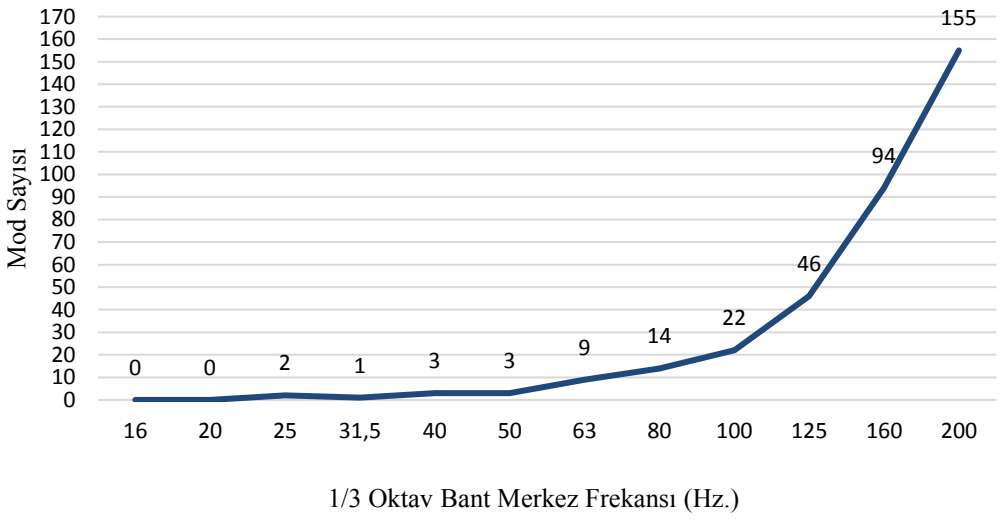
Modların hacim içerisindeki yayılımını etkileyecek yüzey düzensizlikleri oluşturmak modun konum özelliklerini belirlemek açısından önemlidir. Bu aşamaya kadar hacmin ana yüzeyleri birbirine paralel olacak şekilde ve küp hacim temelinde akustik şekil değişiklikleri uygulandı. Bir sonraki aşamada paralelliğin bozulması ve bu durumun modlar üzerindeki etkisi incelenmektedir.

Küp hacme uygulanan sekizinci yüzey değişimi; odanın yüzeylerinin köşeler farklı açı ve boyutlarda pahlı olacak şekilde açılandırılmasıdır. Mimari kullanım açısından hacmin bir yüzeyi sabit tutulmuştur. Hacmin plan ve kesit çizimleri Şekil 4.171'de gösterilmektedir.



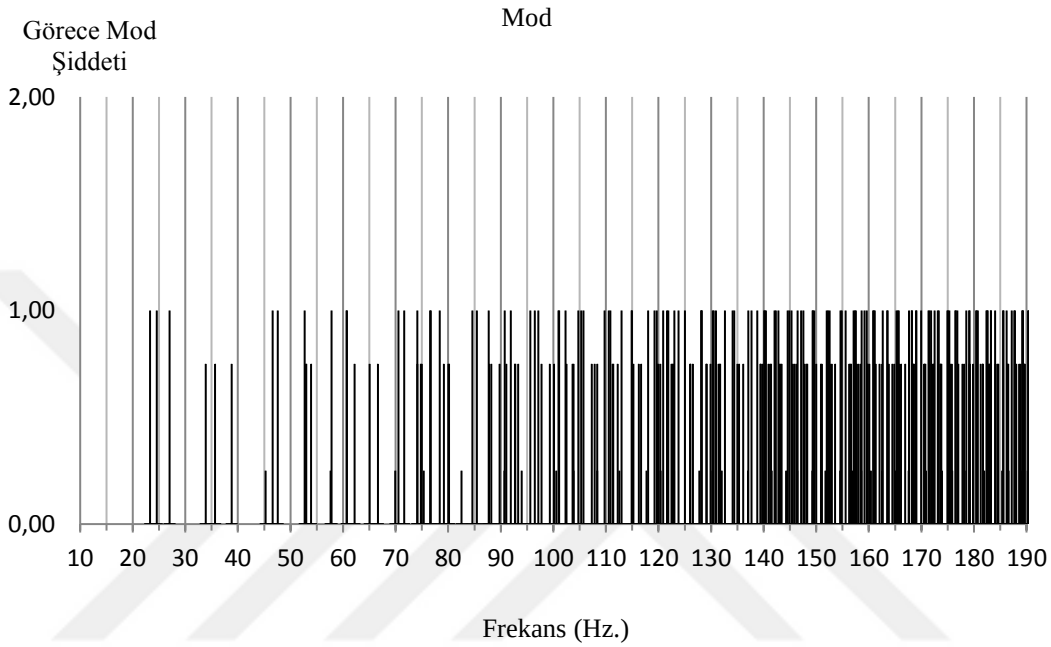
Şekil 4.171 : Küp hacme uygulanan köşe elemanlarının plan ve kesit görünüşleri.

Hacmin modal yoğunluğu Şekil 4.172'de gösterilmektedir. Mod sayısı frekans ile doğru orantılı olarak artar. Hacmin modal yoğunluğu 50 Hz.'den sonra düzenli bir artış gösterir. 160 Hz.'de en büyük artışı gösterir. Hacimlerdeki bu frekans ile doğru orantılı olarak artan mod sayısı hacmin Bonello Kriterini sağladığını gösterir.



Şekil 4.172 : Sekizinci hacmin 1/3 oktav bant boyunca frekansa bağlı oluşan mod sayısı.

Şekil 4.173 hacmin modal yoğunluğunu ve dağılımını frekanslara bağlı olarak göstermektedir. Şekil hacmin aksiyel, teğet ve oblik modlarına ait modal yoğunluğunu ve dağılımını göstermektedir. Modların yansımalardan kaynaklı enerji düşüşleri ve farkları üzerinden modların ifadesi için bir ölçek oluşturulmuştur. Modlar düşey eksende farklı görece mod şiddetleri ile ifade edilirler. Aksiyel mod=1, teğet mod=0.75 ve oblik mod=0.25 değeri ile ifade edilir.



Şekil 4.173 : Sekizinci hacmin modal yoğunluk grafiği.

Sadece bir boyut (eksen) tarafından desteklenen tekil frekanslar ve birbirine çakışıklık derecesinde yakın frekans değerleri mevcuttur. Örneğin, 23.31 Hz. hacmin tek bir boyutu tarafından desteklenir.

Hacmin mod frekansları kontrol hacmi olan küp hacmine kıyasla düşük frekans değerlerinde etkili bir değişim göstermemiştir. Oda yüzeylerine uygulanan açılandırma işlemi hacimde oluşan ilk aksiyel modun frekansında bir etki oluşturmamıştır.

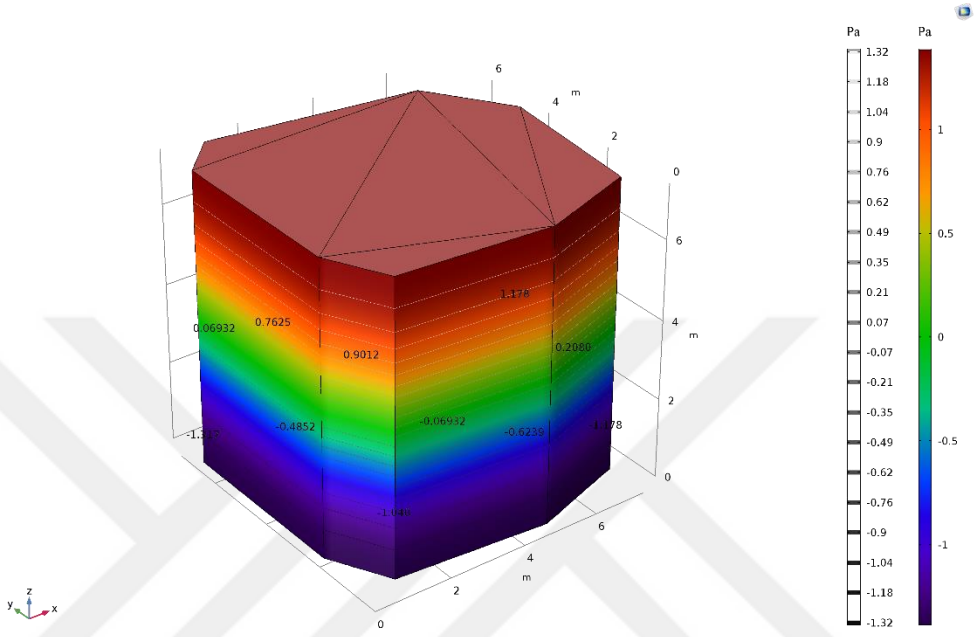
Hacmin modal yoğunluğu belirli frekans aralıklarında sıklaşırken özellikle düşük frekans bölgesinde belirgin bir seyreklik gösterir. 140 Hz. ve üzerinde modal sıklık oldukça fazladır. 65 Hz. ile 85 Hz. bölgesinde seyrelme gözlemlenir. Bu seyrelme durumu 40 Hz., 110 Hz., 125 Hz., 135 Hz. frekans bölgelerinde de gözlenir. Frekans arttıkça seyrelme bölgelerinin genişliği azalır.

Hacmin ilk 4 aksiyel,teğet, oblik mod frekansları Çizelge 4.24'te gösterilmektedir. Hacmin en (W), boy (L), yükseklik (H) boyutlarının ilk aksiyel frekansları sırasıyla f_W=23.31 Hz, f_L=24.55 Hz, f_H=27.00 Hz. frekanslarında oluşmaktadır.

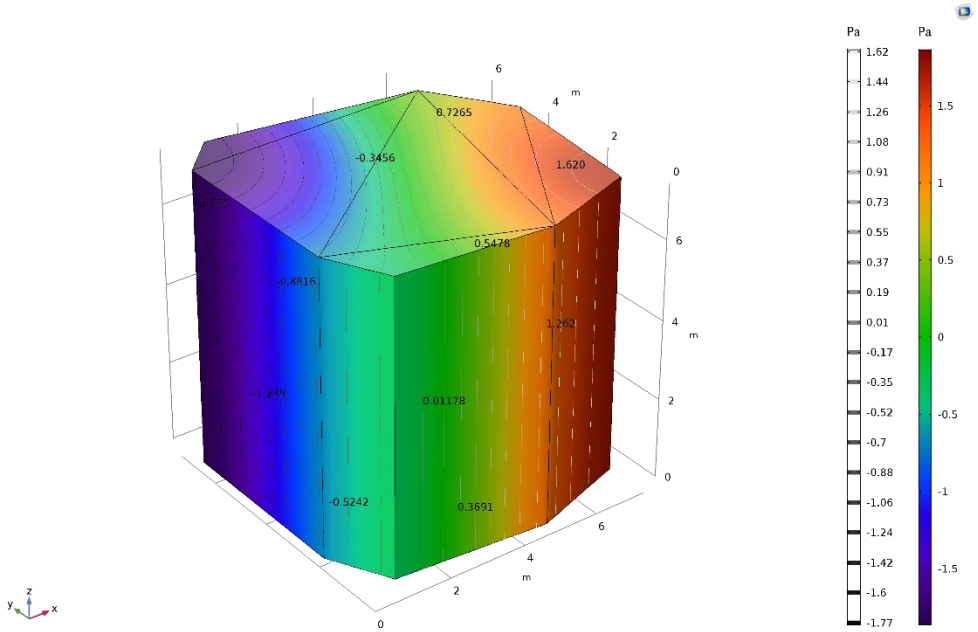
Çizelge 4.24 : Sekizinci hacmin ilk 4 aksiyel,teğet, oblik mod frekansları

Mod Sayısı	Tam Sayı			Mod Frekansı	Artan Sırada Dizilim	Mod Mesafeleri	Renk.	
	p (W)	q (L)	r (H)				Gilford	Bonello
f_1	1	0	0	23.31540159	23.31540159	1.241152091	-	+
f_2	0	1	0	24.55655368	24.55655368	2.447654007	-	-
f_3	0	0	1	27.00420768	27.00420768	6.857907167	-	-
f_4	1	1	0	33.86211485	33.86211485	1.814933396		+
f_5	0	1	1	35.67704825	35.67704825	3.132220109		-
f_6	1	0	1	38.80926836	38.80926836	6.46564969		-
f_7	1	1	1	45.27491805	45.27491805	1.357120297		+
f_8	2	0	0	46.63203834	46.63203834	0.93724891	-	+
f_9	0	2	0	47.56928725	47.56928725	5.13460637	-	-
f_{10}	0	0	2	52.70389362	52.70389362	0.222556893	-	+
f_{11}	2	2	0	52.92645051	52.92645051	0.050394163		+
f_{12}	0	2	2	52.97684468	52.97684468	0.911405308		+
f_{13}	2	0	2	53.88824999	53.88824999	3.745191113		-
f_{14}	2	2	2	57.6334411	57.6334411	0.202495523		+
f_{15}	3	0	0	57.83593662	57.83593662	2.836456406	-	+
f_{16}	0	3	0	60.67239303	60.67239303	0.071367198	-	+
f_{17}	0	0	3	60.74376023	60.74376023	1.428770009	-	+
f_{18}	3	3	0	62.17253023	62.17253023	2.894230242		+
f_{19}	0	3	3	65.06676048	65.06676048	1.552674203		+
f_{20}	3	0	3	66.61943468	66.61943468	3.33671042		-
f_{21}	3	3	3	69.9561451	69.9561451	0.590403014		+
f_{22}	4	0	0	70.54654811	70.54654811	1.066319689	-	+
f_{23}	0	4	0	71.6128678	71.6128678	2.53191337	-	+
f_{24}	0	0	4	74.14478117	74.14478117	0.000626355	-	+
f_{25}	4	4	0	74.14540752	74.14540752	0.671953724		+
f_{26}	0	4	4	74.81736125	74.81736125	0.174856592		+
f_{27}	4	0	4	74.99221784	74.99221784	0.323865629		+
f_{28}	4	4	4	75.31608347	75.31608347	1.27348334		+

Şekil 4.174 hacmin yatay eksenine paralel (tavan ve döşeme yüzeyleri arasında) oluşan ilk aksiyel modunu gösterir. İlk aksiyel mod tavan ve döşeme yüzeylerinin paralelliğinden dolayı konum olalarak diğer hacimlere benzer oluşmuştur. Şekil 4.175'te gösterilen ikinci aksiyel mod biçim olarak paralel oluşmadığı ve modun konum olarak hacmin orta noktasında eğri şeklinde olduğu görülmektedir.

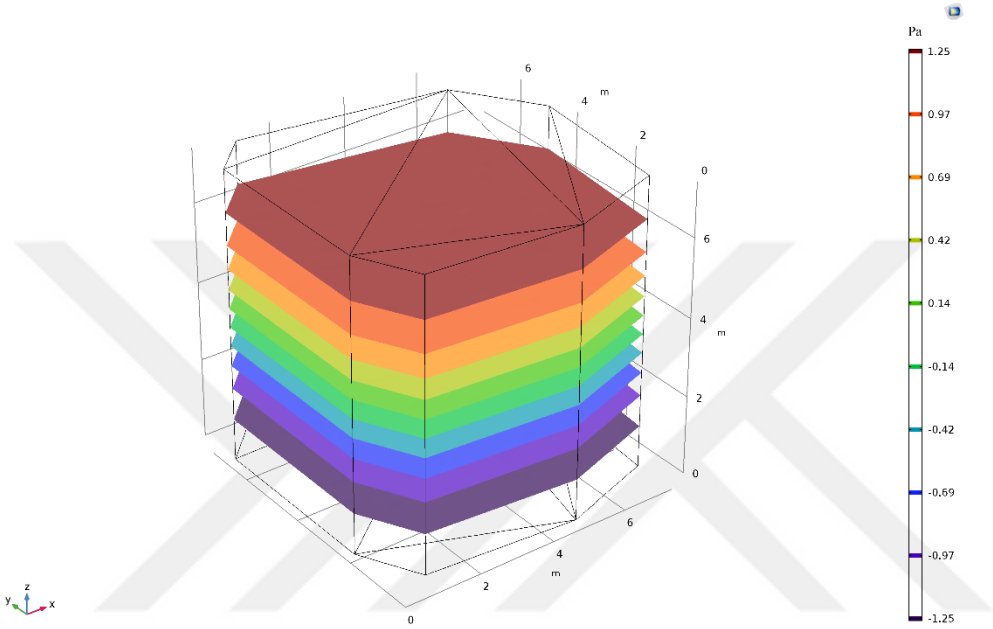


Şekil 4.174 : Hacimde oluşan birinci aksiyel (xy eksenleri) mod f_1=23.31 Hz. in ses basıncı (Pa).

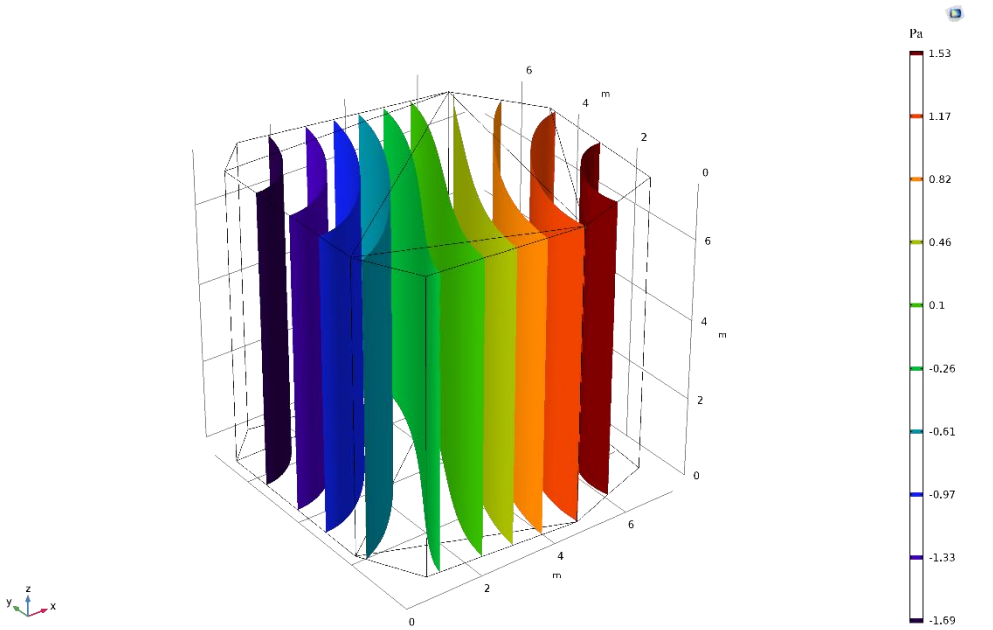


Şekil 4.175 : Hacimde oluşan ikinci aksiyel mod f_2=24.55 Hz. in ses basıncı (Pa).

Bir eğri biçiminde 0 basınç çizgisi oluşmuştur. Uygulama ikinci aksiyel modun konum ve biçim özelliklerini etkilemiştir. Hacmin yüzeylerinin paralelliğinin bozulması modların biçim ve konum özelliklerini değiştirmiştir. Hacmin orta noktada oluşan basınç konumu değişmiştir. Köşe pahlarının boyutsal özellikleri dolayısıyla hacmin yeni köşeleri olarak davrandıkları ve mod basınç noktalarının bu yeni köşelerde oluştuğu görülür. Modların 3 boyutlu ifadesi Şekil 4.176 ve Şekil 4.177'de gösterilmektedir.

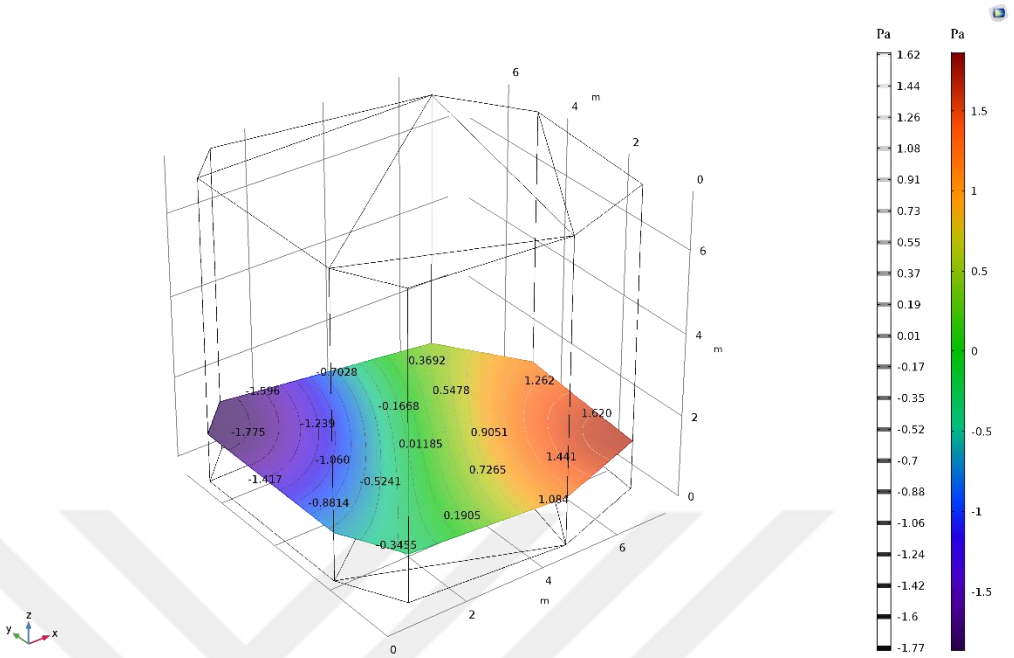


Şekil 4.176 : f_1=23.31 Hz. aksiyel (xy eksenleri) modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa).



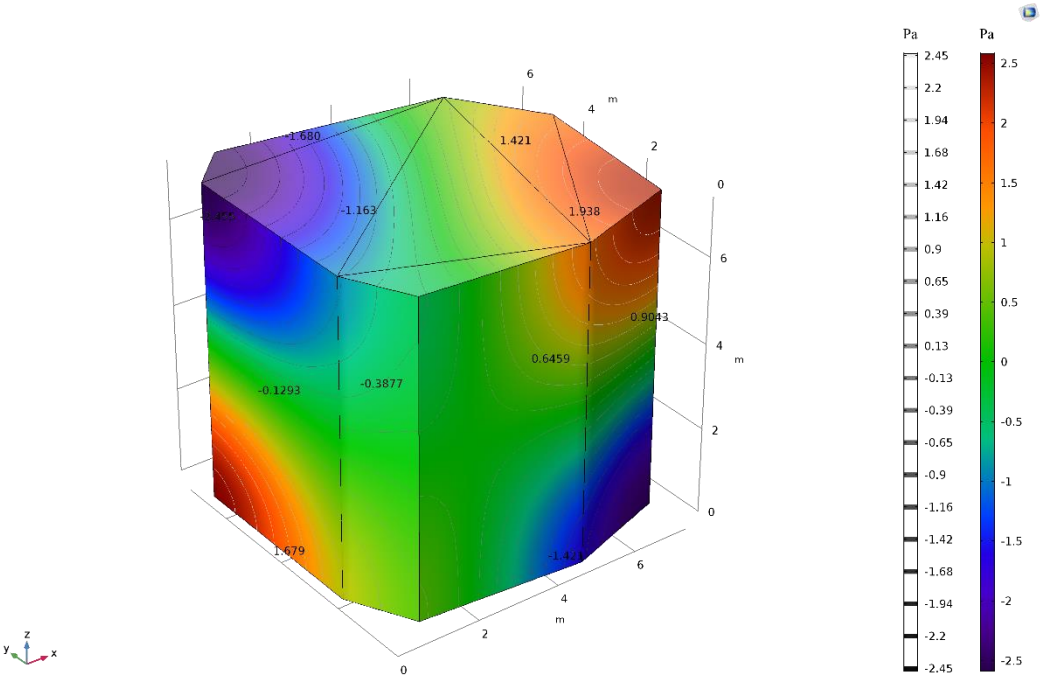
Şekil 4.177 : f_2=24.55 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa).

Modun h=1.2 m farazi alıcı konumu düzlemindeki ses basınç değerleri Şekil 4.178'de gösterilmektedir

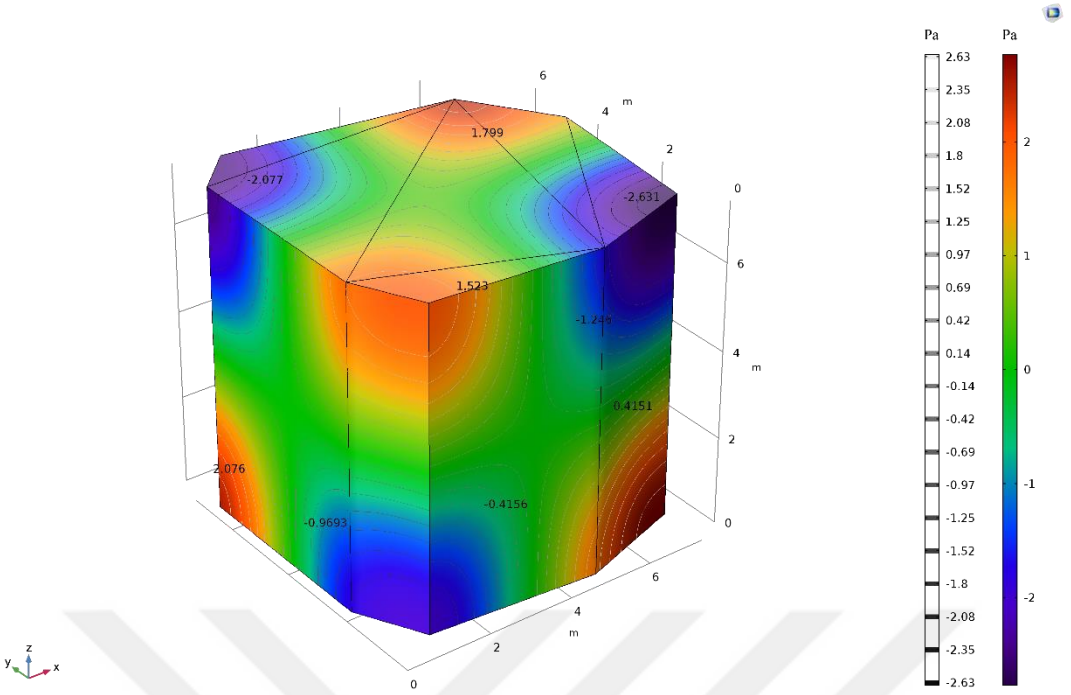


Şekil 4.178 : f_2=24.55 Hz. aksiyel modunun h=1.2 düzlemindeki ses basıncı (Pa) durumu.

teğet (yz ve xz yüzeyleri) ve oblik (yz, xz ve xy yüzeyleri) modlara ait basınç maksimumları diğer hacimlerde olduğu gibi köşe kesişim noktalarında oluşmaktadır. Şekil 4.179 ve Şekil 4.180 hacmin ilk teğet ve oblik modunu gösterir.

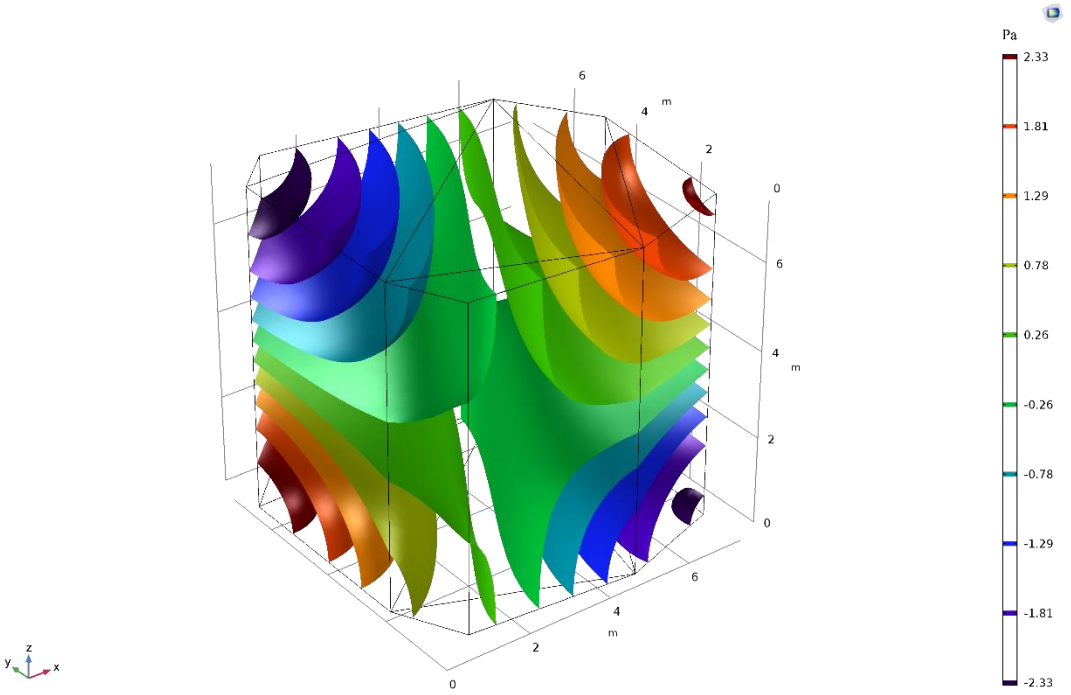


Şekil 4.179 : f_5=33.86 Hz. teğet modunun ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

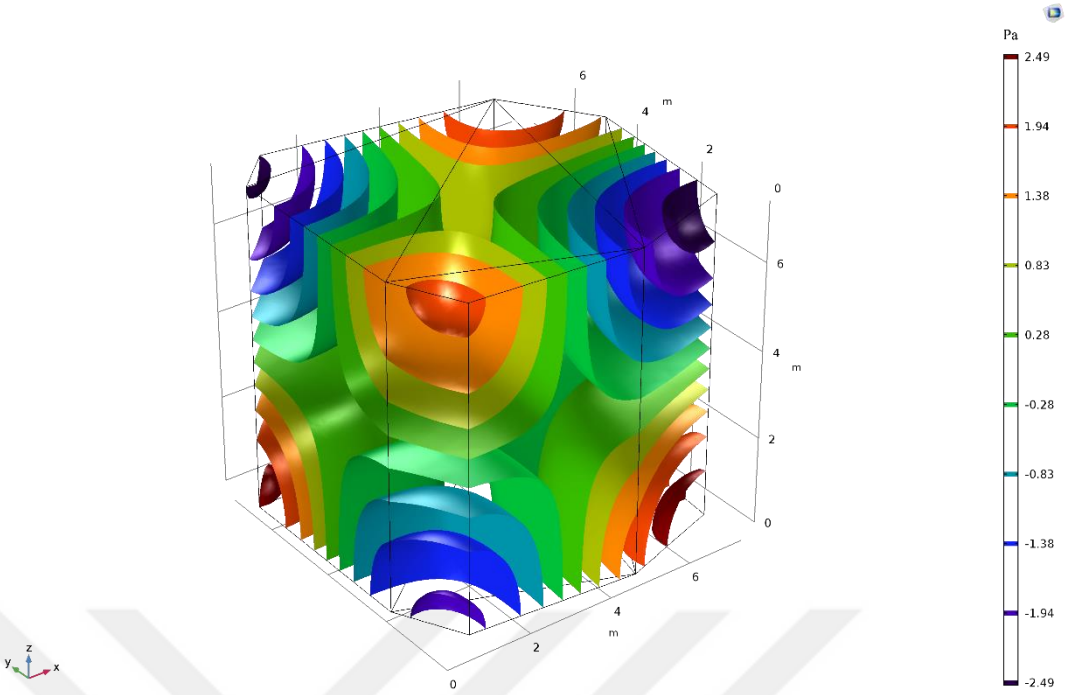


Şekil 4.180 : f_7=45.27 Hz. oblik modunun ses basıncı (Pa) cinsinden gösterimi.

Hacimde yüzeyleri açılandma işlemi ile artan geometrik köşe sayısının akustik olarak değişmediği, hacmin 4 adet köşe basınç noktası oluşturduğu görülür. Şekil 4.181 ve Şekil 4.182 hacmin ilk teğet ve oblik modunun 3 boyutlu gösterimidir.

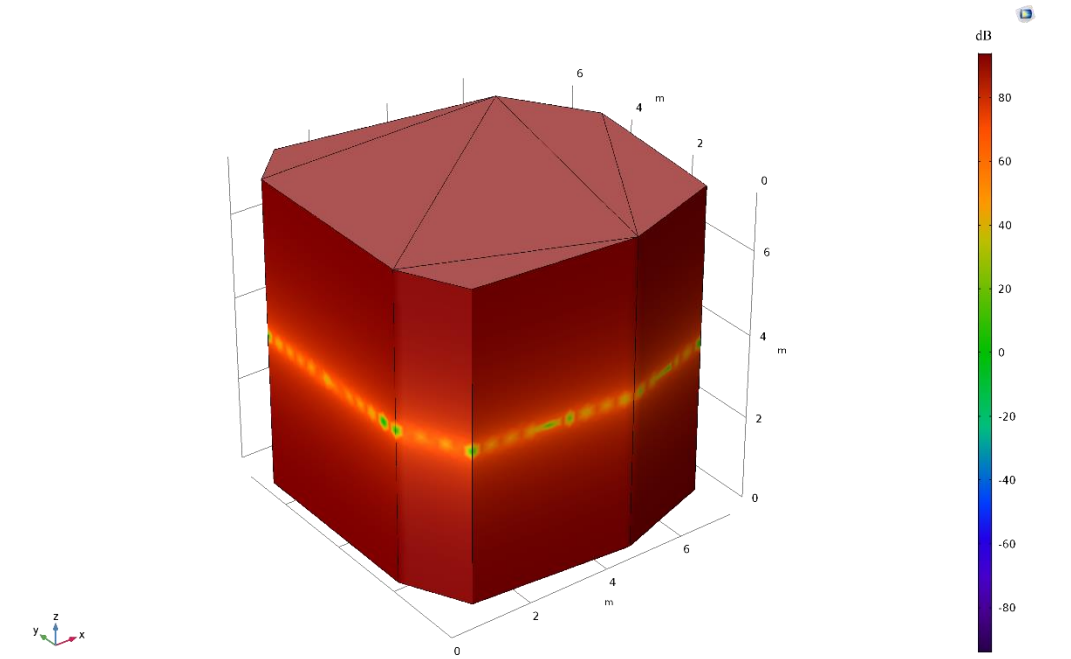


Şekil 4.181 : f_5=33.86 Hz. teğet modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa).



Şekil 4.182 : f_7=45.27 Hz. oblik modunun 3 boyutlu gösterimi (Pa).

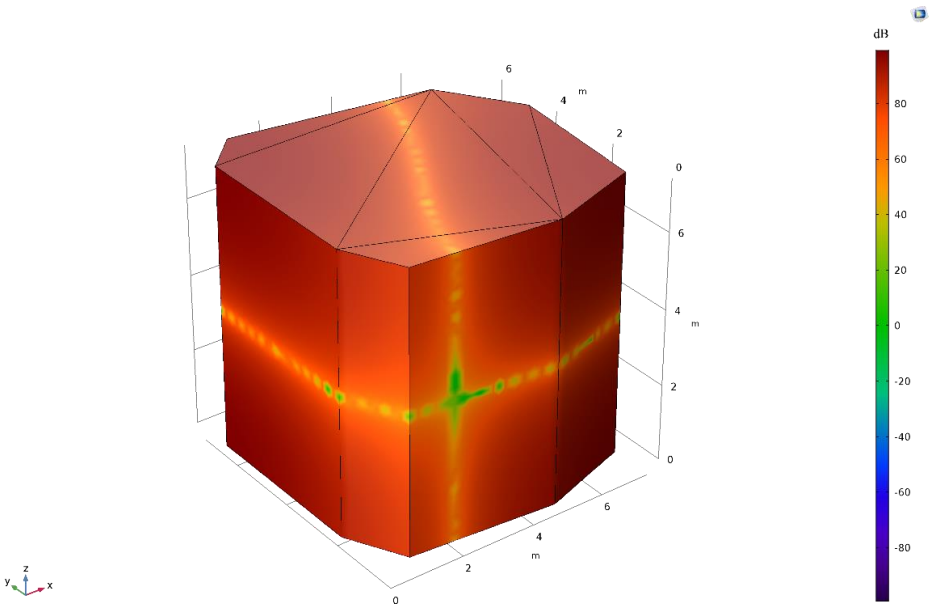
Şekil 4.183, 4.184, 4.185 hacmin ikinci aksiyel, birinci teğet ve oblik modlarının ses basınç düzeylerinin (dB değerinden) gösterimidir. Paralel tavan ve döşeme yüzeylerinden dolayı ilk aksiyel mod, hacmin yükseklik ekseni boyunca ve birim küp hacimle aynı frekans, konum ve biçim özellikleri göstermektedir.



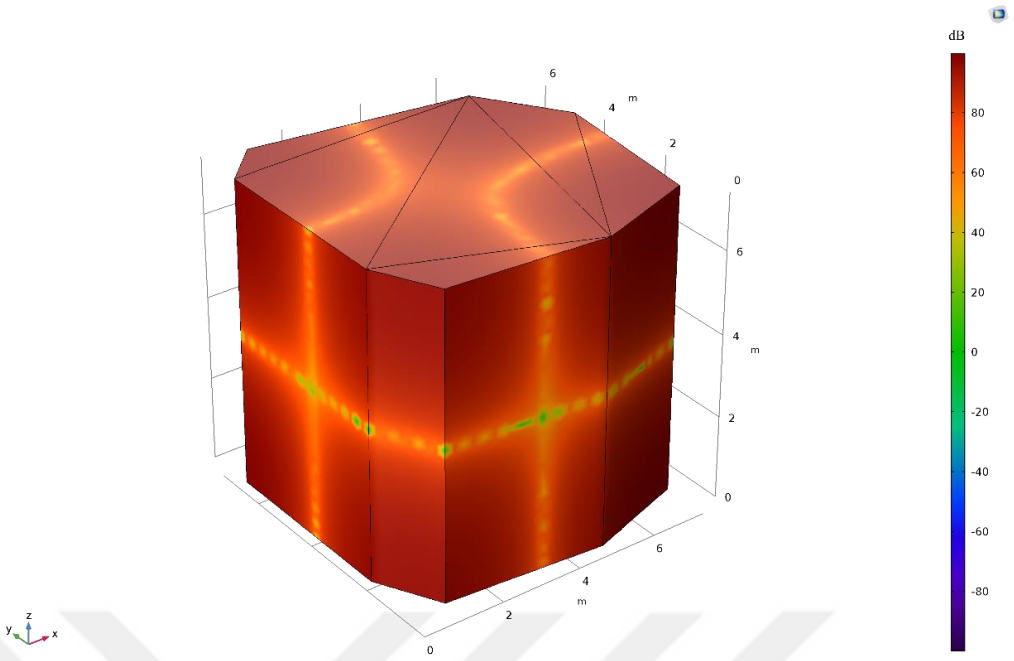
Şekil 4.183 : f_1=23.31 Hz. aksiyel modunun 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).

Desibel cinsinden ses düzeyi üzerinden ifade edilir ise; f_1=23.31 aksiyel modu (Şekil 4.183) hacmin plan düzlemine (xy eksenine) paralel hacmin yükseklik ekseninin (z ekseni) orta noktasında eğrisel bir 0 basınç çizgisi oluşturur. f_2=24.55 aksiyel modu hacminde karşılıklı iki köşe arasında eğri şeklinde uzanan bir 0 basınç çizgisi oluşturur. f_5=33.86 teğet modu (Şekil 4.184) için köşe noktalarda paralelliği bozan bükülmeler oluşur. Hacmin merkezinde ve yüzeylerinde 0 basınç çizgisi oluşur. Basınç çizgisi hacmin orta noktasına yakın olmakla birlikte olası alıcı konumu için mimari olarak kullanımı tercih edilmeyen bir konum özelliği verir. f_7=45.27 oblik modu (Şekil 4.185) hacmin geometrik sekiz adet köşesinden karşılıklı konumlanan iki köşesinde oluşmaktadır. Kesişmeyen iki eğri köşe merkezli olarak oluşur. Paralelliğin bozulması modların birim küp hacme göre farklı konum ve biçim özellikleri göstermesini sağlar. Birim hacme göre bu durumun tahmin edilmesi daha karmaşıktır.

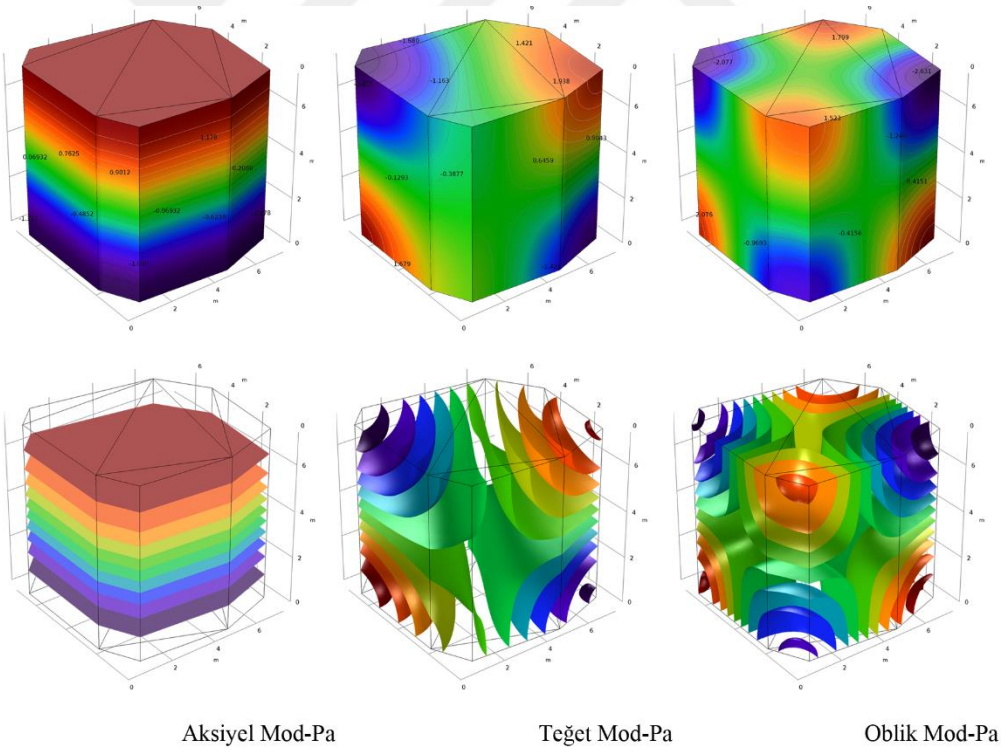
Hacme yapılan işlem sonucunda amaçlanan oda merkezinde oluşan basınç minimumu noktasını, merkezden uzaklaştırmak ve olası alıcı konumu ile çakışmayacağı bir konumda oluşmasını sağlama düşüncesi bu hacimde kısmen, kullanıcı konumu önceden planlanarak yerleşimin yapılması durumunda, sağlanabilmiştir. Paralelliğin bozulması alınan ilk verilere bağlı olarak konum kaydırmalarını sağlayacak ve basınç noktalarını hacmin kullanılmayacak noktalarına doğru kaydırmak için kullanılabilir bir yöntemdir.



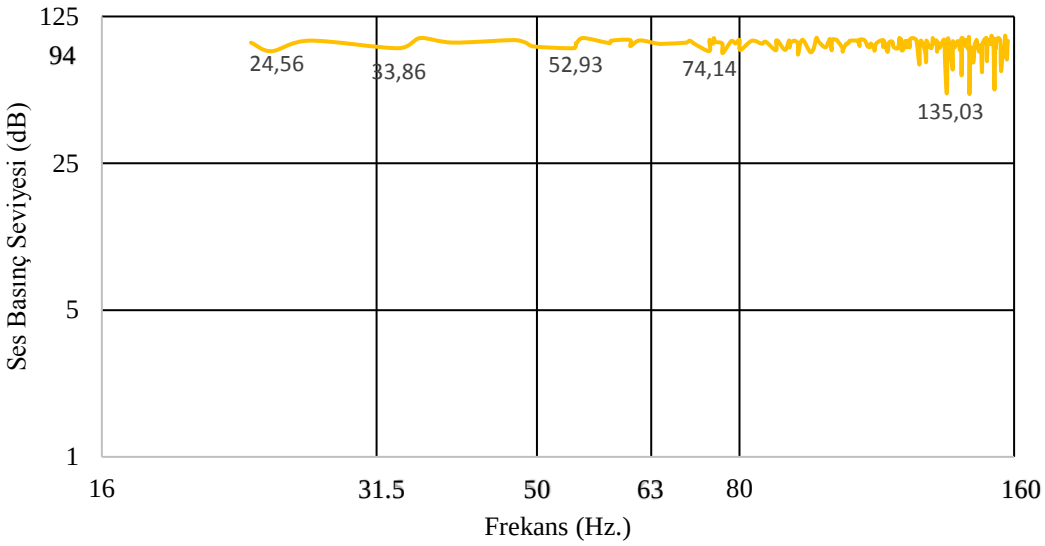
Şekil 4.184 : f_5=33.86 Hz. teğet modunun 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).



Şekil 4.185 : f_7=45.27 Hz. oblik modunun 3 boyutlu ses basınç düzeyi (dB).



Şekil 4.186 : Aksiyel, teğet ve oblik modlara ait basınç değeri (Pa) gösterimleri.



Şekil 4.187 : Sekizinci hacmin frekans tepki eğrisi.

Sekizinci hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekans değerlerinden itibaren vadi ve tepe noktaları oluşturur. Spektrum boyunca 16 Hz. ile 80 Hz. arasında oluşan tepe ve vadi noktaları düzensiz ve seyrektir. 80 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Frekans tepki eğrisi, pik noktaların sıklığı ve basınç seviyeleri açısından küp hacimden farklıdır. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 98 dB ile 53 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir. Bu aralık birim küp hacme göre daha dar bir skaladadır.

4.4.2 Birim küp hacmin köşe ve yüzey şekillerinin değiştirilmesinin sonucu

Birim küp hacim üzerinde yapılan modal karakteristiğin analizi sonrasında, küp hacimde oluşan modların frekans, konum, biçim özellikleri ile frekans tepkisinin hacmin köşelerine ve yüzeylerine yapılan değişiklikler sonucunda nasıl etkilendiği incelenmiştir. Köşe noktalarının seçilmesi, mod analizinde köşelerde mod basınç noktalarının oluşması ve modal karakteristik üzerinde birincil etkisinin olmasıdır. İkinci aşamada 8 farklı hacim incelenmiştir. Bunlardan 1 inci, 3 üncü, 4 üncü, ve 8 inci hacimler detaylı anlatılmış, diğer 4 adet hacim benzer sonuçlar vermesi sebebiyle detaylı anlatılmasına gerek duyulmamıştır.

1 inci hacim sonucunda; frekans değerleri birim küp hacim ile benzer oluşmuştur. Hacmin köşe noktalarında basınç maksimumu, orta noktasında basınç minimumu (0 basınç noktası) görülür. Bu şekil değişiminin yüzey boyutları itibariyle düşük

frekanslarda hacmin modal karakteristiğini (frekans, konum, biçim) etkili bir biçimde değiştirmediği görülmüştür.

Hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekans değerlerinden itibaren vadi ve tepe noktaları oluşturur. Spektrum boyunca 16 Hz. ile 80 Hz. arasında oluşan tepe ve vadi noktaları düzensiz ve seyrektir. 80 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Frekans tepki eğrisi, pik noktaların aralıkları ve oluşum bölgeleri açısından küp hacim ile benzerdir. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 98 dB ile 66 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir. Bu aralık birim küp hacme göre daha dar bir skaladadır.

3 üncü hacim sonucunda; frekans değerleri birim küp hacim ile benzer şekilde oluşmuştur. Basınç maksimumlarının ve minimumlarının konumları birim küp ile aynıdır. Küp hacimde ait olduğu yüzeyin orta aksına dik olarak hacim boyunca düz bir çizgi olarak oluşan ilk teğet moda ait 0 basınç çizgisi köşe noktasına doğru bükülmüştür. Dış bükey köşe formunun sesi yayıcı etki göstermesi bu durumu açıklar.

Hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekans değerlerinden itibaren vadi ve tepe noktaları oluşturur. Spektrum boyunca 16 Hz. ile 80 Hz. arasında oluşan tepe ve vadi noktaları düzensiz ve seyrektir. 80 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Frekans tepki eğrisi, pik noktaların sıklığı ve basınç seviyeleri açısından küp hacimden farklıdır. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 101 dB ile 36 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir. Bu aralık birim küp hacme nispeten daha yakın bir skaladadır.

4 üncü hacim sonucunda; frekans değerleri ve modal karakteristik birim küp hacim ile benzer şekilde oluşmuştur. Hacme eklenen düşey latalar düşük frekanslarda difüzör etkisi göstermemiştir.

Hacmin frekans tepki eğrisi, 40 Hz. frekansından itibaren vadi ve tepe noktaları oluşturur. Spektrum boyunca 16 Hz. ile 63 Hz. arasında oluşan tepe ve vadi noktaları düzensiz ve seyrektir. 63 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Frekans tepki eğrisi, pik noktaların sıklığı ve basınç seviyeleri açısından küp hacimden farklıdır. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 100 dB ile 36

dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir. Bu aralık birim küp hacme nispeten daha yakın bir skaladadır.

8 inci hacim sonucunda; frekans değerleri birim küp hacim ile benzer şekilde oluşmuştur. Köşelerde oluşan basınç maksimumu yine gözlemlenir ancak birim küp hacimde plan düzleminin merkezinde oluşan 0 basınç noktası bu şekil değişikliği sonucunda merkezden uzaklaşmıştır. Teğet moda ait basınç çizgisi de köşe noktadan uzaklaşan eğri biçiminde oluşmaktadır. Hacmin yüzey paralelliklerinin bozulması hacimde basınç noktalarının konumlarını değiştirmiştir. Tavan ve döşemede paralellik devam ettiğinden bu iki yüzey arasında oluşan modlarda yukarıda bahsi geçen durum gözlemlenmez.

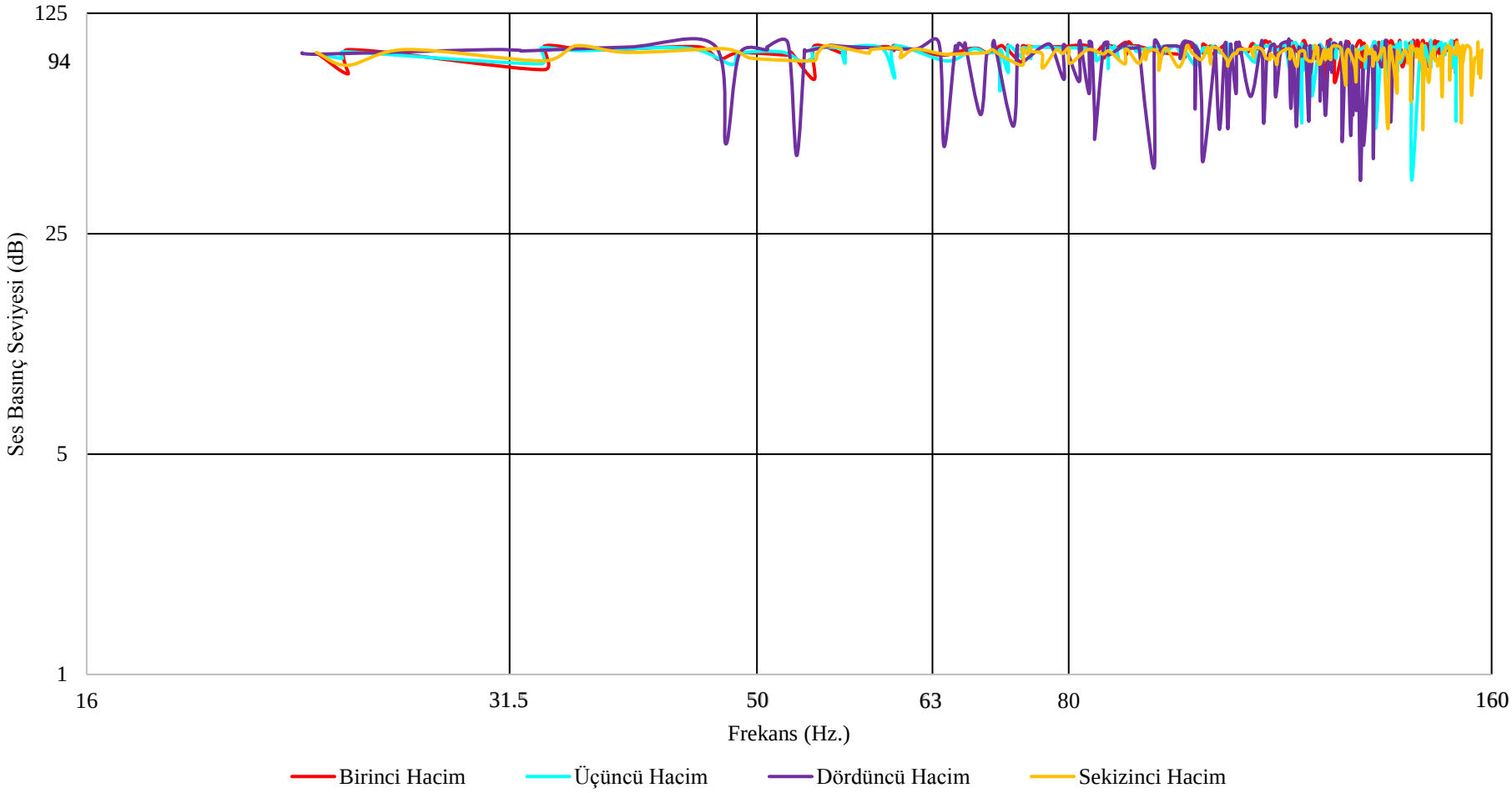
Hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekans değerlerinden itibaren vadi ve tepe noktaları oluşturur. Spektrum boyunca 16 Hz. ile 80 Hz. arasında oluşan tepe ve vadi noktaları düzensiz ve seyrektir. 80 Hz. üzerinde bu noktaların sayısı ve sıklığı frekans ile birlikte artan mod sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Frekans tepki eğrisi, pik noktaların sıklığı ve basınç seviyeleri açısından küp hacimden farklıdır. 1 Pa (94 dB) ses basıncı başlangıç kabul edilerek ölçeklendirilen ses basıncı seviyesi 98 dB ile 53 dB arasındaki bir aralıkta görülmektedir. Bu aralık birim küp hacme göre daha dar bir skaladadır.

Çalışılan 8 hacmin modal karakteristiği en etkin ve belirgin şekilde değişim yüzey paralelliğinin bozulduğu 8 inci hacimde gerçekleşir. 1 inci, 2 inci, 3 üncü hacimler birim küp gibi davranmaktadır ve benzer bir frekans tepki eğrisi oluşturmaktadır. Hacimlerin frekans tepki eğrileri Şekil 4.188'de gösterilmektedir.

4 üncü hacim sonucunda hacim 1:0.4:0.6 oranlı hacme benzer bir frekans tepki eğrisi oluşturur. 8 inci hacim ise 1:0.75:1.5 oranlı hacim ile benzer bir ilişki kurar.

Hacimlere malzeme bilgisi girilmeden yapılan köşe ve yüzey şekillendirmesi paralelliği bozacak nitelikte olanlar daha etkili sonuçlar vermektedir. Hacmin boyutsal değerlerine bağlı olarak oluşan mod frekansları hacim boyutlarının değiştirilmemesi sebebiyle benzer değerlerde oluşmaktadır.

Yüzey ve köşe şekillerinin değiştirilmesi, malzeme atamaları yapılmadan sadece şekil özellikleri ile nasıl değişim gösterdiği bu çalışmada görülmektedir.



Şekil 4.188 : 1'inci, 3'üncü, 4'üncü, 8'inci hacimlere ait frekans tepkisi eğriler

5. SONUÇ

Tasarım aşamasında karar verilen şekil ve boyut oranlarının, akustik incelemede beklenen ses kalitesini vermesi, yönetmelik ve şartnamelerin belirlediği kriterleri karşılayabilmesi ve malzeme kararlarının verildiği aşamada akustik tasarımı tamamlayacı bir unsur olarak tasarlanması yönünden önem taşır.

- Çalışmanın birinci aşamasında 7 adet farklı oranlı hacimler üzerinden inceleme yapılmıştır.
- Çalışmanın ikinci aşamasında küp hacimli bir mekanda modların

Bir hacmin akustiği, o hacimde kullanılan elemanların malzeme (yutuculuk, yansıtıcılık ve saçıcılık) ve şekil (düzlem ve eğri) özellikleri ile şekillenir. Malzeme kararlarının alınmadığı, mekânın geometrik olarak tasarlandığı ilk planlama aşamasında, yüzey ve boyutlara ait geometrik oran ve biçim özellikleri hacmin modal karakteristiği üzerinde etkindir.

Bu tez çalışmasında modların oluşumu ve hesaplanması malzeme bilgilerinde bağımsız olarak şekil ve boyut üzerinde yapılır. Malzeme, modların ses basıncı (Pa) değerleri üzerinde etkilidir; ancak modların hacim içerisindeki şekil ve konum özelliklerini etkilemez. Modların şekli ve konumu hacmin şekli ve oranları ile ilişkilidir. Hacimlerin incelenmesi ve karşılaştırılması sırasında hacim sabit tutulmaya çalışılmıştır. Malzemelerin yutuculuk, yansıtıcılık ve saçıcılık değerleri verilmemiştir. Hacimlerin incelenmesi mod frekansı, mod sayısı, modlar arası mesafe, mod bant genişliği, Schroeder frekansı ve modların hacim içerisindeki konum ve şekil özellikleri üzerinden yapılmıştır.

Mekân şekli ve oranlarının modlar üzerindeki etkisinin incelenmesi farklı hacim oranları ve köşe, yüzey şekilleri üzerinden tasarlanmıştır. İnceleme sonucunda elde edilen verilere göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Çalışmanın birinci aşaması olan 7 adet farklı oranlı hacimlerin incelenmesi:

Oda oranlarının etkisinin incelenmesi:

Oda modlarının incelendiği 7 adet oran ve oda boyutunun, modal karakteristikler açısından farklı frekans ve basınç değerleri verdikleri ancak modların konum ve şekil olarak birbirine benzer sonuçlar verdikleri (dikdörtgen prizma hacim davranışlarını tekrarladığı) görülmüştür. Hacimlerde aksiyel mod; yz, xz ve xy yüzeylerinin orta noktalarında, teğet mod; yz ve xz yüzeylerinin kesişimi olan köşe noktalarında oblik mod; yz, xz ve xy yüzeylerinin kesişimi olan köşe noktalarında oluştuğu gözlenmiştir.

Hacimlerin 1/3 oktav bant spektrumu boyunca frekansa bağlı mod sayıları (N) düşük frekanslarda (16, 20, 25, 31,5, 40, 50, 63, 80, 100 Hz.) aynıdır; yüksek frekanslarda (125, 160, 200, 250 Hz.) mod sayısında değişiklikler gözlenmiştir.

Schroeder frekansı (f_c) değerleri, hacim ve çınlama süresi parametreleri tüm oda oranlarında sabit kabul edildiğinden aynı değerde oluşmuştur. Hacimlerde aynı frekansa sahip modların hacmin farklı yüzeyleri tarafından desteklendiği görülmüştür. Bu durum özellikle 1:1:1, 1:2:3, 1:0.75:1.5 ve 1:0.4:0.6 oranlı hacimlerde oranları arasında tam sayı ilişkisi ve ortak bir sayı böleni bulunan durumlarda, bu bölenin frekans karşılığı olan modlarda görülür. Bu çakışık modlar, modlar arası mesafeler kriterlerini sağlamaz. Oranları arasında sayısal ortak bölen ilişkisi olmayan 1:0.57:1.28 ve 1:1.26:1.6 oranlarına sahip hacimlerde çakışık mod olayı görülmemiştir. Hacimlerin frekans tepkileri (frekans-desibel ilişkisi) üzerinden incelendiğinde farklılıklar gözlenmiştir.

1:1:1 oranlı küp hacmin frekans tepki eğrisi, 23.3 Hz. değerinin tam katlarında düğüm noktaları oluşturmuştur. Spektrum boyunca frekans tepkisi düzensizdir. 1:2:3 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, 40 Hz. üzerinde tepe ve vadiler oluşturduğu görülür. Frekans arttıkça tepe ve vadiler daha belirgin olarak oluşmuştur. 1:2.26:1.26 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekanslarda düzensiz bir seyir oluşturur. 125 Hz. üzerinde eğri yataya yakın bir eğimde oluşur. 1:0.6:1.6 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, diğer hacimlere göre daha net ve açık bir seyir oluşturmuştur. Derin vadi ve tepe noktaları oluşturur. 1:0.75:1.5 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekanslarda düzensiz bir seyir oluşturur. Yüksek frekanslarda vadi noktaları oluşturduğu görülür. Bu vadi noktaları spektrum boyunca düzensiz oluşmuştur.

1:0.4:0.6 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, diğer hacimlerin ses basınç düzeyi skalaları ile kıyaslandığında oldukça düşük seviyelerde oluşmuştur. Vadi noktalarının oluşumunun frekans arttıkça sıklaştığı ve arttığı görülür. 1:0.57:1.28 oranlı hacmin frekans tepki eğrisi, düşük frekanslarda düzensiz ve yataya yakın eğimli seyir oluşturur. Yüksek frekanslarda tepe ve vadi noktalarının arttığı ve sıklaştığı görülür. 1:0.6:1.6 oranlı hacminde frekans tepki eğrisi yüzey boyutları arasında tam sayı ilişkisinin olmamasına bağlı olarak en düzenli ve okunabilir olarak oluşmuştur.

Oda oranlarının tasarım açısından incelenmesi:

Oda modlarının incelendiği 7 oran türünün mimari tasarım kriterleri açısından görsel ve işitsel olarak sağladığı artı ve eksi yanları vardır. Seçilen oranlar genellikle günümüze kadar mimari mekân tasarımında kullanılan ve sadece görsel algı düşünülerek oluşturulmuş oran türleridir. Bu durum görsel algı kaygısı ile belirlenen oranların işitsel algıdaki etkisini ortaya koymak için özellikle tercih edilmiştir.

Görsel algı, oranların birbiri ile uyumunu, orantılı ve göze güzel gözükmesi durumunu ifade eder. İşitsel algı, hacimde modların genel karakteristiğini, sesin yayılımını ve basınç durumunu ifade eder.

Mimari tasarımda mekân üretme pratiği açısından birbirinin tam katı oranlar ve birbiri ile belirli bir matematiksel bölen ilişkisi bulunan oranların kullanımı tercih edilir. Oda boyutları arasında birbirinin tam katı şeklinde bir sayı ilişkisinin buluması görsel algı açısından olumlu sonuçlar verir ancak işitsel (akustik) açıdan , özellikle oda boyutları ve oranları ile doğrudan ilişkili olarak incelenen küçük hacimlerde oluşan oda modlarında, olumsuz sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Bu tür oranların modal açıdan en kötü sonuçları verdiği, renklenme ve çakışık mod sorunlarına sebep olduğu görülmektedir. Çizelge 5.1 mimari tasarım açısından hacimlerin bir değerlendirmesini gösterir.

Çizelge 5.1 : Mimari tasarım açısından hacimlerin değerlendirilmesi.

Oran Türü	Oranlar			Frekans Tepki Eğrisi	Renklenme Durumu	Görsel Algı	İşitsel Algı (Akustik)	Sonuc
	Yükseklik	Genişlik	Uzunluk	Basınç Farkına Göre				
Harmonik	1	2	3	Basınç Farkı Fazla	Var	+	-	- - + -
Altın Oran	**1**	**1.26**	**1.6**	**Basınç Farkı Az**	**Var**	**+**	**+**	**+ - + +**
European	1	0.6	1.6	Basınç Farkı Fazla	Var	-	+	- - - +
Alberti	1	0.75	1.5	Basınç Farkı Fazla	Var	+	-	- - + -
Birim Küp	1	1	1	Basınç Farkı Çok Fazla	Var	-	-	- - - -
Alberti	1	0.4	0.6	Basınç Farkı Çok Fazla	Var	+	-	- - + -
Alberti	**1**	**0.57**	**1.28**	**Basınç Farkı Az**	**Var**	**+**	**+**	**+ - + +**
Birinci Hacim	1	1	1	Basınç Farkı Fazla	Var	-	-	- - - -
Üçüncü Hacim	1	1	1	Basınç Farkı Fazla	Var	-	-	- - - -
Dördüncü Hacim	1	1	1	Basınç Farkı Çok Fazla	Var	-	-	- - - -
Sekizinci Hacim	1	1	1	Basınç Farkı Fazla	Var	-	+	- - - +

1:1:1, 1:2:3, 1:0.75:1.5 ve 1:0.4:0.6 oranlı hacimlerde oranları arasında tam sayı veya ortak bir sayı böleni ilişkisi bulunduğundan bu oranlara sahip hacimlerde frekans tepki eğrileri düzensizdir ve basınç farkları fazladır. Özellikle 1:1:1 oranlarına sahip küp hacimde bu durum oldukça olumsuz sonuçlar verir. Küp hacimin modları üzeriden iyileştirme yapılmak istendiğinde dahi şartları zorlamaktadır. Köşe ve yüzeylere yapılan şekil değişiklikleri hacmin modal davranışını ancak yüzeylerin paralelliği bozulduğunda etkilemektedir. Küp hacim modal olarak en olumsuz sonucu verir ve akustik iyileştirme açısından da en olumsuz durumda olandır. 1:0.4:0.6 oranlı hacim frekans tepki eğrisinde en olumsuz sonucu verir ve modlar arasında basınç farkı en fazla olan hacimdir. Oranları 1:0.6:1.6 olan hacim akustik uzmanları tarafından kullanılan ve önerilen bir hacimdir. Bu hacmin oranları arasında da tam sayı ve ortak bölen ilişkisi bulunmaz. Frekans tepki eğrisi diğer tam sayı oranlı hacimlere göre genel seyir itibariyle daha düzenlidir. Oranları arasında tam sayı ve ortak bölen ilişkisi bulunmayan 1:0.57:1.28 ve 1:1.26:1.6 oranlarına sahip hacimlerde modlar yine oluşur. Bu hacimlerin frekans tepki eğrileri genel seyir itibariyle daha düzenli olarak oluşur.

Tepe ve vadi noktalarının ani değişimleri görülmez. 1:1.26:1.6 oranlarına sahip "altın oran" hacmi en iyi sonucu verir.

Mimari tasarım açısından ele alındığında altın oranlı hacim hem görsel hem de işitsel algı açısından olumlu sonuçlar vermektedir. Her iki tasarım kriterini de birlikte karşılayabilmektedir. Bir çok mimar tarafından mimarlık tarihi boyunca özellikle vurgulanan ve kullanılan bu oran türü akustik olarak da en iyi sonucu vermektedir.

- Çalışmanın ikinci aşaması olan küp hacimli bir mekanda modların olumsuzluklarını gidermek için 8 adet alternatif çözüm üretilmesi:

Köşe elemanlarının etkisinin incelenmesi:

1:1:1 oranlı küp hacimde oluşan modların frekans, konum, biçim özellikleri ile frekans tepkisinin hacmin köşelerine ve yüzeylerine yapılan değişiklikler sonucunda değiştiği görülmüştür.

Köşelere dikdörtgen prizma eklenmesi (1 inci hacim); frekans değerlerini kontol birimi olan küp hacimden farklı değildir. Yüzey boyutları itibariyle düşük frekanslarda konum ve biçim özelliklerinin değişmediği görülmüştür.

Köşelere dış bükey elemanlar eklenmesi (3 üncü hacim); frekans değerleri birim küp hacim ile benzer oluşmuştur. Dış bükey köşe formunun sesi yayıcı etki gösterdiği ve basınç çizgilerinde kaymalar olduğu görülür.

Yüzeylere düşey latalar eklenmesi (4 üncü hacim); beklenildiği gibi düşük frekanslarda difüzör etkisi göstermemiştir.

Yüzey paralelliğinin bozulmasının etkisinin incelenmesi:

Yüzey paralelliğinin bozulması (8 inci hacim); frekans değerleri birim küp hacim ile benzer oluşmuştur. Köşelerde, dikdörtgen prizma davranışı olarak karşımıza çıkan, basınç maksimumu oluşmuştur ancak birim küp hacimde plan düzleminin merkezinde oluşan 0 basınç noktası paralelliğin bozulması ile merkezden uzaklaşmıştır. Hacmin yüzey paralelliklerinin bozulması, hacmin basınç noktalarının konumlarını değiştirdiği görülür.

Çalışılan 8 hacmin içerisinde modal karakteristiğin en etkin değiştiği örnek yüzey paralelliğinin bozulduğu olmuştur. Köşelere dikdörtgen prizma eklendiği, köşelere dış bükey elemanlar eklendiği ve yüzeylere düşey latalar eklendiği örneklerde hacim, birim küp ile aynı modal karakteristikte oluşur ve benzer bir frekans tepki eğrisi oluşturur.

İncelenen oranlar ve şekil değişiklikleri hacimlerin modal karakteristiği ve bu karakteristiğin etkin parametrelerini açıkça ortaya koymaktadır. Çalışma, hacimlerin şekil tasarımının ardından ikinci tasarım aşamasında malzeme kararlarının verilmesine ve bu konuda yapılacak çalışmalara ışık tutacaktır.

KAYNAKLAR

[1] Everest, F. A. (2001). The Master Handbook of Acoustıcs, 4. baskı, Bölüm 15,16 ve 19, Amerika: McGraw-Hill.

[2] Long, M. (2006). Architectural Acoustics, Bölüm 8 ve 21, İngiltere: Elsevier Academic Press

[3] Glen, B. (2008). Handbook for Sound Engineers, 4. baskı, Bölüm 5 ve 6, İngiltere: Focal Press

[4] Kuttruff, H. (2007). Acoustics An Introduction, İngilizce baskı, Bölüm 4,5 ve 13, sayfa:49-55, İngiltere: Taylor & Francis.

[5] Kleiner, M.& Tıchy, J. (2014). Acoustıcs of Small Rooms, 1. baskı, Bölüm 1,sayfa:48-69, İngiltere : CRC Press Taylor & Francis Group.

[6] Howard, D.M.& Angus, J. A. S. (2009). Acoustics and Psychoacoustics, 4. baskı, Bölüm 1,sayfa:49-55, İngiltere : Focal Press.

[7] Cox, T.J. & D'Antonio, P. (2004) Acoustic Absorbers and Diffusers, İngiltere: Spon Press.

[8] Yılmaz Demirkale, S. (2007). Çevre ve Yapı Akustiği Mimarlar ve Mühendisler için El Kitabı. İstanbul: Birsen Yayınevi.

[9] Padovan, R. (2007). Proportion: Science, Philosophy, Architecture. Londra: E & FN Spon.

[10] Le Corbusier. (2014). Modulor. İstanbul: Yapı Endüstri Merkezi Yayınları.

[11] Floyd E. Toole. (1990). Loudspeakers and Rooms for Stereophonic Sound Reproduction. AES 8th International Conference Proceedings, National Research Council of Canada Ottawa.

[12] Olive, Sean E., and Floyd E. Toole. (1989). The Detection of Reflections in Typical Rooms. J. Audio Eng. Soc., 37, 7/8 Temmuz/Ağustos 539-553.

[13] Schroeder, M.R. (1975). Diffuse Sound Reflection by Maximum-Length Sequences, J. Acous. Soc. Am., 57, 1 (Ocak) 149-150.

[14] Schroeder, M.R.& R.E. Gerlach.(1977). Diffuse Sound Reflection Surfaces, Proc. Ninth International Congress on Acoustics, Madrid, paper D-8.

[15] Schroeder, M.R.(1979). Binaural Dissimilarity and Optimum Ceilings for Concert Halls: More Lateral Sound Diffusion, J. Acous. Soc. Am., 65, 4 (Nisan) 958-963.

[16] Randall, K.E. & F.L. Ward. (1960). Diffusion of Sound in Small Rooms, Proc. Inst. Elect. Engs., Vol 107B (Eylül), sayfa 439-450.

[17] David L. Klepper, William J. Cavanaugh, & L. Gerald Marshall. (1980)Noise Control in Music Teaching Facilities. Noise Control Engineering Journal, Vol. 15 No. 2, Eylül/Ekim.

[18] H.P. Geerdes, B.G. Watters and P.W. Hirtle. Sound Isolation for Music Activities. J. Acoust. Soc. Am. Melville, NY, 21 Nisan1971.

[19] Wenger. (1999). Planning Guide for Secondary School Music Facilities. Owatonna. Wenger Corporation.

[20] Osman, R. (2010). Designing small music practice rooms for sound quality. Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010, Sidney, Avustralya.

[21] DfES (Dept. for Education and Skills, İngiltere) (2002).Draft Building Bulletin 93. Acoustic Design of Schools. İngiltere.

[22] Gurin H.M. & Nixon G.M. (1945). A Review of Criteria for Broadcast Studio Design. J. Acoust. Soc. Am. Vol.19 sayfa 404 – 411.

[23] Sepmeyer L.W. (1965). Computed Frequency and Angular Distribution of the Normal Modes of Vibration in Rectangular Rooms. J. Acoust. Soc. Am. Vol.37,sayfa 413 – 423.

[24] Bonello O.J. (1981). A New Criterion for the Distribution of Room Normal Modes. J.Audio Eng. Soc. Vol.29, sayfa 579 - 606.

[25] Lamberty, D.C. (1980). Music Practice Rooms. Journal of Sound and Vibration. Vol.60, No.1, sayfa 149-155.

[26] Lane R.N. & Mikeska E.E. (1955). Study of Acoustical Requirements of Teaching Studios and Practice Rooms in Music School Buildings. J. Acoust. Soc. Am. Vol.27, sayfa 1087 - 1091.

[27] Rindel, J, H. (2014). Rooms for music – Acoustical needs and requirements. Baltic-Nordic Acoustic Meeting (BNAM), EAA 2014, Tallinn, Estonya.

[28] Rindel, J, H. (2014). New Norwegian standard on the acoustics of rooms for music rehearsal and performance. Forum Acusticum, EAA 2014, Krakow, Rusya.

[29] Errede, S. (2002-2017) Acoustics of Small Rooms, Home Listening Rooms, Recording Studios. Department of Physics, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois.Ders notu.

[30] Meissner, M. (2018). A Novel Method for Determining Optimum Dimension Ratios for Small Rectangular Rooms. Archives of Acoustics. Vol. 43, Sayı 2.

[31] Meissner, M. (2017). Acoustics of small rectangular rooms: analytical and numerical determination of reverberation parameters. Applied Acoustics Vol. 120, Mayıs. Sayfa 111-119.

[32] J.E.Volkman. (1942). Polycylindrical Diffusers in Room Acoustical Design. J.Acous.Soc.Am., 13 Temmuz. Sayfa 234-243.

[33] R. Walker. Optimum Dimension Ratios for Small Rooms. presented of the 100th Convention of the Audio Engineering Society, J. Audio Eng. Soc. (Abstracts), vol. 44, p. 639 (1996 July/Aug.), preprint 4191.

[34] Skålevik, M.(2011).Schroeder Frequency Revisited. Forum Acusticum. Revisited 27 Haziran - 1. Temmuz. Danimarka, Aalborg

[35] Schneider, R. P. (2016). Fibonacci Numbers and the Golden Ratio. [Access online: 21 Eylül, 2019] Website: https://www.researchgate.net/publication/310671676

[36] Watson, A. R. (2017). The Golden Relationships: An Exploration of Fibonacci Numbers and Phi. Duke Üniversitesi Biyoloji Bölümü. Nisan. Durham Kuzey Karolina, ABD.

[**37**] **Bolt, RH.** (1939). Frequency distribution of eigentones in a three-dimensional continuum. J. Acoust. Soc. Am. Vol.10 p258

[**38**] **Bolt RH.** (1947). Normal frequency spacing statistics. J. Acoust. Soc. Am. Vol.19 p79

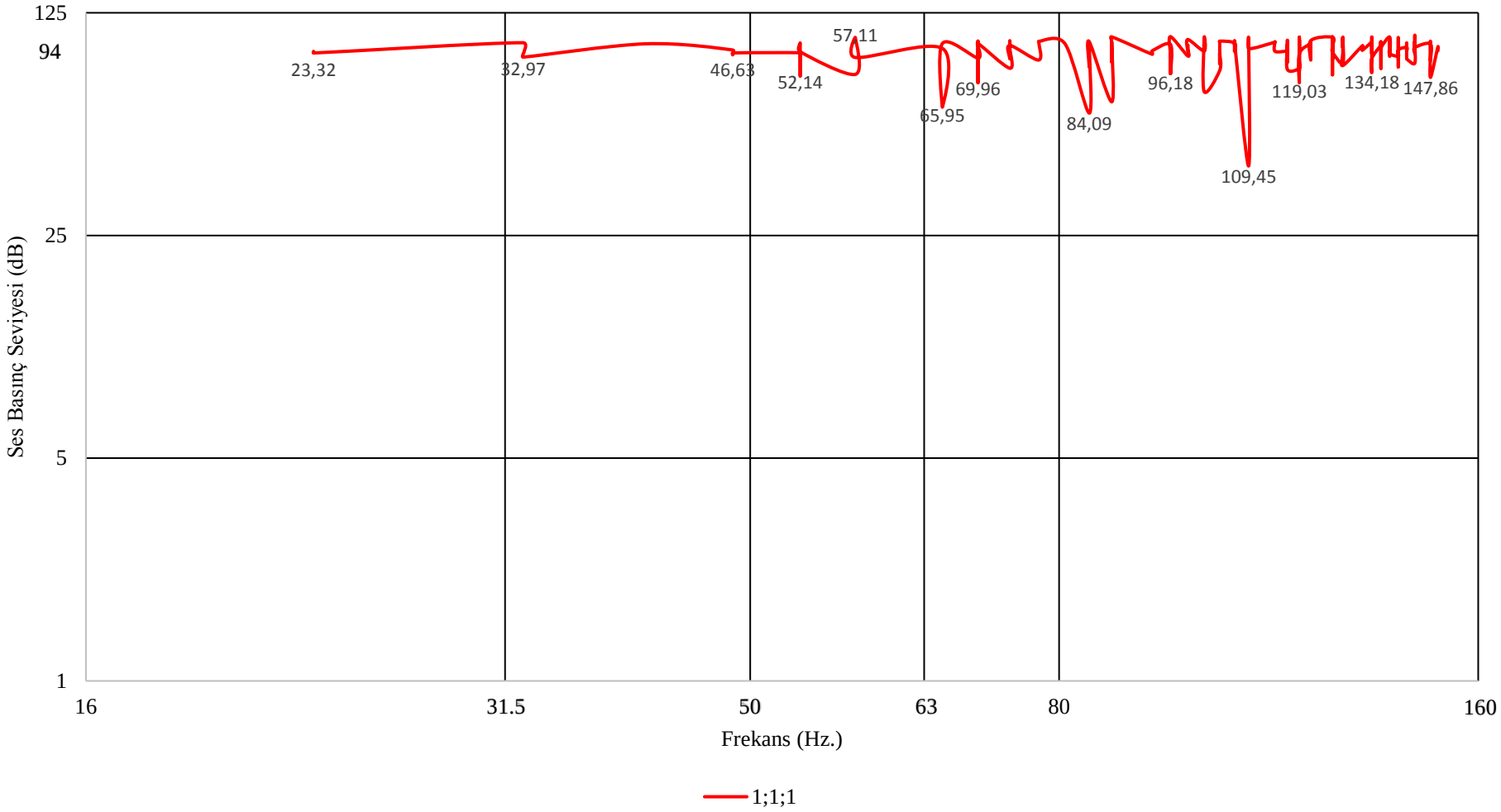
[**39**] **Bolt RH.** (1939). Normal modes of vibration in room acoustics: angular distribution theory. J. Acoust. Soc. Am. Vol.11 p74

[**40**] **Bolt RH.** (1946). Note on normal frequency statistics for rectangular rooms. J. Acoust. Soc. Am. Vol.18 p30

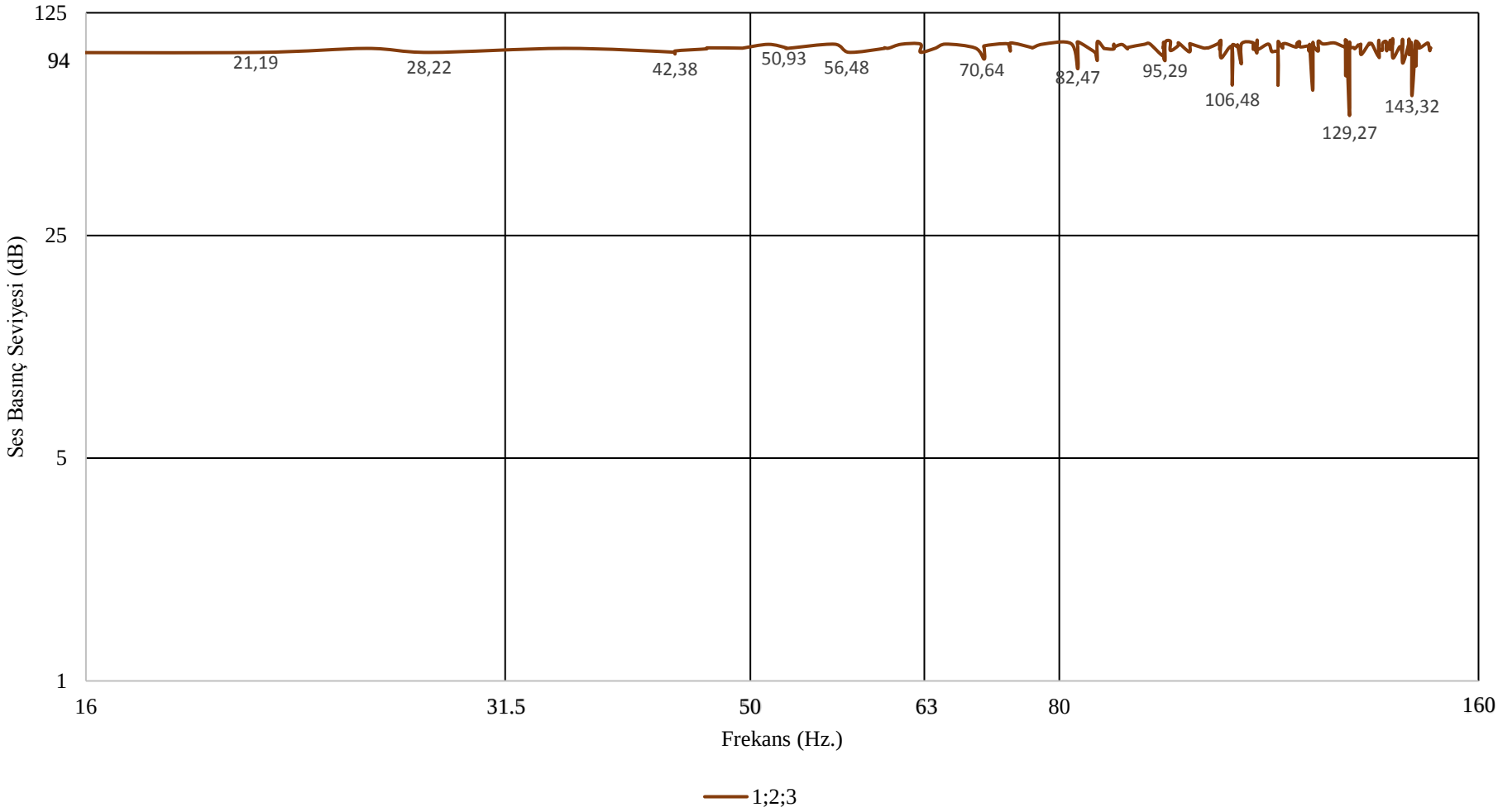
[**41**] **Hodges, Murray K.** "The school music rehearsal facility and gymnasium auditorium: Design and modification for acoustics and sound isolation" (1978). Graduate Student Theses, Dissertations, & Professional Papers. 9022. https://scholarworks.umt.edu/etd/9022

EKLER

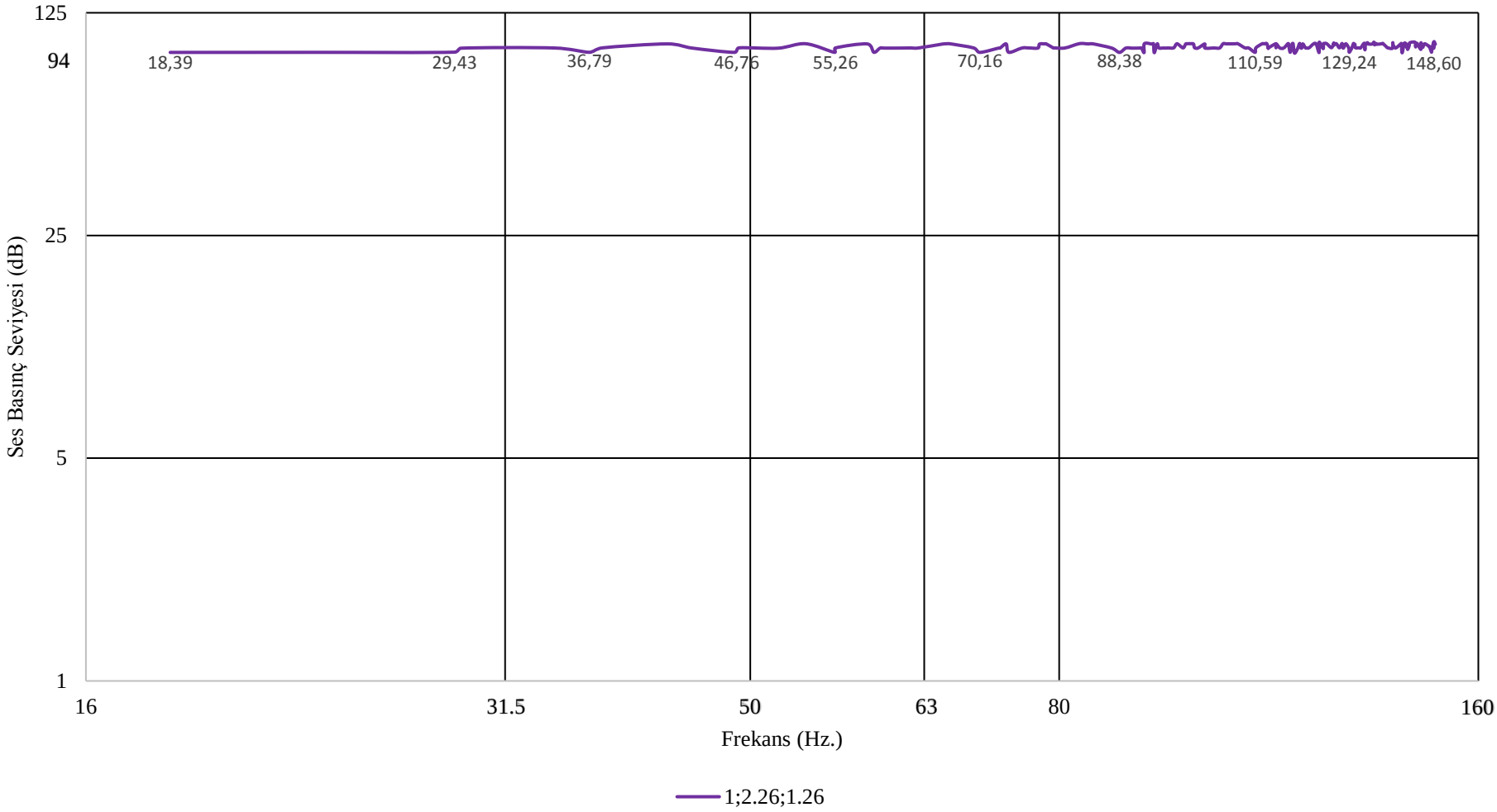
EK A : Frekans Tepki Eğrisi Grafikleri



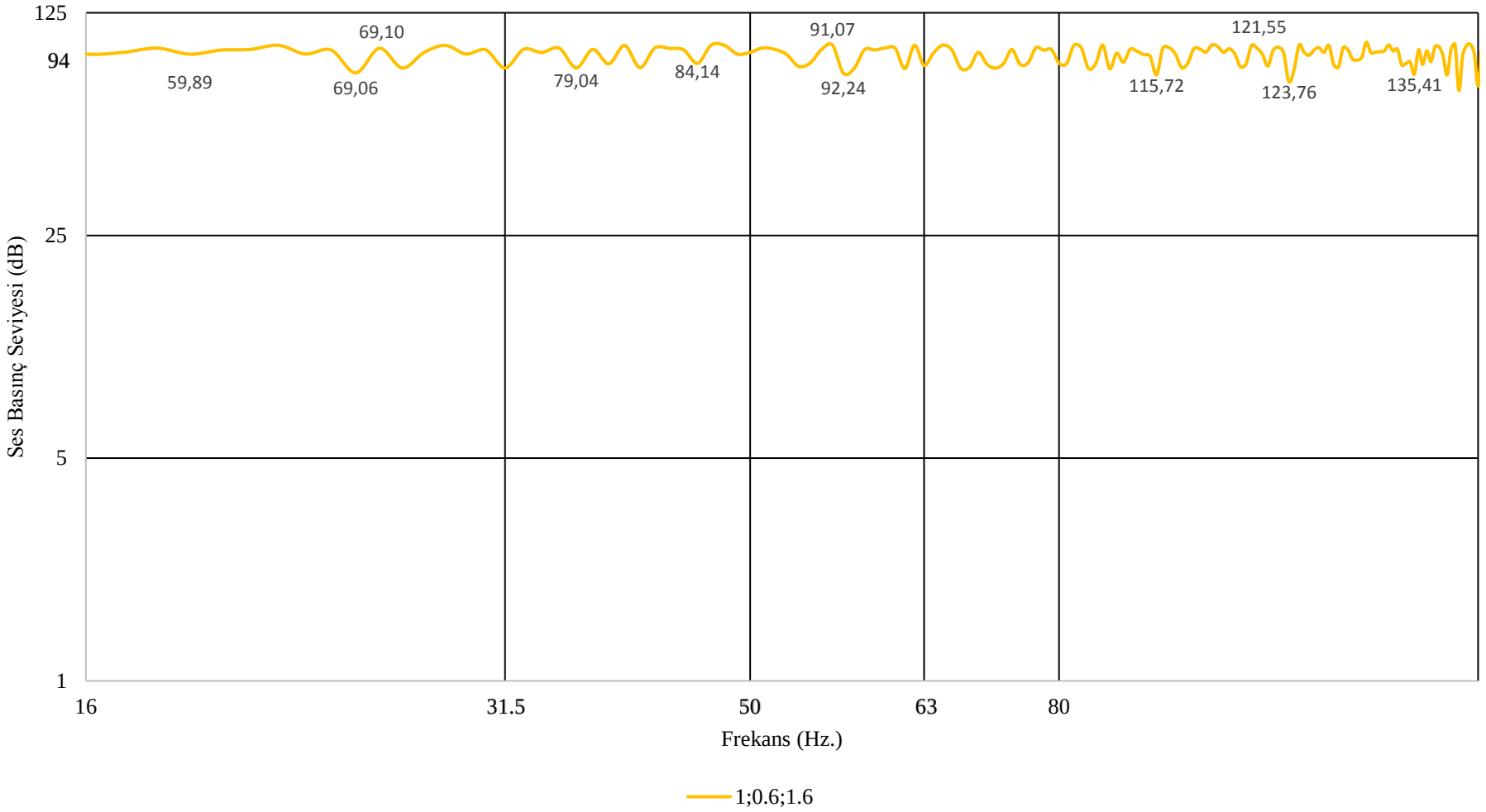
Şekil A.1 : 1:1:1 oran türüne ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir.



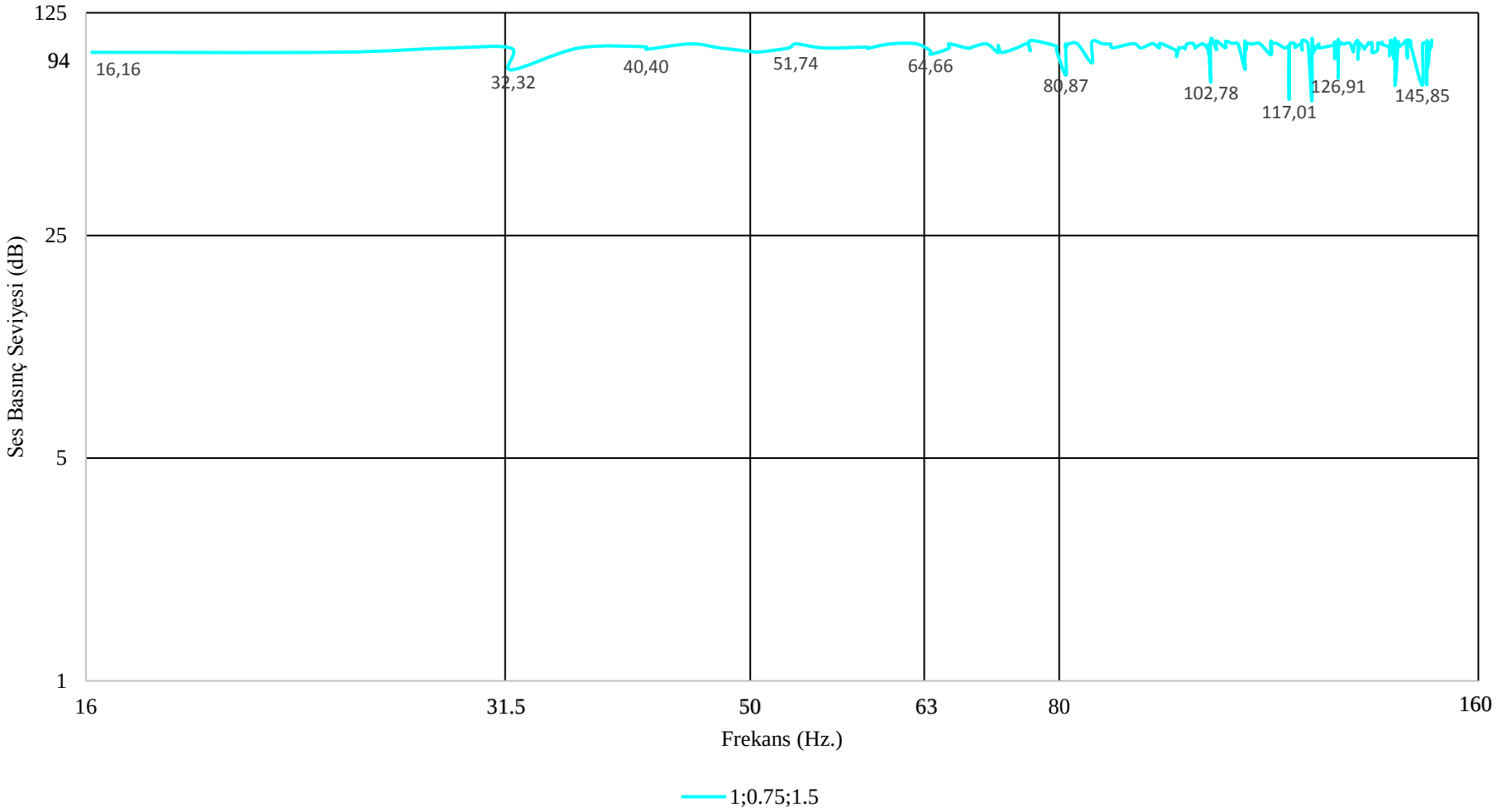
Şekil A.2 : 1:2:3 oran türüne ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir.



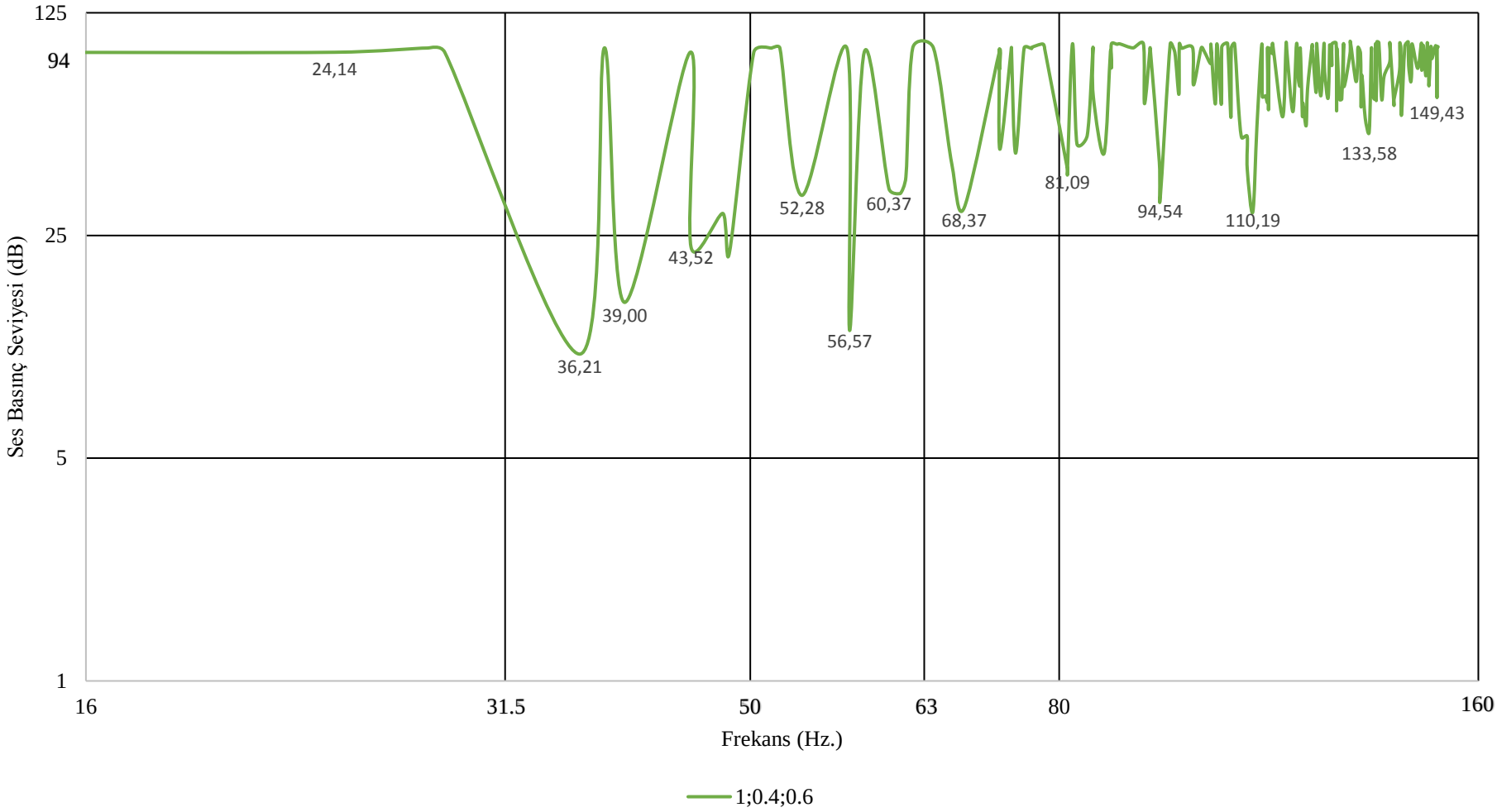
Şekil A.3 : 1:1.26:1.26 oran türüne ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir.



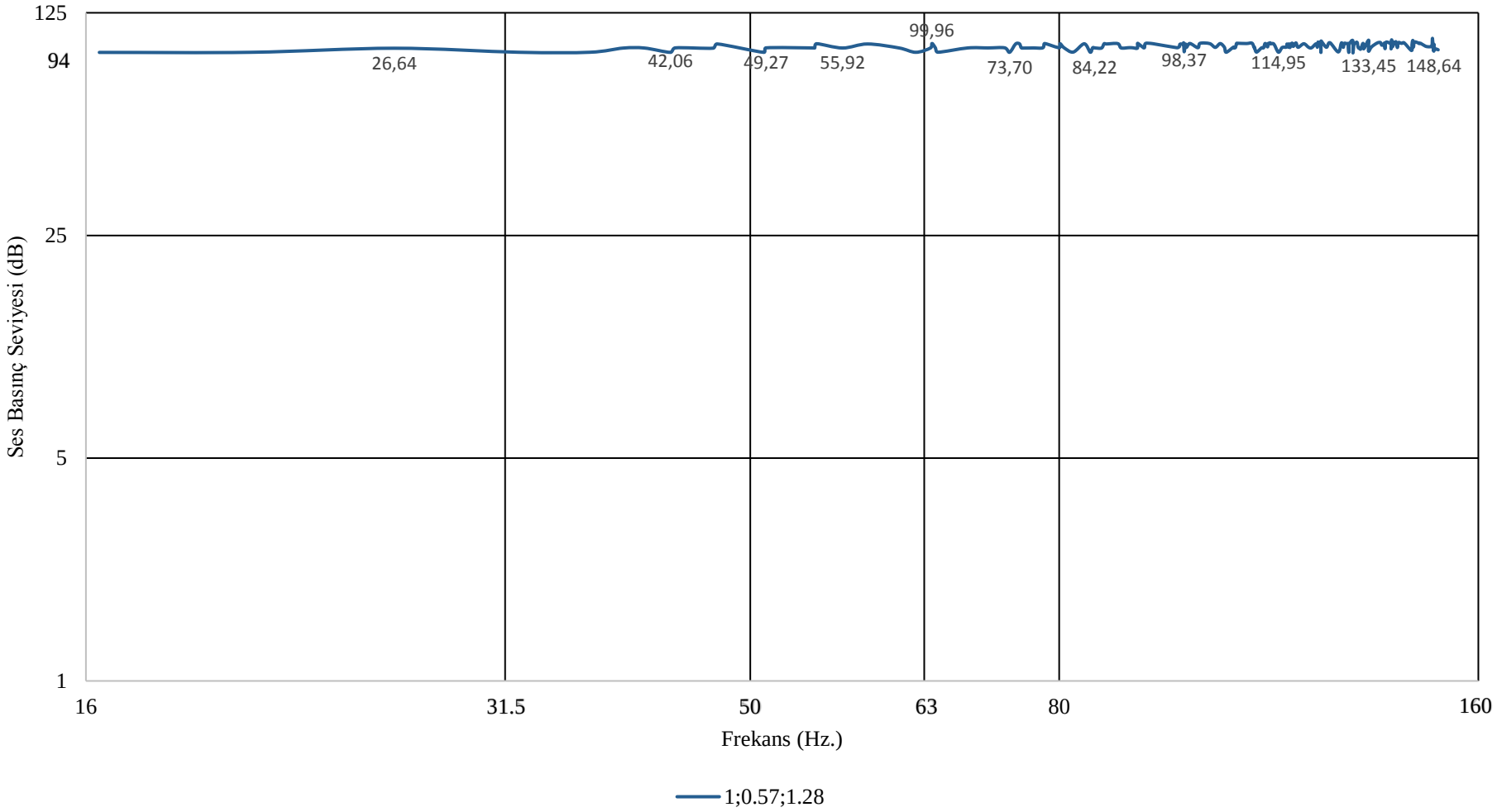
Şekil A.4 : 1:0.6:1.6 oran türüne ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir.



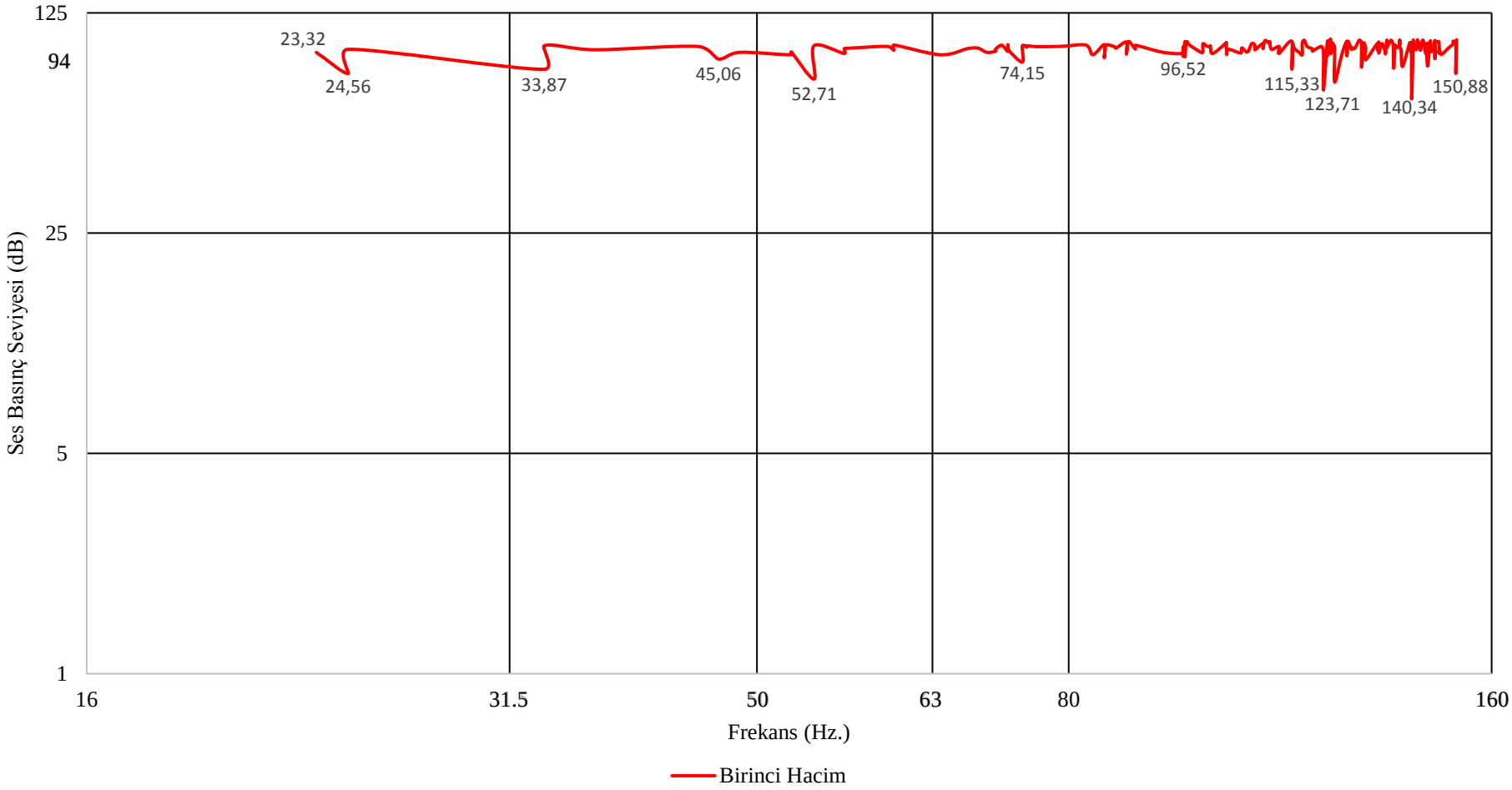
Şekil A.5 : 1:0.75:1.5 oran türüne ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir.



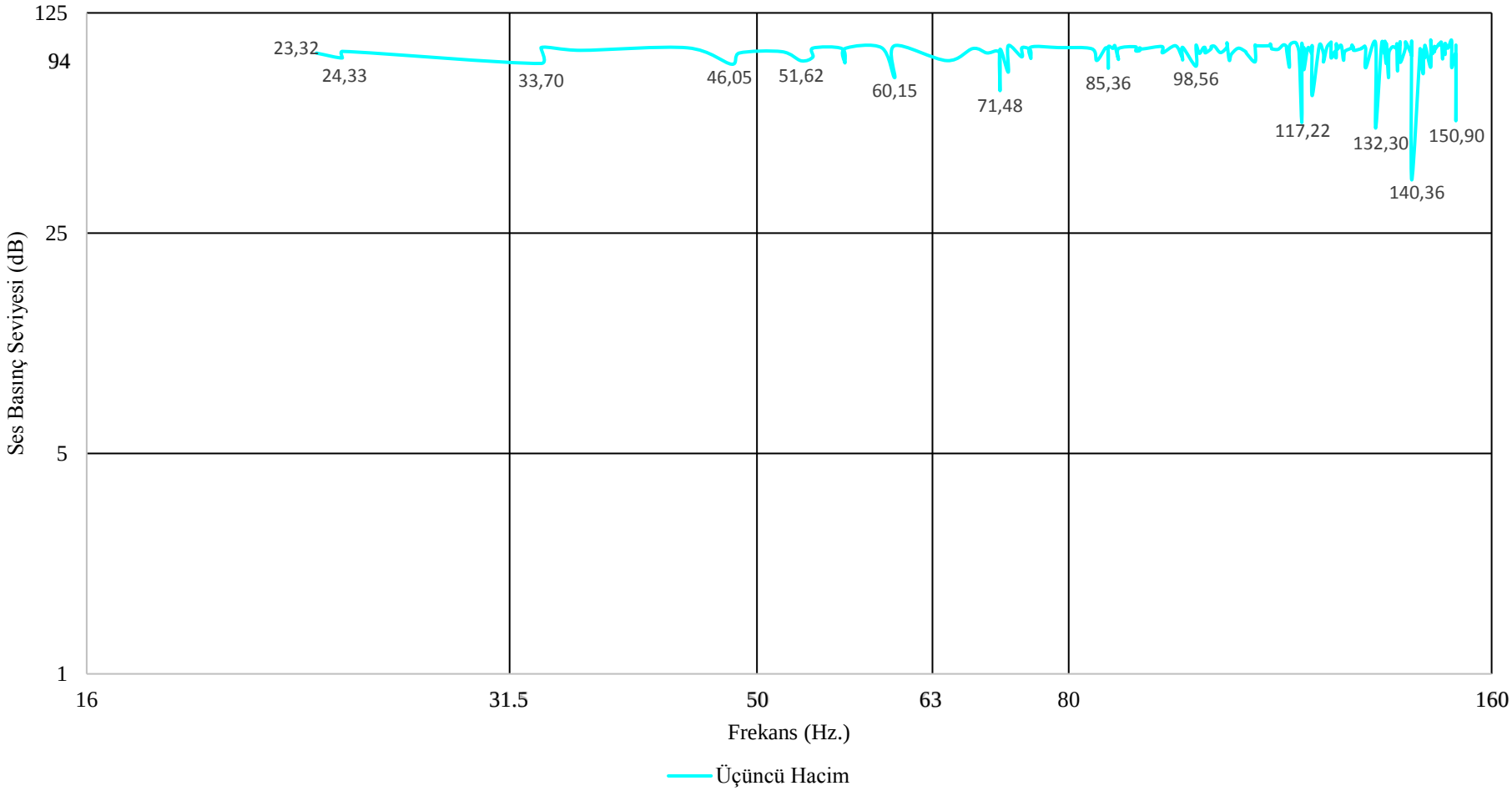
Şekil A.6 : 1:0.4:0.6 oran türüne ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir.



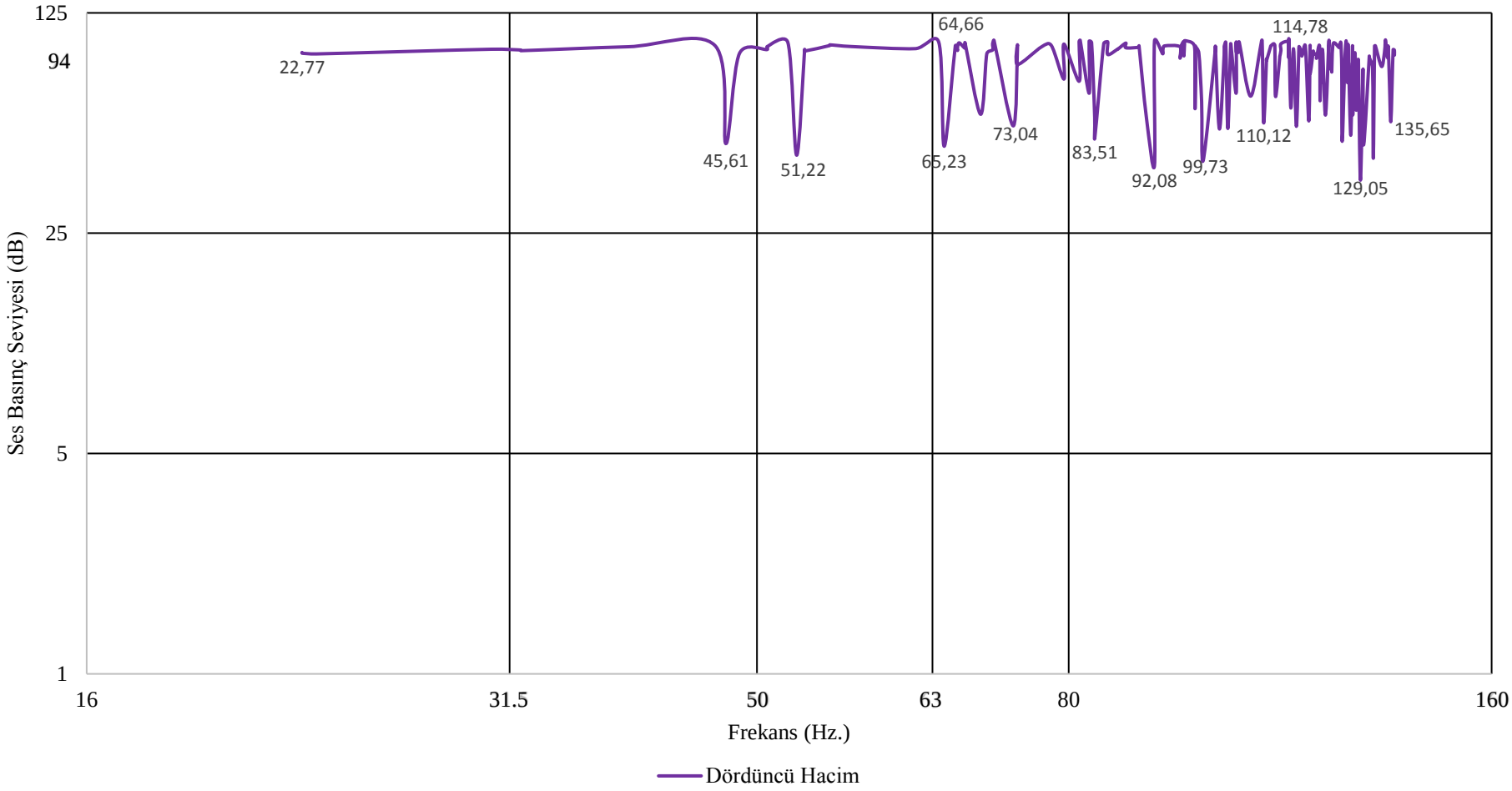
Şekil A.7 : 1:0.57:1.28 oran türüne ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir.



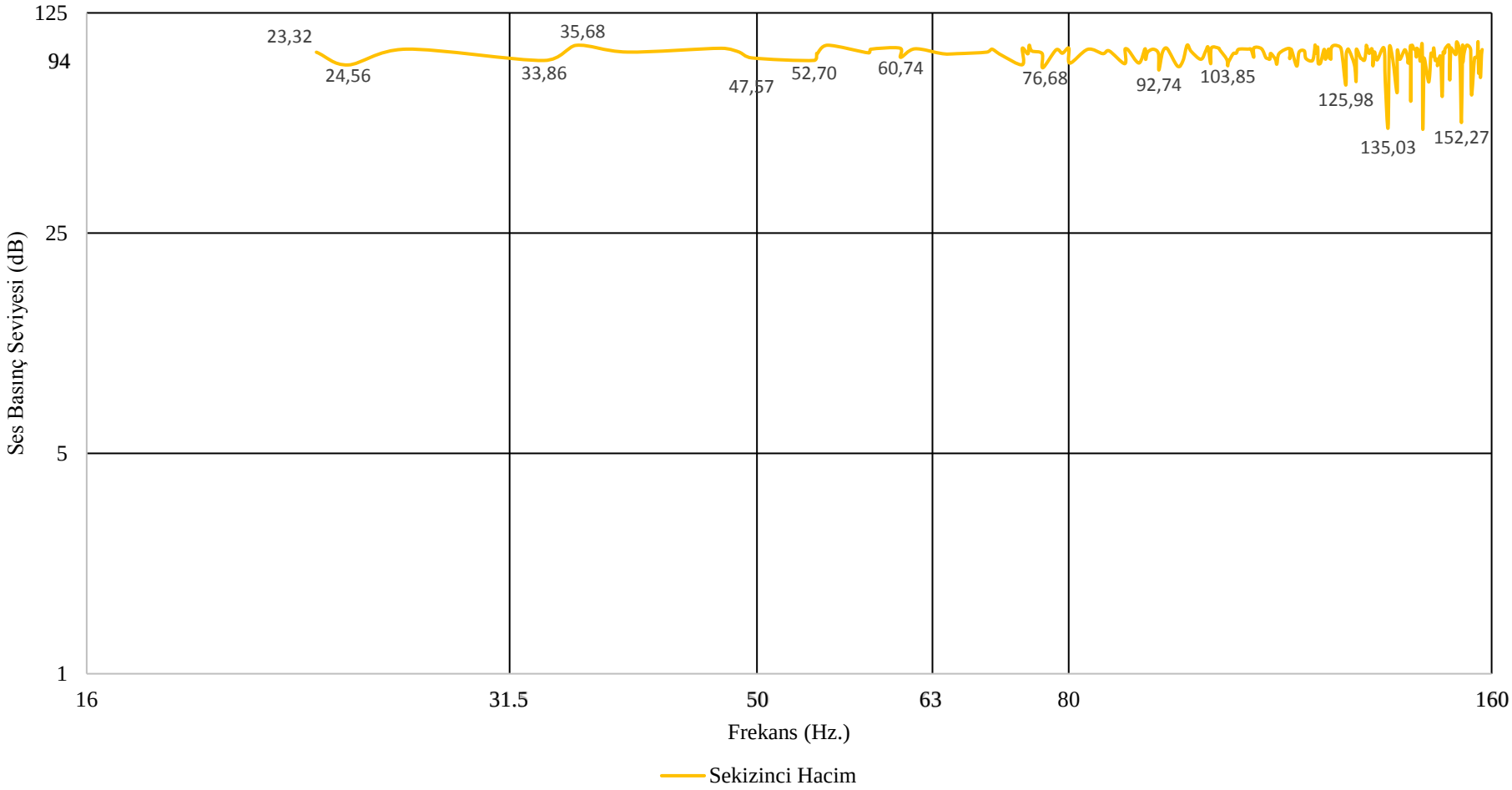
Şekil A.8 : Birinci hacme ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir.



Şekil A.9 : Üçüncü hacme ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir.



Şekil A.10 : Dördüncü hacme ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir.



Şekil A.11 : Sekizinci hacme ait hacmin frekans tepki eğrisi. Eğri üzerindeki değerler frekans ekseni değerleridir.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** İlkay SEFER
Doğum Tarihi ve Yeri **:** 13.03.1991 / Bursa
E-posta **:** seferilkay@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2015, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2016- : Norm Mimarlık / Mimar