

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ANTALYA CAM PİRAMİTİ’NİN HACİM AKUSTİĞİNİN
BİLGİSAYAR SİMÜLASYON YÖNTEMİYLE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mimar Hicran BALCI**

Anabilim Dalı : MİMARLIK

Programı : ÇEVRE KONTROLÜ VE YAPI TEKNOLOJİSİ

HAZİRAN 2007

**ANTALYA CAM PİRAMİTİ'NİN HACİM AKUSTİĞİNİN
BİLGİSAYAR SİMÜLASYON YÖNTEMİYLE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mimar Hicran BALCI
(502021371)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2007**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Sevtap YILMAZ DEMİRKALE
Diğer Jüri Üyeleri Yrd.Doç. Dr. Nurgün TAMER BAYAZIT (İ.T.Ü.)
Doç.Dr. Ayşe ERDEM AKNESİL (Y.T.Ü.)**

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Günümüz mimarları için tasarladıkları binalarda camla çalışmak oldukça zorlayıcı olabilmektedir. Camla tasarım yaparken birçok faktör göz önünde bulundurulmalı ve bunlardan birisi de akustik performans gereklerinin yerine getirilmesidir. Oldukça sert ve enerji sönümlendirme katsayısı düşük bir malzeme olduğu için ses geçirgen ve yansıtıcı özelliklerinden dolayı akustik performansı düşüktür. Tüm bu zorlayıcı özelliklerine rağmen, malzemeyi anlayıp kapsamlı bir şekilde kullananlar yıllarca beğenilecek veya eleştirilecek bir cam mimari yarattılar. Zamanla, camla ilgili mimari uygulamalar bir yöntem olmaktan çıkmış ve bir ihtişam gösterisine dönüşmüştür. Bundan 10 yıl önce Türkiye’de tasarlanan ve inşa edilen 7000m² cam giydirme cepheli Antalya Cam Piramidi de bu tür yapıların bir örneğidir. Bina ile ilgili basında zaman zaman çıkan eleştirilerde oldukça çınlayan bir hacim akustiğine sahip olduğu belirtilmesi, fuar ve kongre gibi farklı akustik ihtiyaçları olan kullanımlar için tasarlanan 35.000m³ hacimli cam yapının sergilediği akustik performansı araştırmak bu çalışmanın konusu olmuştur. Çalışma, doğruluğu ispatlanmış ve kullanımı yaygınlaşan bilgisayar simülasyon yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Amaç, hacim geometrisinin akustik performansının üzerindeki etkisini tespit edip, genellikle Türkiye’de pek önemsenmeyen bir konu olan akustik performansı elde etmek için tüm akustik ve geometrik parametrelerinin bina tasarımının erken safhalarında irdelenmesi gerektiğinin önemini belirtmektir.

Bu çalışmada ilgi ve önerileri ile beni yönlendiren tez danışmanım Prof. Dr. Sevtap Yılmaz DEMİRKALE’ye teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte bana özveri ile yardım edip desteğini esirgemeyen sevgili eşim Mimar Cenap Hakan BALCI’ya teşekkürü borç bilirim.

Mayıs 2007

Hicran BALCI

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Antalya Cam Piramiti'nin Mimarisi	3
1.2. Yapı Malzemesi Olarak Camın Akustik Performansı	5
2. HACİM AKUSTİĞİ DEĞERLENDİRİLMELERİNDE KULLANILAN AKUSTİK VE TASARIM PARAMETRELERİ	8
2.1. Nesnel Akustik Parametreler	11
2.1.1. Çınlama Süresi (Reverberation Time- T)	11
2.1.2. Erken Düşme Süresi (Early Decay Time- EDT)	14
2.1.3. Sesin Yüksekliği (Strength- Loudness- G)	16
2.1.4. Belirginlik (Definition- D50)	17
2.1.5. Sesin Açıklığı- Netliği (Clarity- C80)	18
2.1.6. Erken Yanal Enerji Oranı (Early Lateral Energy Fraction- LF80)	20
2.1.7. Gecikmiş Yanal Ses Düzeyi (Early Lateral Sound Level- LG80)	22
2.1.8. Konuşmanın İletim İndeksi (Speech Transmission Index- STI)	23
2.2. Öznel Akustik Parametreler	25
2.2.1. Canlılık ve Ses Dolgunluğu (Liveness and Fullness of Tone)	25
2.2.2. Belirginlik veya Açıklık (Definition or Clarity)	26
2.2.3. Mekânsal Algılama (Spatial Impression or Spatial Response)	28
2.2.4. Sesin Yüksekliği (Loudness)	29
2.3. Tasarım Parametreleri	29
2.3.1. Salonun Formu	30
2.3.2. Salonun Hacmi	36
3. ANTALYA CAM PİRAMİTİ'NİN HACİM AKUSTİĞİNİN BİLGİSAYAR SİMÜLSAYON YÖNTEMİYLE DEĞERLEMESİ	38
3.1. Bilgisayar Destekli Akustik Simülasyon Yönteminin Açıklanması	38
3.2. ODEON Bilgisayar Programının Dayandığı Hesap Prensipleri	39

3.3. Simülasyon Çalışması İçin Yapılan Kabuller	41
3.3.1. Hacim Kabulleri	41
3.3.2. Yüzey Malzeme Kabulleri	42
3.3.3. Ses Kaynağı ve Alıcılarla İlgili Kabuller	44
3.4. Simülasyon Sonuçları ve Analizler	47
3.4.1. Hacmin Ortalama Simülasyon Sonuçları	47
3.4.2. Hacimdeki 20 Alıcı Noktasının Simülasyon Sonuçları	54
4. ANTALYA CAM PİRAMİTİ'NİN AKUSTİK KOŞULLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN BİR ÖNERİ GELİŞTİRİLMESİ	62
4.1. İyileştirme Önerisinin Geliştirilmesinde İzlenen Adımlar	65
4.1.1. Hacim Geometrisi ile İlgili Kabuller	65
4.1.2. Hacmin Yüzey Kaplamaları ile İlgili Malzeme Kabulleri	67
4.1.3. Simülasyon Kurulumunda Alınan Kabuller	69
4.2. İyileştirme Önerisinin Simülasyon Sonuçları ve Analizler	70
4.2.1. İyileştirme Önerisinin Ortalama Simülasyon Sonuçları	70
4.2.2. İyileştirme Önerisindeki 20 Alıcı Noktasının Simülasyon Sonuçları	76
4.3. Hacmin Mevcut Kullanımının ve İyileştirme Önerisinin Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi	80
5. SONUÇ	83
KAYNAKLAR	87
EKLER	90
ÖZGEÇMİŞ	138

KISALTMALAR

AI	: Anlaşılabilirlik indeksi
AL_{cons}	: Sessiz Harflerin anlaşılammaması
ASW	: Algılanan kaynak genişliği
C80	: Açıklık, netlik
D50	: Belirginlik
EDT	: Erken düşme süresi
G	: Ses yüksekliği düzeyi
IAAC_E	: İlk yansımaların kulak arası karşılıklı ilişki katsayısı
ITDG	: İlk ulaşım zamanı
LEV	: Dinleyicinin hacimce kuşatılmışlığı
LG80	: Gecikmiş yan al ses düzeyi
LF80	: Erken yan al enerji oranı
NCB	: Dengelenmiş gürültü kriter eğrileri
OITC	: Dıştan içe ses geçiş sınıfı
SI	: Konuşma anlaşılabilirliği
S/N	: Sinyal sesin gürültüye oranı
STI	: Konuşmanın iletim indeksi
STC	: Ses geçiş sınıfı
T	: Çınlama süresi

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1	Farklı kullanımdaki salon tipleri için tavsiye edilen kişi başına düşen hacim miktarı.....36
Tablo 2.2	Nesnel akustik parametreleri için 1000 Hz’de önerilen optimum değerler ve değişim aralıkları.....37
Tablo 3.1	Hacim yüzeylerine atanan malzemeler, yutuculuk ve saçıcılık özellikleri.....43
Tablo 3.2	Alıcıların özellikleri ve hacim içindeki konumu46
Tablo 4.1	İyileştirme modelinin yüzeylerine atanan malzemeler, yutuculuk ve saçıcılık özellikleri.....69
Tablo 4.2	Hacmin mevcut kullanımının ve iyileştirme önerisinin simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....81
Tablo B.1	1-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....94
Tablo B.2	2-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....95
Tablo B.3	3-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....96
Tablo B.4	4-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....97
Tablo B.5	5-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....98
Tablo B.6	1-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....99
Tablo B.7	2-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....100
Tablo B.8	3-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....101
Tablo B.9	4-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....102
Tablo B.10	5-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....103
Tablo B.11	1-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....104
Tablo B.12	2-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....105
Tablo B.13	3-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....106
Tablo B.14	4-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....107
Tablo B.15	5-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....108
Tablo B.16	1-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....109
Tablo B.17	2-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....110
Tablo B.18	3-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....111
Tablo B.19	4-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....112
Tablo B.20	5-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....113
Tablo D.1	1-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....118
Tablo D.2	2-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....119
Tablo D.3	3-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....120
Tablo D.4	4-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....121
Tablo D.5	5-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....122
Tablo D.6	1-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....123
Tablo D.7	2-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....124
Tablo D.8	3-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....125
Tablo D.9	4-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....126

Tablo D.10	5-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....	127
Tablo D.11	1-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....	128
Tablo D.12	2-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....	129
Tablo D.13	3-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....	130
Tablo D.14	4-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....	131
Tablo D.15	5-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....	132
Tablo D.16	1-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....	133
Tablo D.17	2-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....	134
Tablo D.18	3-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....	135
Tablo D.19	4-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....	136
Tablo D.20	5-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler.....	137

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Antalya Cam Piramiti'nin İzometrik Perspektifi.....	3
Şekil 1.2 : Antalya Cam Piramiti'nin İç Görünümü.....	4
Şekil 1.3 : (a) Cam kalınlıkları ile rezonans frekansların ilişkisi (b) Lamine camın ses yalıtımı skalası.....	6
Şekil 2.1 : Bir sinyale karşı hacmin oluşturduğu ideal akustik tepki diyagramı.....	8
Şekil 2.2 : Konuşma yansımalarının algılanması.....	10
Şekil 2.3 : Örnek bir düşüş ile T60 ve T30 çınlama sürelerinin açıklanması.....	12
Şekil 2.4 : Çınlamanın konuşma anlaşılabilirliği üzerindeki maskeleye etkisi.....	13
Şekil 2.5 : Farklı kullanımlar için 500 Hz'te önerilen optimum çınlama süreleri.....	13
Şekil 2.6 : Düşüş eğrisi üzerinde "EDT" ve "T"nin belirlenmesi.....	15
Şekil 2.7 : Konuşmanın anlaşılabilirliği (SI) ile Belirginlik (D50) ilişkisi.....	18
Şekil 2.8 : a) C80 ve C50 parametreleri arasındaki ilişki [13], b) C80 ile STI arasındaki ilişki.....	19
Şekil 2.9 : Salon şekli ile sesin yanallığının ilişkisi.....	21
Şekil 2.10 : Farklı tipteki testler için STI ve anlaşılabilirlik dereceleri arasındaki tipik ilişkiler	25
Şekil 2.11 : C80 ile T arasındaki ilişki	27
Şekil 2.12 : Dinleyici alanı üzerinde düzgün yansımalar yönelten salon tavanı ve balkon altı profili	31
Şekil 2.13 : Yanlış şekillendirilmiş tavan ile oluşan gecikmiş yansımalar ve balkon altı profilinin doğurduğu yansımış ışıktan mahrum akustik gölge bölgesi.....	32
Şekil 2.14 : Bir salonun yan duvarlarının dışa doğru açılmasının akustik etkileri	32
Şekil 2.15 : Bir konuşmacının ses basınç düzeyinin (a) yatay düzlemde ve (b) dikey düzlemde dağılımı.....	33
Şekil 2.16 : Salon yan duvarları için mutlak maksimum yana açılım derecesi ile tavsiye edilen maksimum yana açılım.....	34
Şekil 2.17 : Düz döşeme sınırının hesaplanması.....	35
Şekil 2.18 : Eşit yükseklikte rıhtlara sahip düzgün eğimli döşeme hesaplaması.....	35
Şekil 3.1 : Antalya Cam Piramiti'nin üç boyutlu modeli.....	39
Şekil 3.2 : Kaynağın üç boyutlu modelde konumu.....	44
Şekil 3.3 : Kaynak ve 20 alıcının hacim içindeki konumu.....	46
Şekil 3.4 : Antalya Cam Piramiti'nin erken düşme süresi (EDT) simülasyon değerleri.....	47

Şekil 3.5	: Antalya Cam Piramiti'nin çınlama süresi T simülasyon değerleri.....	48
Şekil 3.6	: Antalya Cam Piramiti'nin Ses Yüksekliği (G) simülasyon değerleri.....	50
Şekil 3.7	: Antalya Cam Piramiti'nin Sesin Açıklığı (C80) simülasyon değerleri.....	51
Şekil 3.8	: Antalya Cam Piramiti'nin Belirginlik (D50) simülasyon değerleri.....	52
Şekil 3.9	: Antalya Cam Piramiti'nin LF80 simülasyon değerleri.....	53
Şekil 3.10	: Antalya Cam Piramiti'nin modelinde kaynak ve alıcıların konumu.....	54
Şekil 3.11	: Hacmin 20 alıcının konumuna göre EDT ve T değerleri.....	55
Şekil 3.12	: 5-A numaralı alıcıda 60 msn sonrasında ulaşan güçlü gecikmiş yansımanın oluşturduğu eko.....	56
Şekil 3.13	: Tanımlanan 20 alıcının konumuna göre G simülasyon değerleri	57
Şekil 3.14	: Tanımlanan 20 alıcının konumuna göre C80 simülasyon değerleri.....	58
Şekil 3.15	: Tanımlanan 20 alıcının konumuna göre D50 simülasyon değerleri.....	59
Şekil 3.16	: Tanımlanan 20 alıcının konumuna göre LF80 simülasyon değerleri.....	60
Şekil 4.1	: İyileştirme önerisi üç boyutlu model kesiti.....	65
Şekil 4.2	: Salon formunu oluşturan yan duvarların paralellliğini bozmak için geliştirilen öneri.....	66
Şekil 4.3	: İyileştirme önerisi için yapılan yüzey ve malzeme kabulleri.....	67
Şekil 4.4	: Kaynağın iyileştirme modelindeki konumu.....	69
Şekil 4.5	: İyileştirme önerisi için hesaplanan EDT değerleri.....	71
Şekil 4.6	: İyileştirme önerisi için hesaplanan T30 değerleri.....	72
Şekil 4.7	: İyileştirme önerisi için hesaplanan Ses Yüksekliği (G) değerleri.....	73
Şekil 4.8	: İyileştirme önerisi için hesaplanan Sesin Açıklığı (C80) değerleri.....	74
Şekil 4.9	: İyileştirme önerisi için hesaplanan Konuşma Belirginliği (D50) değerleri.....	74
Şekil 4.10	: İyileştirme önerisi için hesaplanan Yanal Enerji Oranı (LF80) değerleri.....	75
Şekil 4.11	: Hacmin 20 alıcının konumuna göre EDT ve T30 değerleri.....	76
Şekil 4.12	: Hacmin 20 alıcının konumuna göre hesaplanan G değerleri.....	77
Şekil 4.13	: Hacmin 20 alıcının konumuna göre hesaplanan C80 değerleri.....	78
Şekil 4.14	: İyileştirme önerisi için hesaplanan Konuşma Belirginliği (D50) değerleri.....	78
Şekil 4.15	: İyileştirme önerisi için hesaplanan Yanal Enerji Oranı (LF80) değerleri.....	79
Şekil 4.16	: İyileştirme önerisi için hesaplanan konuşmanın iletim indeksi (STI) değerleri.....	80
Şekil B.1	: 1-A Alıcısı için yansımalar grafiği.....	94
Şekil B.2	: 1-A Alıcısı için ışın diyagramı	94
Şekil B.3	: 2-A Alıcısı için yansımalar grafiği.....	95
Şekil B.4	: 2-A Alıcısı için ışın diyagramı	95
Şekil B.5	: 3-A Alıcısı için yansımalar grafiği.....	96
Şekil B.6	: 3-A Alıcısı için ışın diyagramı	96

Şekil B.7	: 4-A Alıcısı için yansımalar grafiği.....	97
Şekil B.8	: 4-A Alıcısı için ışın diyagramı	97
Şekil B.9	: 5-A Alıcısı için yansımalar grafiği.....	98
Şekil B.10	: 5-A Alıcısı için ışın diyagramı	98
Şekil B.11	: 1-B Alıcısı için yansımalar grafiği.....	99
Şekil B.12	: 1-B Alıcısı için ışın diyagramı	99
Şekil B.13	: 2-B Alıcısı için yansımalar grafiği.....	100
Şekil B.14	: 2-B Alıcısı için ışın diyagramı	100
Şekil B.15	: 3-B Alıcısı için yansımalar grafiği.....	101
Şekil B.16	: 3-B Alıcısı için ışın diyagramı	101
Şekil B.17	: 4-B Alıcısı için yansımalar grafiği.....	102
Şekil B.18	: 4-B Alıcısı için ışın diyagramı	102
Şekil B.19	: 5-B Alıcısı için yansımalar grafiği.....	103
Şekil B.20	: 5-B Alıcısı için ışın diyagramı	103
Şekil B.21	: 1-C Alıcısı için yansımalar grafiği.....	104
Şekil B.22	: 1-C Alıcısı için ışın diyagramı	104
Şekil B.23	: 2-C Alıcısı için yansımalar grafiği.....	105
Şekil B.24	: 2-C Alıcısı için ışın diyagramı	105
Şekil B.25	: 3-C Alıcısı için yansımalar grafiği.....	106
Şekil B.26	: 3-C Alıcısı için ışın diyagramı	106
Şekil B.27	: 4-C Alıcısı için yansımalar grafiği.....	107
Şekil B.28	: 4-C Alıcısı için ışın diyagramı	107
Şekil B.29	: 5-C Alıcısı için yansımalar grafiği.....	108
Şekil B.30	: 5-C Alıcısı için ışın diyagramı	108
Şekil B.31	: 1-D Alıcısı için yansımalar grafiği.....	109
Şekil B.32	: 1-D Alıcısı için ışın diyagramı	109
Şekil B.33	: 2-D Alıcısı için yansımalar grafiği.....	110
Şekil B.34	: 2-D Alıcısı için ışın diyagramı	110
Şekil B.35	: 3-D Alıcısı için yansımalar grafiği.....	111
Şekil B.36	: 3-D Alıcısı için ışın diyagramı	111
Şekil B.37	: 4-D Alıcısı için yansımalar grafiği.....	112
Şekil B.38	: 4-D Alıcısı için ışın diyagramı	112
Şekil B.39	: 5-D Alıcısı için yansımalar grafiği.....	113
Şekil B.40	: 5-D Alıcısı için ışın diyagramı	113
Şekil D.1	: 1-A Alıcısı için yansımalar grafiği.....	118
Şekil D.2	: 1-A Alıcısı için ışın diyagramı	118
Şekil D.3	: 2-A Alıcısı için yansımalar grafiği.....	119
Şekil D.4	: 2-A Alıcısı için ışın diyagramı	119
Şekil D.5	: 3-A Alıcısı için yansımalar grafiği.....	120
Şekil D.6	: 3-A Alıcısı için ışın diyagramı	120
Şekil D.7	: 4-A Alıcısı için yansımalar grafiği.....	121
Şekil D.8	: 4-A Alıcısı için ışın diyagramı	121
Şekil D.9	: 5-A Alıcısı için yansımalar grafiği.....	122
Şekil D.10	: 5-A Alıcısı için ışın diyagramı	122
Şekil D.11	: 1-B Alıcısı için yansımalar grafiği.....	123
Şekil D.12	: 1-B Alıcısı için ışın diyagramı	123
Şekil D.13	: 2-B Alıcısı için yansımalar grafiği.....	124
Şekil D.14	: 2-B Alıcısı için ışın diyagramı	124
Şekil D.15	: 3-B Alıcısı için yansımalar grafiği.....	125
Şekil D.16	: 3-B Alıcısı için ışın diyagramı	125

Şekil D.17	: 4-B Alıcısı için yansımalar grafiği.....	126
Şekil D.18	: 4-B Alıcısı için ışın diyagramı	126
Şekil D.19	: 5-B Alıcısı için yansımalar grafiği.....	127
Şekil D.20	: 5-B Alıcısı için ışın diyagramı	127
Şekil D.21	: 1-C Alıcısı için yansımalar grafiği.....	128
Şekil D.22	: 1-C Alıcısı için ışın diyagramı	128
Şekil D.23	: 2-C Alıcısı için yansımalar grafiği.....	129
Şekil D.24	: 2-C Alıcısı için ışın diyagramı	129
Şekil D.25	: 3-C Alıcısı için yansımalar grafiği.....	130
Şekil D.26	: 3-C Alıcısı için ışın diyagramı	130
Şekil D.27	: 4-C Alıcısı için yansımalar grafiği.....	131
Şekil D.28	: 4-C Alıcısı için ışın diyagramı	131
Şekil D.29	: 5-C Alıcısı için yansımalar grafiği.....	132
Şekil D.30	: 5-C Alıcısı için ışın diyagramı	132
Şekil D.31	: 1-D Alıcısı için yansımalar grafiği.....	133
Şekil D.32	: 1-D Alıcısı için ışın diyagramı	133
Şekil D.33	: 2-D Alıcısı için yansımalar grafiği.....	134
Şekil D.34	: 2-D Alıcısı için ışın diyagramı	134
Şekil D.35	: 3-D Alıcısı için yansımalar grafiği.....	135
Şekil D.36	: 3-D Alıcısı için ışın diyagramı	135
Şekil D.37	: 4-D Alıcısı için yansımalar grafiği.....	136
Şekil D.38	: 4-D Alıcısı için ışın diyagramı	136
Şekil D.39	: 5-D Alıcısı için yansımalar grafiği.....	137
Şekil D.40	: 5-D Alıcısı için ışın diyagramı	137

SEMBOL LİSTESİ

T	: Çınlama Süresi
V	: Hacim
A	: Hacmin toplam yutuculuğu
t₃₀	: Sesin 30 dB'lik azalması için geçen süre
t₁₀	: Sesin 10 dB'lik azalması için geçen süre
p²	: Hacmin sinyal tepkisinden elde edilen ses basıncın karesi
cosθ	: Gelen sesin yönü ile dinleyicinin kulak aksı arasındaki açı
m(f_m)	: Modülasyon azalım faktörü (modulation reduction factor)
L_{SN}	: Sinyal düzeyinin gürültüye oranı (S/N ratio)
f_m	: Modülasyon frekansı
L_{SNapp}	: Görünürdeki sinyalin gürültüye oranı (apparent S/N ratio)
m	: Modülasyon azalım faktörü (modulation reduction factor)
α	: Yutuculuk katsayısı
δ	: Saçıcılık katsayısı

ANTALYA CAM PİRAMİT'İNİN HACİM AKUSTİĞİNİN BİLGİSAYAR SİMÜLASYON YÖNTEMİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Yapı malzemesi olarak cam, son yıllarda giderek artan bir çeşitlilikte kullanılmakta ve bina kabuğu tasarımında giydirme cepheler aracılığıyla mekânlarımızı çevreleyen örtüler olarak karşımıza çıkmaktadır. Camla tasarım yaparken birçok faktör göz önünde bulundurulmalı ve bunlardan birisi de akustik performans gereklerinin yerine getirilmesidir. Ancak oldukça sert ve enerji sönmülendirme katsayısı düşük bir malzeme olduğu için ses geçirgen ve yansıtıcı özelliklerinden dolayı akustik performansı da düşüktür. Günümüzde cam laminasyon uygulamaları cama ses yalıtım özelliği kazandırmış olsa da, ses yansıtıcı bir malzeme olma özelliğini halen korumaktadır. Tüm bu nedenlerden dolayı camla çalışmanın zorluklarına rağmen, mimarlar tarafından o kadar kapsamlı bir şekilde kullanıp öyle bir cam mimari yaratıldı ki, camla ilgili uygulamalar bir yöntem olmaktan çıktı ve bir ihtişam gösterisine dönüştü. Bu cam mimarının Türkiye'deki bir örneği de 1997 yılında inşa edilmiş Antalya Cam Piramit fuar ve kongre merkezi binasıdır. Fuar ve kongre gibi farklı akustik ihtiyaçları olan kullanımlar için tasarlanan 2500 m² alanlı ve 35000 m³ hacimli piramidal formdaki bina, 7000 m² cam giydirme cephe ve çatıyla kaplanmıştır. Söz konusu bina için çınlayan bir hacim olduğuna yönelik yapılan eleştiriler sonucunda bilgisayar simülasyon yöntemiyle mekanın akustik performansının araştırılmasına karar verilmiştir. Tarif edilen büyüklükteki cam yüzeylerinin oluşturduğu hacim geometrisinin mekânın akustik performansının üzerindeki etkilerinin araştırılması bu çalışmanın konusu olmuştur.

Çalışma için Antalya Cam Piramidin hacim geometrisini aynen yansıtan üç boyutlu modeli hazırlanmış ve hacim akustiği ile ilgili parametrelerin hesaplanıp analizlerin yapılması için ODEON hacim akustiği bilgisayar simülasyon programı kullanılmıştır.

Çalışmanın birinci bölümünde Antalya Cam Piramit'in mimarisinden ve bina tasarım konseptinin başlıca çıkış noktası olan şeffaflık ve camın yapı malzemesi olarak akustik performansından bahsedilmiştir.

İkinci bölümde bilgisayar simülasyon programının hesapladığı ve Cam Piramit'in hacim akustiğinin değerlendirilmesinde kullanılan akustik parametrelerle onları etkileyen tasarım parametreleri tanımlanmıştır.

Üçüncü bölümde bu çalışmada kullanılan hacim akustiği bilgisayar simülasyon programının dayandığı hesap teorileri ile çalışma yöntemi açıklanmış ve hacimle ilgili bazı kabuller yapılmıştır. Hesaplamalarla gerçek durumu yansıtan sonuçlar elde edilebilmesi için modeldeki hacim yüzeyleri için yerinde uygulanan malzemelerle aynı veya yakın kabuller yapılmıştır. Simülasyon çalışması 1 nokta tipi omni kaynak ve salon genelinde 4 grupta tanımlı 20 alıcı noktası ile çoklu nokta sinyal tepkisi hesap yöntemine (multiple point response calculation) göre yapılmıştır. Akustik parametreler için

hesaplanan ortalama değerler ve 20 alıcı noktasındaki değerler hacim geometrisi ile ilişkilendirilip değerlendirilmiştir. Elde edilen ortalama değerlerin sonuçlarına göre hacmin çınlayan bir mekan olduğu ngrlmştr. Hacim için hesaplanan kilise akustiğine yakın yüksek erken düşme süreleri (EDT) ile çınlama sürelerinin(T30) başlıca nedeni, hacmin büyüklüğü ve dinleyici başına düşen $14m^3$ gibi yüksek hacim miktarı. Hacmin 40 m geniş ve 42 m derin olması gibi formuna ilişkin geometrik parametreler de sesin gücü (G), yanal enerji oranı (LF80) ve konuşma anlaşılabilirliği (STI) gibi akustik parametreleri olumsuz etkilemiştir. Söz konusu akustik parametreler için daha olumlu sonuçlar elde edilmesi için ses güçlendirme sistemi kullanılabilir ve Cam Piramit'te de böyle bir sistem efektif kullanılamasa da hlihazırda bulunmakta. Ancak, bu kadar çınlayan bir ortamda ses gücünün artmasıyla iyileştirilmesi hedeflenen akustik parametrelerdeki değişim muhtemelen hissedilmeyecektir, çünkü mevcut olan eko gibi akustik kurslar daha da belirginleşerek ortam sesinin gürültüye dönüşmesine neden olacaktır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda hacim akustiğinin optimizasyonu için çok amaçlı kullanımlar için ngrlen kişi başı $7m^3$ hacim kabul yapılarak Bölüm 4'te bir hacim akustiği iyileştirme nerisi geliştirilmiştir.

Dördüncü bölümde hacmin akustik koşullarının iyileştirilmesi için mimari konsepte saygılı kalarak geliştirilen iyileştirme önerisinde asma tavan gibi tasarlanan şeffaf cam kabuk ile mekn hacmi yarı yarıya azaltılmıştır. Yan duvarların paralelliği salonun arka kısımlarından içe doğru 5° döndürülerek bozulmuştur. Arka duvardan gelen gecikmiş yansımaların neden olduğu eko sorunlarını gidermek için arka duvar alanının %50'sine yutucu/yayıcı (diffsorptive) zellikteki RPG'nin BAD Panelleri tanımlanmıştır. Yan duvarların st kısmından ve sahneye yakın n kısımlardan gelen gcl fakat salonun orta kısmından sonraki alıcılar için gecikmiş olan yansımaların kontrolünü sağlamak için bu yan duvar yüzeylerine yansıtıcı/yayıcı özellikteki RPG'nin Flutterfree panelleri uygulanmıştır. Hacmin yüzeylerine tanımlanan bu yutucu, yayıcı ve yansıtıcı özellikteki malzemelerle, daha çok konuşma anlaşılabilirliğinin sağlanmasına yönelik konferans kullanımların gerektirdiği akustik koşullarının elde edilmesi amaçlanmıştır. neri iyileştirme modelinde yapılan ve açıklanan modifikasyonlar dışında Cam Piramit'in hacim akustiğini ngrmek için yapılan simülasyon çalışmasındaki kabuller aynen iyileştirme önerisinin simülasyonunda da kabul edilmiştir. neri modeli için hedeflenen konferans salonuna yakın akustik koşullarını sağlayan akustik parametre değerleri hesaplanmıştır. EDT ve T30 değerleri 1,1 sn ve 1.3sn düzeylerine kadar azaltılmış olup, özellikle konuşma amaçlı meknlarda istenilen orta ve yüksek frekanslardaki eşzamanlı düşüş sağlanmıştır. LF 80 değerleri salonun orta kısımlarında oldukça düşük çıkması ve STI değerlerindeki artışın yeterli düzeylerde olmaması tekrar hacmin genişliği ve derinliği gibi parametrelerinin bir sonucu olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca 20 alıcı noktası için elde edilen sinyal tepki diyagramları ile akustik parametrelerle geometrik parametrelerin karşılaştırmalı analizi ile bu kadar büyük bir hacimde ideal akustik koşullarının doğal akustikle sağlanmasının gücü olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak çalışmada kullanılan hacim akustiği simülasyon yöntemi ile Antalya Cam Piramit'inin form, şekil ve malzemeye dayalı geometrik parametrelerinin hacmin akustiği üzerindeki etkileri araştırılmış ve yapılan tespitler doğrultusunda akustik performansını iyileştirmek için geliştirilen öneri model ile hedeflenen koşullar sağlanmıştır.

Türkiye’de bina tasarım ve yapım sürecinde ele alınan iç ortam konfor koşulları arasında akustik ile ilgili konulara genellikle gereken önem verilmediği için daha sonra farkına varılan yetersiz veya kötü kalitedeki akustik koşulların durumunu iyileştirmek güç olabilmektedir. Bu çalışma ile bir hacimde ideal akustik performans koşullarının sağlanması için belirleyici faktör olan tasarım parametrelerinin akustik parametrelerle etkileşimlerinin tasarım sürecinin çok erken aşamalarında ele alınmasının gerekliliği ve önemi belirtilmeye amaçlanmıştır.

EVALUATING THE ROOM ACOUSTICS OF ANTALYA GLASS PYRAMID BUILDING USING COMPUTER MODELLING TECHNIQUES

SUMMARY

The use of glass as a building material has gradually increased in variety during the latest years through the glazed curtain walls and roofs enveloping the buildings around us. Many factors must be taken into account and one of them is the acoustical performance requirements. However, because it is a very hard material with low elasticity it tends to transmit and reflect more sound than other building materials due to which it is a material with weak acoustical performance. Nowadays, although glass has gained an insulating property with lamination, it still continues to be a material of reflective property. Nevertheless, those who worked to understand the material have extensively exploited it and produced glass architecture which would be admired or discussed for years. In this sense, it is a celebration of manifestation rather than a method and the Antalya Glass Pyramid Building as one of the first glass buildings in Turkey built in 1997 is an example for this. Designed as a multi-purpose hall primarily for fair and congress use, it has a floor area of 2.500 m² covered by a 7.000 m² glazed pyramidal shaped roof comprising a room volume of 35.000 m³. In time, relying to some critics on the press describing the hall as highly reverberant, it has been decided to study its acoustics using computer modelling techniques. The subject of this study is to investigate the acoustical performance of the hall formed of the described large glass surfaces and identify the impact of the hall geometry on its acoustics.

In this study the ODEON room acoustics modelling program turned out to be a very efficient tool to calculate and analyze the room acoustic parameters of the Antalya Glass Pyramid using the 3D model of the building prepared in relevance to its as built architectural project.

The architecture and the transparency based design concept of the Antalya Glass Pyramid building have been described together with the acoustical performance of glass as a building material in the first chapter of this study.

The room acoustics evaluation of the Glass Pyramid building has been done with the comparative analysis of the acoustical parameters calculated by the computer modelling program and the design parameters affecting their performance that all have been defined in chapter two.

In chapter three, the basic theories and calculation principles used by the room acoustics modelling program have been identified together with the assignments made in the selection of materials to the surface geometries and the source and receivers location in the hall. The material assignments to the surfaces of the hall's geometry were done in compliance with the ones implemented in place in order to obtain close results to the actual acoustic conditions of the hall. The simulation has been carried out as the multi-

point response calculations of an omni point type of source and 20 receivers defined in 4 groups in the hall. The acoustical analysis of the hall has been done based on the mean values of the calculated acoustic parameters and their spatial variations at the 20 receivers at 1 kHz. The results obtained for T30 and EDT parameters of the hall are considerably high, which are far from the required values of a conference hall and more alike of a cathedral's acoustics. The reason for having such a reverberant space is the large volume which results in 14m^3 volume per seat in the hall. The 40 m width and 42 m depth measures relating to the design parameters of the hall's form have affected adversely the results obtained for the loudness (G), lateral energy fraction (LF80) and the speech transmission index (STI) acoustic parameters. In order to improve the conditions of the inadequately performing acoustic parameters a sound reinforcement system can be applied and although not used efficiently there is currently one present in the hall. However a sound reinforcement system in a reverberant room does not improve the problems and in fact makes it worse by adding more sound sources. If it is played loud enough it can overcome most of the noise, but not reverberance and also can cause other problems such as resonance in the building structure as it is the case with the Glass Pyramid. In light of the analysis and evaluations of the predicted acoustic parameters an improvement proposal has been developed in chapter four in which the volume of the hall has been modified according to the 7m^3 volume per seat recommended for multipurpose use.

In chapter four, the proposal model for improving the acoustics has been developed respectfully to the transparency concept of the building in which with the design of a suspended glass ceiling as a second shell the volume of the hall has been reduced to half. The side walls were rotated 5° inwards to the rear part of the hall in order to alter their parallel relationship. In order to prevent the occurrence of delayed reflections off the rear wall causing echoes on the front parts, its upper half has been treated with the RPG's BAD panels providing diffraction. The side walls were modelled again with demountable acoustic wall panels; however some diffusers such as the RPG's Flutterfree panels of reflective/diffusive characteristics were introduced to the upper part of side walls above 2.5 m and 50% of the front side walls beside the stage to promote loudness and intelligibility in the hall. It has been aimed to achieve the optimum natural acoustic conditions, performance requirements of multipurpose hall supporting primarily speech and then sound reinforced activities such as concerts with introducing some absorption and diffusion to the hall. Other than the improvement proposal modifications explained herby, the rest of the room set up parameters have been used just as if they were defined in the previous simulation. The simulation of the proposed modification has resulted successfully with the achievement of results close to the optimum required ones which were more appropriate for speech performance as it was intended. The EDT and T30 have been reduced to levels that varied between 1.1 s and 1.3 s and the sound decay rate in high and mid-frequencies were almost the same which is a required condition in halls designed for speech. The low LF80 values calculated for the central receiver groups in the hall and the inadequate rise in the STI values made it clear that radical changes would need to be done to the challenging width and depth dimensions of the hall to obtain the required performance. Moreover through the spatial variation analysis of the acoustical parameters with relevance to the geometric parameters it has been

determined that it would be difficult and almost impossible to obtain the ideal acoustic conditions in all over the 20 receivers with natural acoustics.

As a conclusion the impact the Antalya Glass Pyramid building's geometric parameters on the hall's acoustics has been investigated using room acoustics modelling techniques and in light of the findings in an improvement proposal has been developed through which the required conditions were achieved.

In Turkey, acoustics is one of the least concerned fields of indoor comfort conditions discussed at the design and implementation stages of a building project, the awareness of which comes with annoyance of bad performing acoustics conditions that might be hard to be improved afterwards. The aim of this study is to identify the importance of the acoustical considerations in the early stage of design through the analysis of the design parameters in relevance to the acoustical parameters in order to achieve the ideal acoustic performance conditions.

BÖLÜM 1: GİRİŞ

Cam tüm zamanlar için insan tarafından keşfedilmiş muhtemelen en çok dikkate değer malzemedir. Dünyada en bol bulunan mineralin eritilmesi ve soğutulmasıyla elde edilen bu şeffaf malzeme, kaya kadar sert ve kimyasal olarak o kadar tepkisizdir ki ondan yapılan haznelerin içinde neredeyse her şeyi muhafaza etmek mümkündür. Camın çanak çömlek yapımı dışında pencerelerde de kullanılabilecek bir malzeme olması fikri keşfinden 2000 yıl sonra ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni belki de o dönemlerde düz cam yapımının o kadar kolay olmaması ve ilk keşfedildiği yer olan Mezopotamya’da iklimin insanoğlundan şeffaflıkları olan sızdırmaz duvarlar yaratmasını gerektirmemesidir. Tüm bunara rağmen cam bir keşfedilmiş ki ondan sonra mimarlıkta halen daha araştırılan ve geliştirilen yeni kavramsal dillerin doğmasına neden olmuştur.

19. yüzyılın başlarında gün ışığının bina içine alınma çabası mükemmel sonuçlar doğurmuştur. Bu dönemden sonra karkas bina strüktürlerin gelişmesi ve ağır yığma duvarların yerine geçmesi pencere alanlarının büyüklüğünü de özgür kılmıştır. Binalar için daha büyük pencere açıklıklarının yapılabilirliğine olanak sağlayan kolon ve kirişten müteşekkil yapı sistemleri, 19. yüzyılda dökme ve dövme demir ile daha sonra çelik ve betonarmenin de gelişimiyle zirveye ulaşmıştır. Bunun nedeni o dönemde patlayan endüstriyel devrim ile mühendislik ve üretim tekniklerinde yapılan icatlar sonucunda bu malzemelerin seri üretimine geçilmiştir. 1830 yılında cam üreticileri daha düzgün kalınlıkta ve 1.0 x 1.3 metre boyutlarına kadar düz cam imalatına olanak sağlayan iyileştirilmiş ‘Silindir’ yöntemini kullanmaya başlamışlar. Bu üretim şekli camın seri üretimine geçilmesinin en erken yöntemidir ve 19 yüzyılda Joseph Paxton tarafından sergi binası olarak tasarlanan Crystal Palace’ ın hızlı bir şekilde inşasına olanak sağlamıştır. Crystal Palace form, malzeme, morfoloji ve seri üretime imkan veren yapım şekli açısından ondan sonraki gelecek elli ve ötesi yıllarda modern mimarinin gelişiminde bir emsal olarak görülmüştür.

20. yüzyılda metal ve camın sembolizmi iskelet strüktür üzerinde büyük cam yüzey kapamaları olmaktan çıktı ve cam kabuk olarak yeni bir ifade biçimi aldı. Bu kabuk,

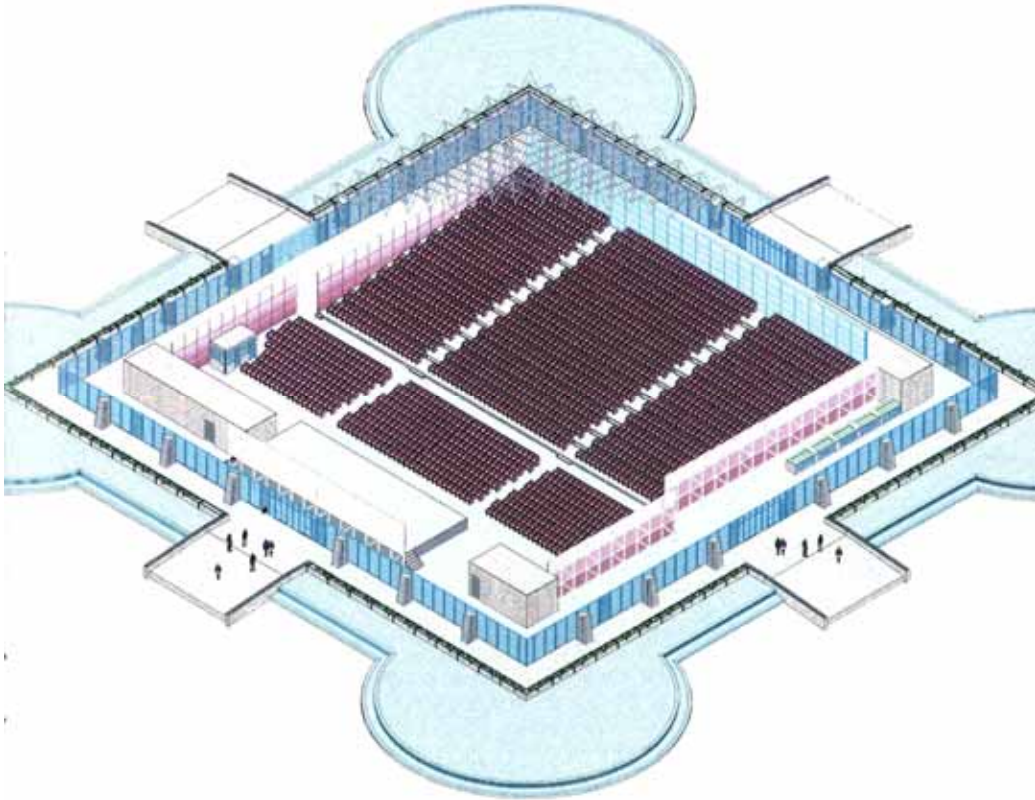
bina str kt r nden ayrık, düz ve mütemadi bir y zeydi, daha doğrusu cam giydirmeye cephenin ilk  ekliyd . Giydirmeye cephenin ilk uygulamaları olarak 20. yüzyılın ilk çeyreğinde Dessau Almanya’da Walter Gropius’un Bauhaus binasıdır. Camla yapılan hiçbir yenilik ve gelişme yeterli olmuyordu,       cam artık binaları giydiriyordu ve yerine geçtiği elemanların performansını da üstlenmesi gerekmektedir. Cam kullanım alanı arttıkça güvenliği için i  mukavemetinin de arttırılması gerekiyordu ve 1903 yılında ilk selülozlu lamine cam üretildi. Hafif iskelet strüktürlerin düşük ısı kütlesi ve tek kat camlı cephenin aldığı güneş enerjisi yükleri bina havalandırma yüklerini ve enerji tüketimini arttırdığı için

1950 yılında cam imalatı gittikçe daha karmaşık bir üretime dönüştü. Artan iç ortam konfor talebine karşılık güneş kontrolü sağlayan film kaplı camlar ile ısı yalıtımı sağlayan çok katmanlı cam panelleri geliştirilmiştir. Yirminci yüzyılın son çeyreğinde ortaya çıkan yeşil yapılanma ve sürdürülebilir yaşam kavramları bina tasarımı, bina servis sistemlerini ve özelikle de binanın dış kabuğunu oldukça etkilediler. Camın yapı malzemesi olarak performansının iyileştirilmesinde önemli rol oynayan çevresel faktörler arasında belki de en çok ihmal edilen konu ses yalıtımı ve gürültü kontrol yd . Camın ses yalıtımı açısından geliştirilmesine çaba gösterilmemesinin birinci nedeni diğer mühendislik alanlarında olduğu gibi enerji kontrolüne her daim daha büyük önem ve öncelik verilmesiydi. İkinci nedeniyse ses geçirme özelliği bakımından zayıf bir malzeme olmasıydı. Pazardaki günümüzün mimari camları gerekli konfor kriterlerini tamamen kar ılayamamasına rağmen birbirini ardına inşa edilen cam kaplama binaların sayı ve büyüklüklerine  a ırmamak gerekir. Zira kullanıcı ihtiyaçları ne olursa olsun 19. yüzyıldaki Crystal Palace’ dan günümüze değin cam ve  elik modern mimarının vazgeçilmez yapı malzemeleri olarak kabul edilmektedir [1].

Bu tez ile 1997 yılında Türkiye’de inşa edilmiş, gerek mimari konsepti gerek cam yüzey alanı büyüklüğüyle birçok konuda zorlayıcı niteliğe sahip Antalya Cam Piramiti’nin simülasyon yöntemiyle hacim akustiği yönünden değerlendirilmesi yapılmıştır. Bina kabuğu tümden cam kaplama olan piramit şeklindeki bu yapı gerektiğinde kongre ve sergi salonu olarak kullanılabilen çok amaçlı bir uygulamadır.

1.1 Antalya Cam Piramiti'nin Mimarisi

Mal sahibi Antalya Belediyesi 1996 yılında mimarlardan sergi kongre ve konser fonksiyonlarına cevap verebilecek, şehri temsil eden bir prestij yapısı istemiştir. Bu istek doğrultusunda Y. Müh. Mimar Levent Aksüt ve Y. Müh. Mimar Yaşar Marulyalı tarafından tasarlanan çelik konstrüksiyon üzeri cam giydirme cephe ile kaplanan piramit biçimli bina projesi beğeni kazanmıştır. Projenin çelik tasarımı ve uygulaması da aynı kişilerin kurduğu USKON Uzak Sistem Çelik İnşaat Firması tarafından yapılmıştır. Yapının şeffaf ve olabildiğince hafif bir strüktüre sahip olması, çevreyle uyumu, esnek kullanıma imkân vermesi mimari konseptin ana ilkeleridir. 1996 yılında yapının inşaatına başlanmış ve 1997 yılı Eylül ayında kullanıma açılmıştır. Yaklaşık 50 x 50 metre bir alana oturan yapı, bodrum ve zemin kat olmak üzere iki katlıdır. Çalışmanın konusu olan Toros Salonu Antalya Cam Piramiti'nin zemin katıdır ve tüm alanı kapsamaktadır. Şekil 1.1'de görüldüğü gibi mekanın içinde herhangi bir kolon bulunmamaktadır ve üzeri renkli ısıcamlı piramit biçimli uzak çatı ile örtülmüştür.



Şekil 1.1 Antalya Cam Piramiti'nin İzometrik Perspektifi

Uzay sistem üzerine uygulanan strüktürel silikon cam giydirme çatısı 1.3 x 1.5 metrelik modülasyon ile yapılmıştır. Toplam 7000 m² cam kaplama yüzeyi olan yapının cam panelleri Trakya Cam tarafından üretilmiştir. Bu kadar büyük bir cam alanın ışık, ısı ve gürültü gibi farklı çevresel faktörlerin kontrolünü sağlayabilmek ısı cam kullanılmıştır.

Kongre ve konser esnasında 2500 kişiyi alabilecek kapasiteye sahip salonun dinleyici alanı teleskopik tribünler ile düzenlenmiştir. Performans alanının dört bir tarafı gerektiğinde sökülebilen akustik duvar panelleri ile çevrilmiştir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 Antalya Cam Piramiti'nin İç Görünümü

Yapı fuar, kongre ve konser için gerekli tüm görsel ve işitsel, enformasyon, ışıklandırma, yangın ve güvenlik donanımlarıyla tesis edilmiştir. Yapının ısı kontrolü mekanik olarak yazın sıcaklık 24°C ayarlanmış şekilde yapılmaktadır. Ancak Antalya Belediyesi ile yapılan görüşmede günümüzün iklim koşullarında yazın mekanın iklimlendirme maliyetleri gelirlerin çok üstesine çıktığı için, yapı genellikle sonbahar ile ilk bahar arasında kullanıma daha uygun olduğu bilgisi alınmıştır. Hal böyleyken 2500 dinleyiciyi alacak büyüklükte, cam ve çelikle tasarlanan 35,000m³ hacimli bir mekanın kongre için kullanıldığında hacim akustiğinin konuşma anlaşılabilirliğini açısından performansını sorgulama ihtiyacı duyulmaktadır.

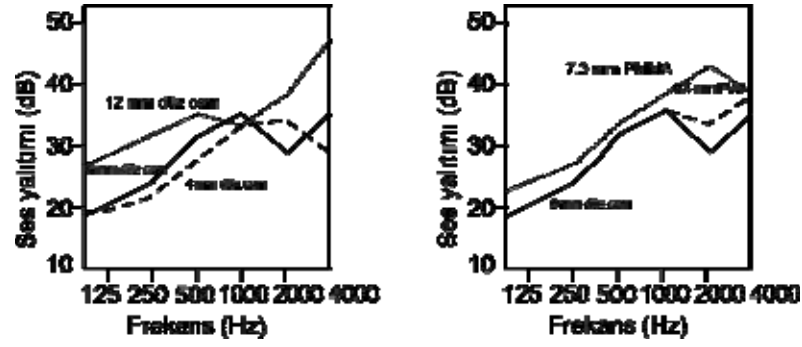
Bu çalışmanın amacı tamamen cam kaplama olan ve birbirinden farklı akustik ihtiyaçlara sahip iki işleve hizmet eden bir mekanın hacim akustiği bakımından incelenmesidir. Çalışmanın konusu olan 35.000m³ hacimli mekanın akustik değerlendirilmesi, teknik nedenlerden dolayı ölçüm yöntemiyle yapılamadığı için simülasyon yöntemi kullanılmıştır. Hacmin nesnel akustik parametrelerinin hesaplamaları ODEON Ver. 7.0 bilgisayar programıyla yapılmıştır. Elde edilen veriler nesnel akustik parametrelerin optimum değerleri ve tasarım parametreleriyle karşılaştırılmıştır. Yapılan değerlendirme sonucunda mekanın hacim akustiğinin iyileştirilmesine yönelik öneri geliştirilmiştir. [12]

1.2 Yapı Malzemesi Olarak Camın Akustik Performansı

Duvar ve cam gibi yapı elemanlarından ses geçişi doğrudan kütle kanununa, malzemenin sertliğine ve enerji sönmülendirme özelliğine bağlıdır. Basit bir biçimde anlatmak gerekirse malzeme ne kadar ağır ve esnek olursa ses geçişini o kadar iyi engellemektedir. Hâlbuki cam esas itibarıyla hafif ve çok sert olduğundan diğer yapı malzemelerinden daha çok ses geçirmeye eğilimlidir. [5]

Tek camlar başlıca iki tip rezonans sergilemektedirler. Biri camın boyutuna bağlı ve alçak frekanslarda meydana gelmekte, diğeri ise camın kalınlığına bağlı ve orta ile yüksek frekanslarda oluşmaktadır. Frekans ile kalınlığın arasında ters orantı olduğu için, camın kalınlığına bağlı ikinci türden olan rezonans daha hassastır, buna göre Şekil 1.3 (a)'da gösterilen grafikte mesela aynı boyutlarda olan 12 mm düz cam 1 kHz'te oysa 6 mm düz cam 2 kHz'te rezonansa girmekte.

Bu karakteristik rezonansları bastırmanın bir yolu gelen ses enerjisini emerek daha az geçişini sağlayacak plastik esaslı elastik katmanları iki veya daha fazla camın arasına yerleştirip lamine etmektir. Rezonans frekanslarda ses yalıtımındaki kayıpları azaltmak için en sık kullanılan laminasyon malzemesi polyvinyl butyral'dir (PVB). Polymethyl methacrylates (PMMA) gibi diğer malzemeler daha yumuşak oldukları için ses yalıtımındaki kayıpları daha aza indirmekle kalmayıp rezonans frekansları da daha az zahmetli oldukları yüksek değerlere taşıyabilmekteler. (Bkz. Şekil 1.3 (b) [2]



Şekil 1.3 (a) Cam kalınlıkları ile rezonans frekansların ilişkisi (b) Lamine camın ses yalıtımı skalası

Camların ses geçiş sınıfı değerleri (STC) ile dıştan içe olan ses geçiş sınıfı değerlerinin (OITC) sonuçları deneyden deneye laboratuardan laboratuara üç önemli nedenden dolayı farklılık gösterebilirler;

- sıcaklık etkisi,
- boyut farklılıkları ve
- kurulumun uygulanış şekli.

Sıcaklık lamine cam panellerinin ses geçiş kaybı performansını etkilemektedir. Çalışmalar camın sıcaklığı 15.6 ile 32 C aralığında seyrettiğinde ses geçiş sınıfı STC ve OITC değerlerinin sıcaklığın derecesine göre 3 ila 5 birim olarak artabileceğini göstermektedir. Lamine cam içinde bulunan elastik katmanın yalıtım özelliği yüksek sıcaklıklarda arttığı için, sıcak iklimi olan yerlerdeki pencere ve giydirme cephelerinde kullanılıncaya daha da iyi performans göstermektedir.

Camın çevresinde kullanılan tutucular ve izolasyon malzemeleri strüktürün sesi sönümlendirmeme özelliğini arttırabilir, ancak cam numunesinin boyutu ile camın çerçeveye oranı ses geçiş kaybını önemli derecede etkilemektedir. Büyük cam paneller küçüklerinden daha çok titreşebilirler ve bu da camın doğal frekansındaki ses geçiş kaybında ani inişlere neden olmakta. Ses geçiş sınıfı (STC) değeri yüksek bir cam konfigürasyonu belirtilmiş ise istenilen performansın elde edilebilmesi için cephe çerçeve sistemi de gözden geçirilmeli ve gerekli olduğu takdirde iyileştirilmeli.

Cam üreticilerin lamine cam için sağladıkları akustik veriler laboratuvar ortamında öte beri desteklerle kurulmuş sadece camdan ibaret prototiplerin ölçümünden elde edilmiş sonuçlardır. Bu veriler teknik şartnamelerde kullanılmadan önce tizlikle incelenmelidirler, çünkü test sonuçları herhangi bir çerçeveli sisteminde yer

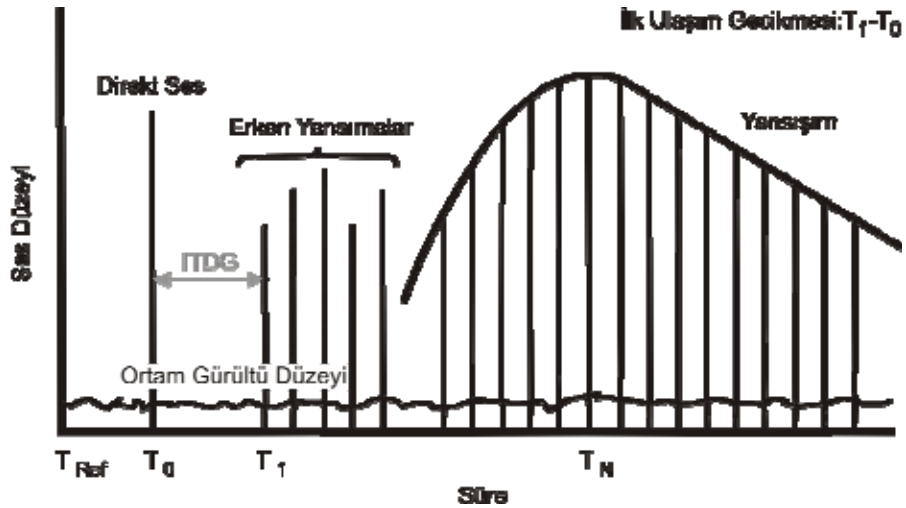
aldıklarında performanslarının önemli derecede düştüğünü göstermektedir. Standart giydirme cephelerde bu düşüş 2 ile 3 dB iken daha yüksek performanslı cam giydirme cephe ve çatılar için bu 6 ila 8 dB olarak değişmektedir.

Lamine cam kullanımı dışında ısı cam panellerinin iki cam yüzey arasındaki hava boşluğunu arttırarak da önemli ölçüde ses geçiş kaybı sağlamak mümkün olabilir, ancak standart dışı özel imalatlara neden olduğu için maliyet ve bakım zorluğundan dolayı pek tercih edilmemektedir. Bu yüzden akustik enerjiyi azaltmak için lamine cam kullanımı daha uygun maliyetli bir çözümdür. Ancak cam alanı ne kadar artarsa, içinden geçen akustik enerji miktarı da o kadar artar. [11]

Gerek teknik literatürde gerekse üreticilerin sağladıkları araştırma ve geliştirme verilerine bakılınca görülüyor ki camın akustik performansını geliştirmeye yönelik günümüze kadar yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak ses geçiş kaybına (STC) dayalı yalıtım iyileştirmeleridir. Ancak cam günümüzde gerek bina cepheleri dolayısıyla gerekse iç bölücü duvarlar vasıtasıyla yaşam alanlarımızdaki yaygın kullanımıyla, acaba hacim akustiğinin performansını da zorlaştırmıyor mu? Hacim akustiği denince hemen akla malzemenin ses emicilik kapasitesi gelir, ancak cam için emicilikten söz etmek güç, oldukça yansıtıcı demek daha doğru olur. Bunun nedeni ise fiziksel özellikleri itibarıyla camın yapı malzemeleri arasında çelikten sonra en sert ve enerji sönmülendirme katsayısı en düşük malzeme olmasıdır. Cam lamine olduktan sonra var denecek kadar az miktarda emicilik özelliği kazanmakta, ancak hala yansıtıcı olma özelliği baskındır. Günümüzde lamine cam, her ne kadar emiciliği az ve alçak frekanslardaki ses yalıtım değeri düşükse de yüksek frekanslardaki iyi yalıtım özelliği nedeni ile yapı malzemesi olarak camın akustik performans bakımından geldiği son noktadır.

BÖLÜM 2: HACİM AKUSTİĞİ DEĞERLENDİRİLMELERİNDE KULLANILAN AKUSTİK VE TASARIM PARAMETRELERİ

Antalya Cam Piramiti fuar ve kongre gibi farklı akustik ihtiyaçları olan çok amaçlı kullanımlar için tasarlanmış bir binadır. Binanın büyüklüğü ve geometrisini oluşturan yansıtıcı özellikteki yüzeyleri ele alındığında sözkonusu hacimde sağlanması gereken en güç akustik koşullar konuşmanın performansı ile ilgili olanlardır. Konuşmanın anlaşılabilirliği, konuşma amaçlı kullanılan hacimlerin performansını tanımlayan en belirleyici özneliktir. Kapalı hacimlerde sinyal sesinin gürültüye oranı (S/N ratio) ve hacmin sinyal tepkisi konuşma anlaşılabilirliğinin iki önemli belirteçidir. Bir dinleyici bir ses kaynağından yayılan sesi, önce direkt ses ve onu takip eden münferit erken yansımalar ile dalga gibi yükselip yansıma alanını oluşturan ve sonunda hacmin özelliğine bağlı bir oranla sönen birleşmiş yansılardan oluşan hızlı bir ses dizini olarak kavramaktadır. Bir hacmin ideal sinyal tepkisi Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



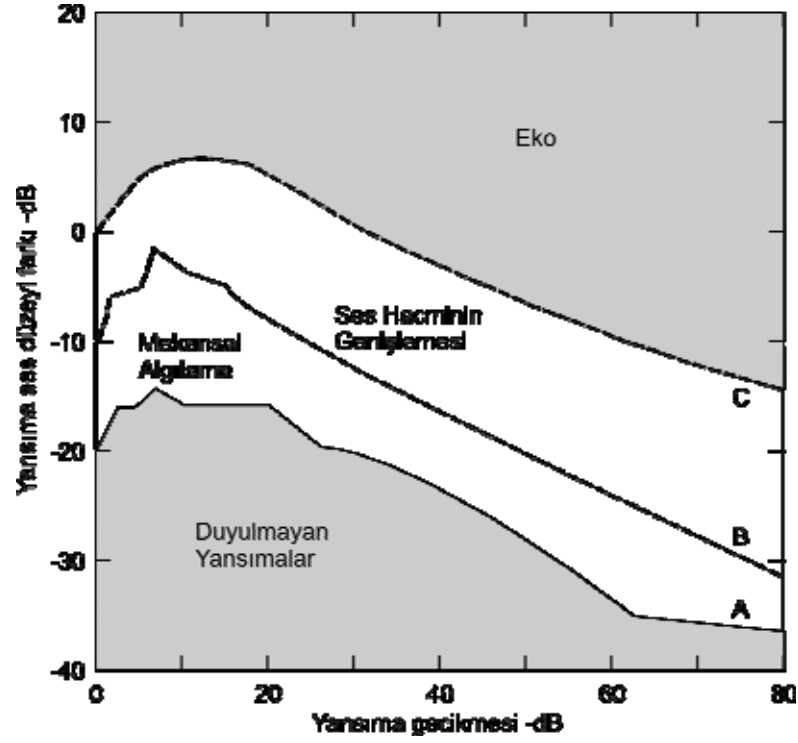
Şekil 2.1 Bir sinyale karşı hacmin oluşturduğu ideal akustik tepki diyagramı [6].

Sinyal tepki diyagramında, üç geçici bölge birbirinden ayrılmış olarak gösterilse de patikte bu ayrımlar o kadar belirgin değildir. Erken yansımalar ile yansıma bölgesi birleşmiş olabilir. Eğer uzun süre gecikmiş yansımalar mevcut ise sönüm bölgesinde belirebilirler. Eğer alıcı ses kaynağından oldukça uzakta ise yansıma alanındaki ses

direkt sestten daha yüksek gelebilir. Direkt sesin ulaşımı ile ilk büyük yansıma arasında geçen süre direkt sesin alıcıya ulaşma süresidir (initial time delay gap-ITDG). Eğer bu süre yeterince kısa ise, erken yansımalar, sesin genişlemesine, ses düzeyinin rahatsızlık vermeden yükselmesine ve konuşma anlaşılabilirliğinin artmasına katkıda bulunacak fakat bu süre çok uzun ise, anlaşılabilirliğin azalmasına neden olacaktır.

Arka plan gürültüsü ile birlikte uzun süren gecikmiş yansımalar ve sürekli yansıım hali anlaşılabilirliği azaltmaktadır. Bir hacimde bir takım sözcüklerin telaffuz edilmesiyle duvarlardan veya başka yüzeylerden gelen yansımalar, ya artan arka plan gürültüsünün bir parçası olarak ya da uzun süren gecikmiş münferit yansımalar olarak, konuşma anlaşılabilirliğini olumsuz etkileyecektir. Böylelikle, konuşmanın kendi yansıım alanı da gürültüyü maskeleyen bir kaynağa dönüşebilmektedir [6].

Akustik kusurların varlığı hacim içerisindeki yetersiz anlaşılabilirlik ve genel rahatsızlık durumlarına katkıda bulunabilirler. Uzun süren çoğul gecikmiş yansımalar, ses odaklanması, ses renkliliği ve hacim rezonansları gibi alçak frekans olayları ile bölgesel olarak oluşan yüksek düzeydeki ses alanları hacim içerisinde meydana gelen başlıca akustik kusurlardır. Bu kusurların tümü her hacimde önemli olmayabilir hatta bazıları hacmin başlıca kullanımını etkilemeden de orada bulunabilirler. Hacimlerde iyi anlaşılabilirliği azaltan ve önlenmesi gereken tekil veya çoğul yansımalarla bağlantılı bir dizi olay bulunmaktadır. Bunlar uzun gecikmiş yansımaları, eko ve titreşimi (flutter) kapsamaktadır. Yeteri kadar güçlü olan bir sesin direkt ses alanından sonra ve belirli bir zaman diliminden daha uzun sürede ulaşması durumunda ekolar oluşmaktadır. Bir salonun arka duvarından gelen tek bir yansıma da buna neden olabilir, özellikle duvar şekli konkav ise. Şekil 2.2 ekosuz bir ortamda farklı büyüklük ve gecikme zamanları için simülasyonu yapılan yansımaların etkilerini göstermektedir. B eğrisinin altında gerçekleşen ekolar mekansal algılamayı artırırken, A eğrisinin altında yansıyan sesler ise duyulabilirliğini kaybetmiştir. C eğrisinin üzerinde gerçekleşen yansımalar ise eko olarak algılanmaktadır. Daha dakik olmak gerekirse konuşma anlaşılabilirliği için önemli olan ilk 60 ms içerisindeki yansılardan sonra gelen gecikmiş yansımaların direkt sese göre düzey farkı -10 db büyük ise bu yansımalar eko olarak algılanacaktır. Müzik için bu eşik 80 ms'dir [7].



Şekil 2.2 Konuşma yansımalarının algılanması [7].

Eko ve çınlama aynı şey değildir. Eko, belirgin bir şekilde algılanan orijinal sesin tekrarıdır, hâlbuki çınlama çoğul yansılardan dolayı sesin uzamasıdır ve müzik için genellikle yararlıdır. Uzun gecikmiş yansımalar ekolar gibidir, fakat gecikme zamanları biraz daha kısadır. Ayrı sesler olarak algılanmasalar da orijinal sesin anlaşılmasında bulanıklığa neden olmaktadır. Titreşimli ekolar (flutter echoes) paralel duvarlar, konkav veya ters “V” şekilli yüzeyler arasında oluşan ısrarlı yerel yansıma sesleridir [6].

Çok amaçlı kullanılan hacimlerde akustik performansın değerlendirilmesinde konuşma anlaşılabilirliği kadar önemli başka akustik koşullar ve onların belirlenmesinde en az çınlama süresi kadar önemli başka parametreler de söz konusudur. Antalya Cam Piramiti’nin hacim akustiğinin bilgisayar simülasyon yöntemiyle değerlendirilme çalışması aşağıda belirtilen parametreler çerçevesinde yapılmıştır:

- Hacimlerin akustik özelliklerini belirten nesnel akustik parametreler
- Hacimlerin akustik özelliklerini belirten öznel akustik parametreler
- Hacimlerde sesin davranışını belirleyen form, alan, yüzey ve malzemeler gibi mimari tasarım (geometrik) parametreler

2.1 Nesnel Akustik Parametreler

Bu bölümde hacim akustiği performans değerlendirilmelerinde belirteç kabul edilen ve bu çalışmada simülasyon yöntemiyle hesaplanacak olan nesnel akustik parametreler açıklanmıştır.

2.1.1 Çınlama Süresi (Reverberation Time- T)

Hacim akustiğinde ses enerjisindeki düşüş oranının önemi asırlardır bilinmesine rağmen, çınlama süresi ilk defa yüz yıl önce Harvard Üniversitesi'nde fizik profesörü Wallace Clement Sabine tarafından nesnel bir temele oturtulmuştur. Sabine bir sesin başlangıç değerinden 60 dB azalması için geçen düşüş süresini çınlama süresi (T) olarak tanımlamıştır.

Farklı tipteki salonlarda yaptığı kapsamlı ölçümler sonucunda, Sabine çınlama süresi ile hacim parametreleri arasındaki ilişkiyi aşağıdaki (2.1) bağıntısı ile ortaya koymuştur:

$$T = 0.161 \frac{V}{A} \quad (2.1)$$

T	$:[s]$	<i>Çınlama süresi</i>
V	$:[m^3]$	<i>Hacim</i>
A	$:[sabin]$	<i>Hacmin toplam yutuculuğu</i>

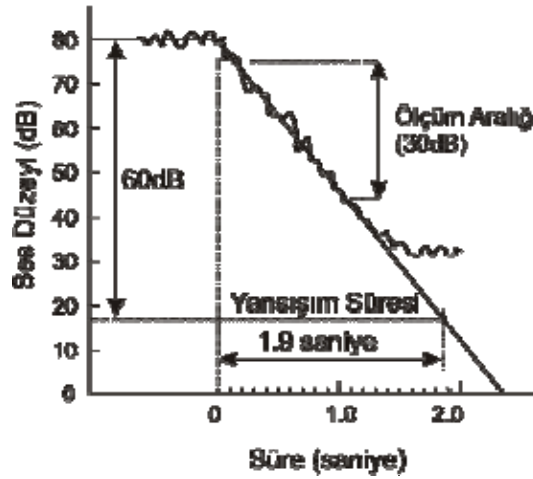
Akustik literatüründe Sabine bağıntısı olarak bilinen bu eşitlik, çınlama süresinin sadece şu iki hacim parametresinin fonksiyonu olduğunu belirtmektedir: hacim ve hacmin yutuculuğu.

Sabine bağıntısı için seçilen 60 dB'lik düşüşün tamamıyla keyfi seçilmiş bir değer olduğunu belirtmek gerekir. Bunun nedeni Sabine zamanında modern ölçüm aletlerinin bulunmamasıdır. Sabine ses üretmek için organ tüplerini, sesin tamamen sönmesini ölçmek için ise kulaklarıyla bir kronometreyi kullanmıştır. Sabine deneylerinde 60 dB, organ tüpünün oluşturduğu ilk ses düzeyi ile sesin hacimde duyulmaz hale geldiği düzeyin farkını belirtmektedir. Ancak günümüzde pratikte arka plan gürültüsünün üzerine çıkacak 60 dB'lik bir ses düzeyinin üretilmesi zor olduğundan, çınlama süresi ses kaynağının susmasından sonraki -5 dB ile -35 dB arasındaki düşüş için geçen sürenin 2 faktörü ile çarpımı olan (T30) olarak

ölçülmekte veya hesaplanmaktadır (Şekil 2.3). T30 değeri çınlama süresinin asıl tanımı olan 60 dB’lik düşüş için geçen süre ile kıyaslanabilir olabilmesi için 2 faktörü ile çarpılarak T60 cinsine dönüştürülerek ele alınmaktadır ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$T30 = t_{30} \times 2 \quad (2.2)$$

t_{30} [s]: Sesin 30 dB’lik azalması için geçen süre



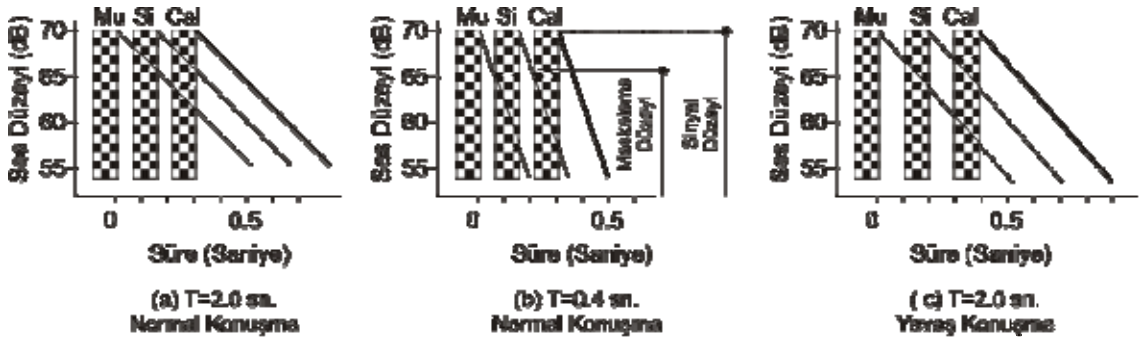
Şekil 2.3 Örnek bir düşüş ile T60 ve T30 çınlama sürelerinin açıklanması [8].

Oldukça uzun çınlama sürelerinin olumsuz etkilerini anlamamanın en kolay yolu onları konuşma anlaşılabilirliği ile ilişkilendirerek incelemektir. Direkt sesi güçlendirmeyen bir ses enerjisi, konuşma için maskeleme sesi etkisini göstererek konuşma anlaşılabilirliğinin azalmasına neden olmaktadır [9],[10].

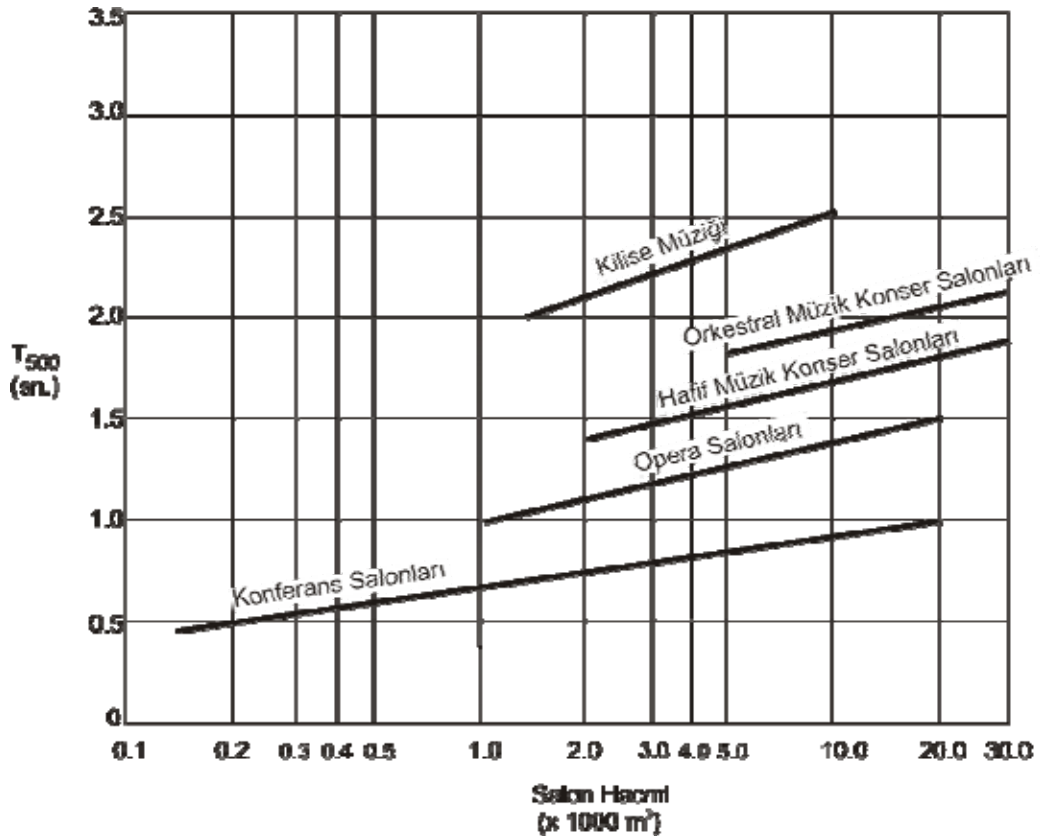
Çınlamanın konuşma anlaşılabilirliğini maskeleme etkisi

Tipik bir konuşma esnasında bir hecenin sesi düşüşe geçtiği sırada bir sonraki heceyi de maskeleme ve örtme eğilimindedir. Üç heceli ‘musical’ sözcüğünün 2 farklı odada söylendiğinde oluşan maskeleme etkisi Şekil 2.4’te gösterilmiştir; odalardan birinin çınlama süresi $T= 2.0$ sn Şekil 2.4 (a), diğerinin ise $T= 0.4$ sn Şekil 2.4 (b). Her hecenin aynı ses düzeyinde telaffuz edildiğini varsayarak Şekil 2.3 (a)’da ‘mu’ hecesinin ‘si’ hecesi söylenmeden 69 dB düzeyine kadar düştüğü görülmektedir. Bu durumda maskeleme sesi 69 dB olarak ilk sinyal düzeyi olan 70 dB’in sadece 1 dB altındadır. Halbuki Şekil 2.4 (b)’de maskeleme düzeyinin 64 dB’e kadar düştüğü görülmektedir. Bunun sonucunda konuşmanın anlaşılabilirliği 0.4 sn çınlama süresi olan hacimde, 2.0 sn çınlama süresi olan hacimden daha yüksek olacaktır.

Maskeleme etkisi aynı zamanda bir konuşmacının neden yavaş konuşması gerektiğini de açıklamaktadır. Yavaş konuşmanın etkisini gösteren Şekil 2.4 (c) ile (a) profili kıyaslandığında hecelerin arasındaki duraklamaların hecelerin birbiriyle girişimini ve maskeleme düzeyini azalttığı anlaşılmaktadır. Ancak daha uzun duraklamalar konuşmanın doğallığını bozarak dinleyici için gereksiz gerginliğe neden olmaktadır [10].



Şekil 2.4 Çınlamanın konuşma anlaşılabilirliği üzerindeki maskeleme etkisi [10].



Şekil 2.5 Farklı kullanımlar için 500 Hz'te önerilen optimum çınlama süreleri [10].

Konuşma Amaçlı Hacimler için Optimum Çınlama Süreleri

Yukarıdaki karşılaştırmalar konuşmanın anlaşılabilirliği için çınlama süresinin ne kadar kısa ise o kadar iyi olduğunu göstermektedir. Kısa çınlama süresi konuşmanın bu bölümün devamında açıklanan belirginlik (definition) ve netlik (clarity) niteliklerini de arttırmaktadır. Ancak bu çınlamanın tamamen yok edilmesi gerektiği anlamına gelmemelidir, çünkü çınlama konuşma ile iletişimin mümkün olabileceği mesafe aralığını arttırmaktadır. Başka bir deyişle, konuşmanın anlaşılabilir düzeyde gerçekleştirilebilmesi için eksik veya yetersiz çınlama, hacmin büyüklüğünü kısıtlamaktadır. Böylelikle konuşma amaçlı hacimler için optimum çınlama süresi aslında, yüksek çınlama nedeniyle konuşma anlaşılabilirliğin kaybolması ile düşük çınlama dolayısıyla ses düzeyinin kaybolması arasındaki orta yoldur. Müzikle mukayese edildiğinde, konuşma için kullanılan hacimlerin daha kısa çınlama sürelerine ihtiyaçları vardır. Küçük bir oda için 0.5 sn uygun iken, konferans veya toplantı salonlarında hacim büyüdüğünden ve dinleyici ile konuşmacı arasındaki mesafe arttığı için, sesin güçlendirilmesi gerekir. Sonuçta daha uzun çınlama sürelerine ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 2.5).

Alçak Frekanslarda Çınlamanın Arttırılması

Bütün frekans aralıklarında çınlama süresinin mümkün olduğunca sabit olması gerekmektedir. Ancak insan kulağının alçak frekanslara yeterince hassas olmamasından dolayı, alçak frekans aralıklarında (125 Hz ve 250 Hz) daha fazla yansımış seslerin sağlanması ile çınlamanın arttırılması istenilmektedir. Konuşma salonları için 125 Hz’te %30, 250 Hz için ise %15’lik bir çınlama süresi artışı tavsiye edilmektedir.

$$\text{Optimum } T_{125} = (1.3) \times \text{Optimum } T_{500} \quad (2.3)$$

$$\text{Optimum } T_{250} = (1.15) \times \text{Optimum } T_{500} \quad (2.3a)$$

Ancak alçak frekanslardaki çınlamanın artması, bas seslerin maskelenme etkisini de arttırdığı için bazı uzmanlar tarafından tercih edilmeyen bir durumdur [10].

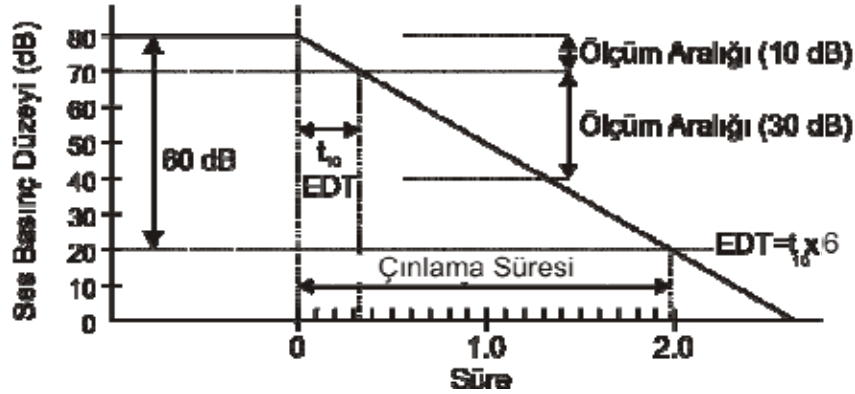
2.1.2 Erken Düşme Süresi (Early Decay Time- EDT)

Hacim akustiğinde iki tür çınlama süresi hesaplanmakta veya ölçülmektedir, Birincisi bölüm 2.1.1’de açıklanan çınlama süresidir (T), ikincisi ise ses kaynağının susmasından sonraki ilk 10 dB’lik düşüşü için geçen sürenin 6 faktörü ile çarpımı

olan ve Şekil 2.6’da verilen erken düşme süresidir (EDT). EDT değeri çınlama süresinin asıl tanımı olan 60 dB’lik düşüş için geçen süre ile kıyaslanabilir olabilmesi için 6 faktörü ile çarpılarak T60 cinsine dönüştürülerek ele alınmaktadır ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır [9].

$$EDT = t_{10} \times 6 \quad (2.4)$$

t_{10} [s]: Sesin ilk 10 dB’lik azalması için geçen süre



Şekil 2.6 Düşüş eğrisi üzerinde “EDT” ve “T” nin belirlenmesi [8].

EDT birkaç erken izole yansımadan meydana gelirken, T çok sayıdaki yansılardan oluşmaktadır. EDT’yi oluşturan erken yansımalar hacmin tanımlanabilir yüzeylerinden geldikleri için, hacim geometrisinin hacim akustiğinin üzerindeki etkilerinin araştırılmasına olanak sağlamaktadır. Öte yandan T , nerdeyse tüm hacim yüzeylerinden gelen yansılardan oluştuğu için hacim geometrisinden bağımsızdır. Bu nedenle T değerleri fiziksel olarak önemliyken, EDT değerleri öznel olarak algılanan yansımışlık (liveness-reverberance) ile daha yakında ilgilidir. Ancak tüm bunlar düşüşün son kısmının tamamıyla önemli olmadığı anlamına gelmemelidir. Tam aksine düşüşün yansıma (son) kısmı müziğe canlılık (reverberance) hissi vermektedir. Kısa EDT netlik (clarity- bu bölümün ileri kısımlarında açıklanan), uzun RT ise müziğe canlılık kazandırmaktadır. Uzun EDT değerleri ise bir hacimde canlılığın (reverberance) artmasına ve sesin açıklığının (clarity) düşmesinden dolayı anlaşılabilirliğin azalmasına neden olmaktadır [8], [10].

Ses düşüşün tamamen lineer olduğu yüksek dereceden yayınlık bir mekânda EDT ve T30 değerleri hemen hemen aynı olmaktadır. Kısaca, EDT ve T arasındaki uyuma veya uyumsuzluk tasarımın yayınlık mı yöneltilmiş mi ses dağılımı sağladığının

belirtisidir. Oldukça yaygın ses alanına sahip salonlarda yapılan ölçümlerde EDT ve T arasındaki uyuşmanın çok iyi olduğu, fakat dinleyici alanına birçok sayıda erken yansımalar yönelten salonlarda, EDT değerlerinin T değerlerinden önemli derecede düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni yansıma yöneltici tasarımlarda, birçok yüzeyin oldukça yutucu olan dinleyici alanına yansımalar yöneltecek şekilde yönlendirilmiş olmasından dolayı sesin düşüşünde gecikmiş olan yansıma (reverberant) kısmına daha az enerji kalmasıdır [11]. Ayrıca bir mekânda çift eğrili düşüş söz konusu değilse EDT ve T değerleri de birbirine hemen hemen benzer olmaktadır. Ancak öznel akustik bakımından ses düşüşün erken kısmı daha önemli olduğu için, birçok konser salonunda yapılan ölçümlerle EDT değerlerinin T değerlerinden %10 daha büyük olduğu tespit edilmiştir [10].

2.1.3 Sesin Yüksekliği (Strength – Loudness - G)

Akustik olarak, ses yüksekliği bir hacmin içerisindeki kaynaktan dolayı oluşan ses basınç düzeyinin, yansısız bir odada hacim içerisindeki ses kaynağına eşdeğer bir kaynaktan 10 m uzaklıkta ölçülen ses basıncına rölatif olarak bulunan değerdir ve aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmektedir [8]:

$$G = 10 \log \left[\frac{\int_0^\infty p^2(t) dt}{\int_0^\infty p_A^2(t) dt} \right] \quad (2.5)$$

G [dB]: Ses yüksekliği

p^2 [dB]: Hacmin sinyal tepkisinden elde edilen ses basıncın karesi

$p_A^2(t)$ [Pa]: Yansısız bir odada hacim içerisindeki ses kaynağına eşdeğer bir kaynağın 10m uzağında ölçülen ses basıncı

Ses yüksekliği (G) akustik parametresini üç tasarım faktörü etkilemektedir:

- Dinleyicinin sahneye olan uzaklığı
- Dinleyici alanına erken ses enerjisi yansıtacak yüzeylerin bulunması
- Hacmin büyüklüğü ile orta frekanslardaki çınlama süresi

Bir müzik aletinden çıkıp dinleyiciye ulaşan ilk sese direkt ses olarak kabul edilmektedir ve önden arkaya doğru salon boyunca ilerledikçe yüksekliği azalmaktadır. Salon derinleştikçe, ses yüksekliğindeki (G) azalım da artmaktadır.

Ses yüksekliğindeki bu düşüşe engel olmak için tavan ve duvarlar dinleyici alanına erken ses enerjisi yansıtacak özel asma panellerle düzenlenmektedir. Bu yansımaların etkili olabilmeleri için direkt sesin gelişinden sonraki ilk 50 ile 80 msn içerisinde dinleyiciye ulaşmalıdır.

Ses yüksekliğini etkileye üçüncü unsur çınlama süresinin salon hacmine oranıdır. Bu durumda ses yüksekliği (G) parametresinin:

- Direkt sesin gücünden ve
- Çınlayan sesin gücünden oluştuğu anlamına gelmektedir.

Direkt ses salon hacminin bir fonksiyonudur, halbuki çınlayan ses çınlama süresine, daha doğrusu EDT'ye bağlıdır. Buna göre ses yüksekliği salon hacmiyle ters orantılıdır, çünkü salon hacmi küçüldükçe sesin yüksekliği artmaktadır. EDT parametresiyle ise doğru orantılıdır, yani EDT değerleri büyüdükçe, yansıyan sesin gücü artacağından dolayı, ses yüksekliği (G) değerleri de yükselecektir. Bir salonda esas ses yutucu yüzey dinleyici alanıdır ve çok sayıda koltuk ile yeterli çınlama süresine ihtiyaç duyulduğu durumlarda salon hacminin büyümesi kaçınılmazdır. Diğer yandan yeterli düzeydeki bir ses yüksekliği ancak kişi başına daha fazla ses enerjisi sağlanırsa elde edilebilir, bu da dinleyici alanının ve dolayısıyla hacmin de küçülmesi anlamına gelmektedir. Daha da açık olmak gerekirse ancak yanal boyutlar makul derecede küçük tutulduğu sürece erken yansımalar güçlü olup ses yüksekliğini arttıracaktır. Böyle bir durumda ideal akustik koşulları sağlanması için dinleyici alanın büyüklüğü mümkün olduğu kadar kısıtlandırılmalıdır [9].

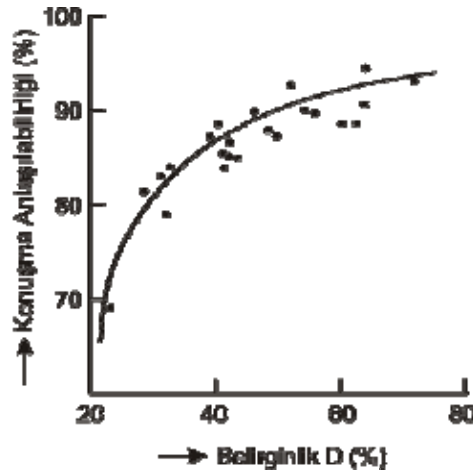
2.1.4 Belirginlik (Definition-D50)

Thiele'nin 1953 yılında ortaya koyduğu ve bir hacimdeki kaynak ile alıcının sinyal tepkisinden ölçülen erken enerjinin oranı (early energy fraction) veya konuşmanın belirginliği (Definition-D50) parametresi konuşmanın anlaşılabilirliği ile ilgili kullanılan en eski nesnel akustik parametrelerdendir. Konuşma sesinin ortalama süresi 70 msn olup anlaşılabilirlik ile ilgili ölçümlerde erken ses için 50 ile 80 msn arasında süreler kullanılmaktadır. Bu durumda konuşmanın belirginliği parametresi kısa süren bir ses sinyalinde ölçülen ilk 50 ms'lik zaman diliminde alıcıya ulaşan erken enerjinin toplam ses enerjisine oranı olarak tanımlanmaktadır ve aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmektedir:

$$D50 = \frac{\int_0^{0.05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.6)$$

D50 :[-] *Belirginlik*

Konuşmanın belirginliği (D50) bir parametre olarak seçilmesinin altındaki neden konuşmanın anlaşılabilirliği ile yakın ilişkisine dayanmamaktadır, çünkü anlaşılabilirlik ile daha iyi ilişkilendirilmiş başka parametreler de bulunmaktadır. Ancak kavramsal olarak daha karmaşık oldukları için bu parametreler değerlerini temel mimari detaylardan yola çıkarak öngörmek neredeyse imkânsız kabul edilmektedir. Hâlbuki D50 parametresi konuşma anlaşılabilirliğini öngörme aracı olarak kullanılabilme avantajı bulunmaktadır ve diğer parametrelerden daha kolay ölçülebilmektedir. Şekil 2.7’de de gösterildiği üzere 0.50 üzerinde elde edilen D50 değerleri ile konuşma anlaşılabilirliği de artmaktadır [8].



Şekil 2.7 Konuşmanın anlaşılabilirliği (SI) ile Belirginlik (D50) ilişkisi [12].

2.1.5 Sesin Açıklığı- Netliği (Clarity - C80)

Bir hacimdeki sesin açıklığı parametresi olarak bilinen erken sesin geç sese oranı indeksi (early-to-late sound index) Thiele'nin 1953 yılında ortaya koyduğu yeni bir parametre olan konuşmanın belirginliği (D50) önerisinden türetilmiştir. D50 parametresi için günümüzde konuşma ile ilgili sıkça kullanılmaya başlanan 50 msn'lik zaman dilimi kullanılmıştır.

Reichardts müziğin net ve açık bir şekilde algılanabilmesi için dinleyiciye direkt sestten sonra ulaşan erken yansımaların direkt ses ile bütünleşme zamanının 80 msn

ile sınırlı olduğunu belirlemiş ve Thiele'nin önerdiği konuşmanın belirginliği parametresinden müzik için erken zaman limitini 80 msn kullanarak açıklık (Clarity-C80) parametresini elde etmiştir. Nesnel açıklık veya başka bir deyişle dinleyiciye ulaşan erken ses enerjisinin geç ses enerjisine oranının indeksidir (early-to-late sound index), ve dB cinsinden aşağıda belirtilen bağıntı ile ifade edilmektedir [8]:

$$C80 = 10 \log \left[\frac{\int_0^{0.08} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right] \quad (2.7)$$

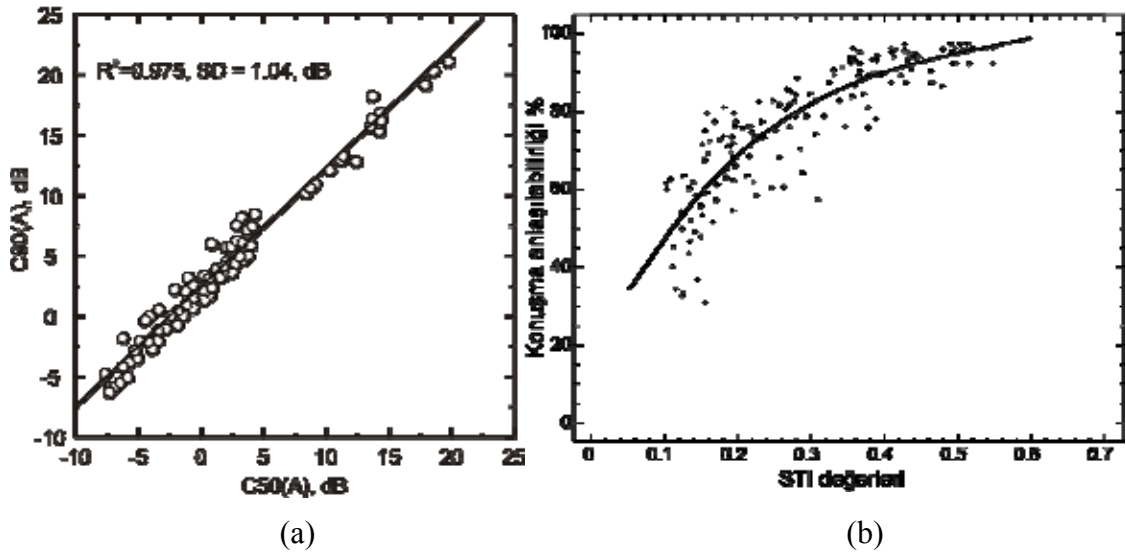
C80 :[dB] *Açıklık*

Müzik için sesin açıklığı veya netliği (C80) parametresi direkt sestten sonraki 80 msn'lik erken zaman limiti esas alınarak elde edilmektedir. Son zamanlarda aynı parametre erken zaman limitini 50 msn alarak konuşma için sesin açıklığı (C50) parametresinin belirlenmesi için de kullanılmaktadır. D50 parametresi tamamen C50 parametresi ile ilişkilidir ve aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmektedir [27]:

$$C_{50} = 10 \log_{10} \left[\frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right] \quad (2.8)$$

C50 :[dB] *Konuşma için sesin açıklığı*

D50 :[-] *Belirginlik*



Şekil 2.8 a) C80 ve C50 parametreleri arasındaki ilişki [13], b) C80 ile STI arasındaki ilişki [19].

C80 parametresi sıklıkla konuşma anlaşılabilirliğinin öngörülmesi için de ölçü olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.8(b)) [19]. J.S. Bradley'in konuşma anlaşılabilirliğini belirlemede kullanılan parametreler arasındaki ilişkileri incelemek için yaptığı bir çalışmada, C80 ile C50 değerleri için kullanılan farklı erken zaman aralıklarının elde edilen değerler üzerindeki etkisini Şekil 2.8 a'da göstermiştir ve C80 değerlerinin C50 değerlerinden yaklaşık olarak 2 dB daha büyük olduğunu belirlenmiştir [13].

Nesnel açıklık algılanan açıklık (clarity) ve öznel yansımışlık (reverberance) arasındaki denge ile ilişkilidir [8]. C80 parametresi ile T parametresi arasında ters orantılı bir ilişki bulunmaktadır. Yansımanın olmadığı veya başka bir deyişle ölü bir hacimde, müzik oldukça açık olarak algılanacaktır ve C80 parametresi dB cinsinden yüksek pozitif değerlerle ifade edilecektir. Eğer bir hacimde bir katedralinkine benzer yüksek bir yansıma söz konusu ise, müzik netliğini kaybedecektir ve C80 parametresi dB cinsinden oldukça düşük negatif değerlerle ifade edilecektir. C80 yüksek olması ilk yansımaların enerjisinin fazla olduğunu ve öznel olarak sesin net ve açık olarak anlaşıldığını göstermektedir. C80'e özgü olan ise farklı durumlarda farklı miktarlarda istenilmesidir.

2.1.6 Erken Yanal Enerji Oranı (Early Lateral Energy Fraction-LF80)

Hacim etkisi bakımından yanal yansımaların muhtemel önemi ilk olarak 1967 yılında Marshall tarafından ortaya atıldı [14]. Erken yanal yansımaların etkisi süratle mekânsal algılamayla ilişkilendirildi, hâlbuki Marshall müziğin çalındığı hacmin bir özelliği olan mekânsal tepkiye atıfta bulunmaktaydı [15]. Barron ve Marshall 1981 yılında yanal yansımaların mekânsal algılama (spaciousness) ile ilişkisini araştırmak için yaptıkları sübjektif testler ve simülasyon çalışmaları ile nesnel kuşatılmışlık (objective envelopment) kavramının lineer ölçümü olarak erken yanal enerji oranını (LF80) ortaya koymuşlardır [16]. Fazla sürmeden Baron ve Marshall'ın erken yanal yansımalar ve mekânsal algılama (spaciousness) üzerine yaptıkları çalışmalar 1989 yılında Marimoto ve Maekawa ile 1995 yılında onların savlarını destekleyen Bradley ve Soulodre'in çalışmalarıyla gölgelenmiştir. Marimoto ve Maekawa hacimlerde en az iki nesnel mekânsal etkinin oluştuğunu belirtmişlerdir ve hacimce kuşatılmışlık (envelopment) hissinin mekânsal algılamadan (spaciousness) bağımsız olduğuna, kuşatılmışlığın ise yansımış sesin (reverberant sound) tutarsızlığına bağlı olduğuna dair kanıtlar sağlamışlardır [17]. Bradley ve Soulodre de 1995 yılında hacimce

kuşatılmışlığın nesnel ölçülendirilmesiyle ilgili yaptıkları çalışmada Marimoto ve Maekawa'nın savına katılarak hacimlerde iki mekansal etkinin oluştuğunu ve bunların geçmişte sıkça karıştırıldığını belirtmişlerdir. Bradley ve Soulodre bu iki mekânsal etkiyi (1) kaynağın genişlemesi (source broadening) ve Bölüm 2.1.7'de açıklanan (2) dinleyicinin hacimce kuşatılmışlığı (listener envelopment- LEV) olarak tanımlamışlardır [18]. Kaynağın genişlemesi etkisi algılanan kaynak genişliği (apparent source width-ASW) öznel parametresi ile belirlenebilmektedir. Bradley ve Soulodre ASW öznel parametresini ağırlıklı olarak erken yanal yansımaların belirlediğini, LEV parametresini de gecikmiş seslerin etkilediğini ortaya koymuşlardır. Bu nedenle erken yanal enerji oranını ölçüsü olan LF80 nesnel parametresi ASW parametresi ile ilişkilendirilerek kaynağın genişleme ölçümünde kullanılmaktadır. LF 80 parametresi direkt sestten sonraki ilk 80 msn içinde hacmin yan yüzeylerinden ulaşan enerjinin direkt sestten sonraki ilk 80 msn içinde ulaşan toplam ses enerjisine oranı olarak tanımlanmıştır. Ölçümü ise bir kaynağa doğru yönlendirilmiş 8 adet mikrofon ile aynı konumdaki çok yönlü (omni) bir mikrofona ulaşan seslerin enerjileri arasındaki oranın aşağıdaki bağıntı ile hesaplanarak yapılmaktadır [19]:

$$LF_{80} = \frac{\int_{0.005}^{0.08} p^2(t) \cos^2 \theta dt}{\int_0^{0.08} p^2(t) dt}, \text{ dB} \quad (2.9)$$

LF_{80} :[dB] *direk sestten sonra 80ms içinde ulaşan yanal enerji*
 $\cos \theta$:[-] *gelen sesin yönü ile dinleyicilerin kulak aksı arasındaki açıyı*
belirten terim, 8 mikrofonlu kurulum için $\cos^2 \theta$ olarak kullanılmakta



Şekil 2.9 Salon şekli ile sesin yanallığının ilişkisi [10].

Neden eski ve dar dikdörtgen biçimli salonların günümüzün yelpaze biçimli salonlarından daha iyi akustiğe sahip oldukları sorusu yanal yansımalarının öneminin anlaşılması ile müzik salonları için bir gizem olmaktan çıkmıştır. Bir hacimde yanal yansımalar tipik olarak yan duvarlardan sağlanmaktadır. Dikdörtgen biçimli bir salona kıyasla yelpaze biçimli bir salonda yan duvar yansımaları dinleyiciye daha çok salonun ön kısmından ulaşmaktadır (Şekil 2.9 (a), (b)). Ters dönmüş yelpaze biçimli bir salonun dikdörtgen biçimli bir salondan daha yüksek dereceli bir yanallık sağlamaktadır (Şekil 2.9 (c)) [10].

2.1.7 Gecikmiş Yanal Ses Düzeyi (Late Lateral Sound Level- LG80)

Barron ve Marshall'ın 1981 yılında erken yanal yansımalarla bağlı gelişen mekansal algılama öznel parametresi ile ilgili savlar Bradley ve Soulodre tarafından 1995 yılında dinleyicinin hacimce kuşatılmışlığın nesnel ölçülendirilmesiyle ilgili yaptıkları çalışmayla gölgelenmiştir. Bradley ve Soulodre mekansal algılamanın o güne kadar çok farklı araştırmacılar tarafından farklı şekillerde tanımlanıp kullanıldığını, ancak hacimlerde mekansal etki ile ilgili başlıca iki ses olayı meydana geldiğini belirtilmiştir. Birincisi Bölüm 2.1.6'da açıklanan kaynağın genişlemesi ve ölçümü ile ilişkili olan LF80 nesnel parametresidir, ikincisi ise gecikmiş yanal yansımalarla dayanan dinleyicinin hacimce kuşatılmışlığı (LEV) öznel parametresidir. Bradley ve Soulodre yaptıkları çalışma ile LEV öznel parametresinin ölçümü olan gecikmiş yanal ses düzeyi (late lateral sound level- LG80) nesnel parametresini aşağıdaki bağıntı ile ifade etmişlerdir [20]:

$$LG_{80}^{\infty}(GLL) = 10 \log \left\{ \frac{\int_{0.08}^{\infty} p_F^2(t).dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t).dt} \right\}, \text{ dB} \quad (2.10)$$

LG_{80}	:[dB]	80ms sonrasında ulaşan gecikmiş yanal yansımaların ses düzeyi
$p_F(t)$	:[-]	bir dinleyici noktasında ses kaynağına doğru yönlendirilmiş 8 mikrofona kurulum ile ölçülen ses basınç düzeyi
$p_A(t)$	:[-]	aynı kaynağa doğru yönlendirilmiş 10 m uzaklıktaki serbest alanda çok yönlü (omni-directional bir mikrofona ölçülen ses basınç düzeyi

2.1.8 Konuşmanın İletim İndeksi (Speech Transmission Index –STI)

Konuşmanın anlaşılabilirliği geleneksel olarak herhangi bir salonda dinleyiciler ve çeşitli kelime listeleri ile yürütülen testler aracılığıyla ölçülmekteydi. Bu yöntem anlaşılabilirliği tespit etmek için kullanılan çoğu sistemlerin temelini oluştursa da, aynı nicelikleri direkt ölçebilecek bir elektronik yöntemin bulunmasına yüksek talep doğmuştur. Bunun nedeni testlerin sonuçları kişisel değerlendirme ve yorumlara dayalı olduğu için, çalışma sırasında dinleyicilerin psikolojik durumları da hesaba katılmalıdır. Konuşma sesi karmaşık bir yapıya sahiptir ve basit sinüzoidal sinyaller sesin davranışını tam olarak taklit edememektedir. İki Hollandalı bilim adamı, Houtgast ve Steeneken, 1973 yılında, insan sesinin birçok özelliğini taşıyan (modulation transfer function - MTF) isimli bir ölçüm sistemi geliştirdiler.

MTF sistemi, konuşmanın modüle (akort) edilmiş gürültü bantlarından oluşması fikrine dayanmaktadır. İnsan ses telleri titreşerek bir gürültü bandı oluşturmaktadır, ancak ağız bu gürültü bandını modüle (akort) ederek kelimelere dönüştürmektedir. Bu oluşum, bir alçak frekans tonu ile bir oktav bant genişliğindeki gürültü sinyalinin modüle (akort) edilmesiyle gerçekleşmektedir. Bu sinyalin, dinleyiciye iletilirken belli bir ölçüde ortam koşullarından etkilenecek değişime uğraması konuşma anlaşılabilirliğinin azalmasıyla sonuçlanabilmektedir. Sinyalin modülasyon azalım mekanizmasını arka plan ve çınlama gürültüsü oluşturmaktadır. Sinyal diyagramındaki modülasyon değişim oranı temel alınarak sinyalin modülasyon azalım faktörü (modulation reduction factor- $m(f_m)$) hesaplanmakta ve aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmektedir:

$$m(f_m) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[2\pi f_m \frac{T_{60}}{13.8}\right]^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{(-0.1 L_{SN})}} \quad (2.11)$$

$m(f_m)$:[-] modülasyon azalım faktörü (modulation reduction factor)

L_{SN} :[dB] sinyal düzeyinin gürültüye oranı (S/N ratio)

f_m :[Hz] modülasyon frekansı

T_{60} :[s] çınlama süresi

Modülasyon frekansı (f_m) değer olarak 63Hz ile 12.5Hz 3.oktav aralıklarında yer almaktadır.Akort azalım faktörü ($m(f_m)$) 0 ile 1 arasında değişmekte olup; 0 hiçbir

akort azalımı olmamasını, 1 ise %100 akort (modülasyon) azalımı olmasını ifade etmektedir. Herhangi bir sistemin girdi-çıkıti analizi 7 oktav bant ve 14 modülasyon frekansında toplam 98 ayrı modülasyon azalım faktörü “ $m(f_m)$ ” için yapılmaktadır.

Steeneken ve Houtgast 1980 ile 1985 yılları arasında bir set modülasyon azalım faktörü (m) değerini düzey olarak ifade edilen görünürdeki sinyalin gürültüye oranı (L_{SNapp}) vasıtasıyla konuşmanın iletim indeksine (STI) dönüştürmek için bir algoritma geliştirdiler.

$$L_{SNapp} = 10 \log \frac{m}{1 - m} \quad (2.12)$$

L_{SNapp} :[dB] görünürdeki sinyalin gürültüye oranı (apparent S/N ratio)

m :[-] modülasyon azalım faktörü (modulation reduction factor)

STI değeri, 98 görünürdeki sinyalin gürültüye oranının (apparent S/N ratio) ağırlaştırılmış ortalamalarının normalizasyonundan sonra aşağıdaki bağıntılarla elde edilmektedir.

$$\overline{L_{SNapp}} = \sum_{i=1}^7 w_i (L_{SNapp})_i \quad (2.13)$$

$\overline{L_{SNapp}}$:[dB] ortalama görünürdeki sinyalin gürültüye oranı (avarage apparent S/N ratio)

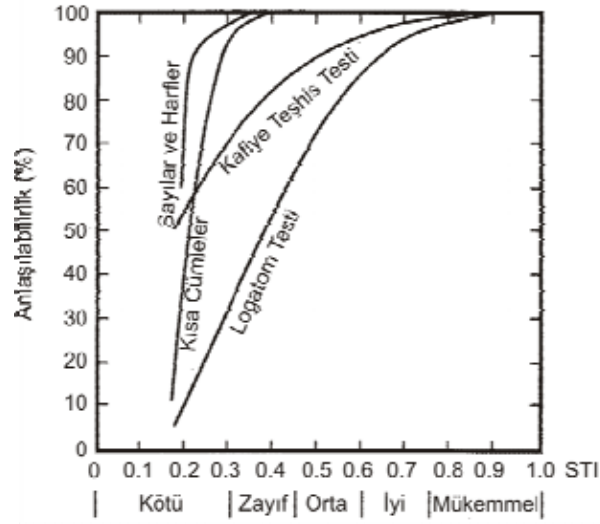
w_i :[Hz] 125 Hz ile 8 kHz' e kadar oktav bantları için dengelem
= 0.13, 0.14, 0.11, 0.12, 0.19, 0.17, ve 0.14

$$STI = [\overline{L_{SNapp}} + 15] / 30 \quad (2.14)$$

STI :[-] konuşma iletim indeksi (speech transmission index)

Houtgast ve Steeneken'in araştırmaları bir grup insanla yapılan deneyler yerine, elektronik olarak insan sesini taklit eden bir sinyal testi ile konuşma anlaşılabilirliğinin fiziksel olarak aletle ölçülmesine olanak sağlamıştır. Bu yöntemin sonucu olan STI değeri ile konuşma anlaşılabilirliğinin değerlendirilmesi için yeni bir akustik parametresi kazandırılmıştır. STI parametresinin anlaşılabilirlik indeksi

(articulation index-AI) veya sessiz harflerin anlaşılama (articulation loss of consonants – Al_{cons}) testleri ile karşılıklı ilişkisini ve konuşma anlaşılabilirliğinin doğrudan ölçümü olduğu Şekil 2.10’da ifade edilmiştir [21].



Şekil 2.10 Farklı tipteki testler için STI ve anlaşılabilirlik dereceleri arasındaki tipik ilişkiler [22]

2.2 Öznel Akustik Parametreleri

Bir hacmin akustik performans değerlendirilmesi dinleyicilerin kişisel beğeni ve algılamalarına bağlı olarak belirlenen öznel parametrelere göre yapılmaktadır. Uzun yıllardan beri hacim akustiği üzerine yapılan araştırmalar ve çalışmalar bu öznel parametrelerin belirlenmesi ve ölçümlerine olanak sağlayacak nesnel akustik parametrelerle ilişkilendirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Eskiden akustik performansın en önemli ölçümlerinden biri olan çınlama süresi sadece birkaç öznel etki ile ilişkilendirilebildiği için günümüzde hacim akustiğinde oluşan öznel etkilenmeleri tanımlayabilmek için yeni oranlar ve parametreler ortaya çıkmıştır. Bölüm 2.1’de belirtilen ve bu çalışmada kullanılan nesnel parametrelerle belirlenen bazı öznel parametreler bu bölümde açıklanmıştır.

2.2.1 Canlılık ve ses dolgunluğu (Liveness and Fullness of one)

Onsekizinci yüzyılın erken dönemlerinden beri bir konser salonunda canlılık (reverberance) öznel akustik parametresi müzikal beste ve icraların önemli bir bileşen olmuştur. Belli bir dinleyici noktasında algılanan öznel canlılık (reverberance) ve ses dolgunluğu (fullness of tone) parametrelerindeki artış nesnel çınlama süresi parametresinin iki özelliğine bağlı olarak gerçekleşmektedir:

Birinci özellik canlılık terimi ile ilişkili olan çınlama süresinin (T) uzunluğudur ve özellikle ses düşüşünün erken kısmının uzunluğu olan erken düşüş süresidir (EDT).

İkinci özellik ise sesin dolgunluğunu belirleyen gecikmiş yansımaların ses yüksekliğinin, erken yansımaların ses yüksekliğine oranıdır.

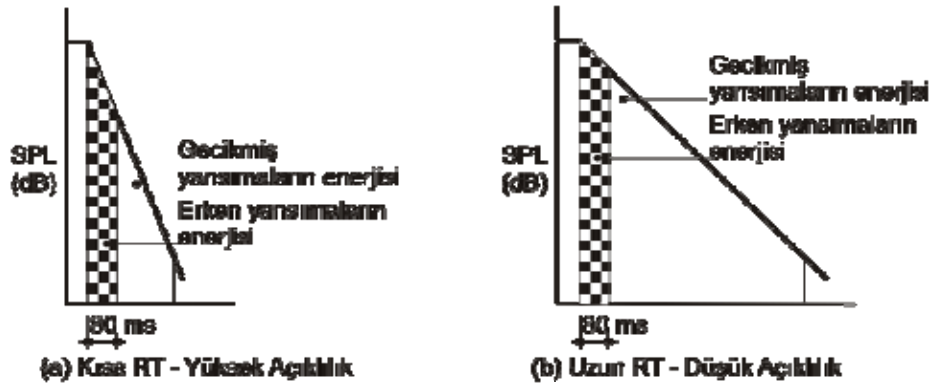
Bir salonun yüzeyleri kaynaktan yayılan sesleri doğrudan dinleyicilere yöneltecek şekilde tasarlanması halinde, kaynaktan yayılan ses enerjisinin büyük bir kısmı direkt sesle aynı anda dinleyiciye ulaşmasıyla algılanan ses tonu dolgunluk yoksunu olmaktadır. Böyle bir salonda gecikmiş yansımalarla güçlendirilmeyen erken ses enerjisi çok net ve çabuk sünen olarak algılanmakta ve dinleyiciler arasında öznel olarak “kuru” (dry) veya “ölü” (dead) diye tanımlanmaktadır. Hâlbuki müzik sesi hacmin en yüksek yerlerine kadar özgürce yükseldiği durumlarda, erken seslerin enerjisi azalıp yansımış seslerin enerjisi artmaktadır ve bu tür hacimler dinleyiciler tarafından öznel olarak “canlı” diye tanımlanmaktadır [9]. Ancak erken ses enerjisinin düşüp yansıyan ses enerjisinin oldukça fazla yükselmesi durumlarında aşırı artan ses dolgunluğu da öznel olarak sesin çamurlaşmış (muddied sound) algılanmasına neden olmaktadır. Bu nedenle iç yüzeylerin şekillendirilmesi ve bazı özel ses yansıtıcı panellerin kullanımı bu iki faktörün oranlarını ve dolayısıyla ses dolgunluğunu da kontrol edecek şekilde kullanılmalıdır. Sonuçta canlılık (reverberance) ve ses dolgunluğu (fullness of tone) parametreleri erken ve gecikmiş ses enerjisi oranlarına göre gelişen öznel nitelikler oldukları için EDT ve T nesnel parametrelerinin davranışı ile doğrudan ilişkilidirler [10].

2.2.2 Belirlilik veya Açıklık (Definition or Clarity)

Bir müzikal icrada her bir ses tonunun birbirinden ayrı olarak algılanma derecesi bir salonun “belirlilik” veya “açıklık” özneliğini tanımlanmaktadır. Belirlilik özneliği ciddi bir şekilde müzisyenlerin performansına ve müzikal faktörlerle bağlıdır, fakat hacmin akustik koşulları ile de ilişkilidir. Yatay ve düşey olarak iki farklı belirlilik türü bulunmaktadır. Yatay belirlilik birbirinin ardından çalınan tonların ne derecede birbirinden ayrı olarak algılandığını ifade etmektedir ve çınlama süresinin T uzunluğu ile erken yansımaların enerjisinin gecikmiş yansımaların enerjisine oranından etkilenmektedir- sesin dolgunluğunu belirleyen faktörlerin ters ilişkisi. Düşey belirlilik ise eşzamanlı çalınan ses tonlarının ne derecede birbirinden ayrı

olarak duyulduklarını ifade etmektedir ve müzisyenlerin icra biçimine, hacmin akustik özelliklerine ve dinleyicilerin işitsel duyarlılığına bağlıdır [9].

Açıklık nesnel olarak erken ses enerjisinin yansımış ses enerjisine oranını belirten C80 parametresiyle ölçülmektedir ve (dB) cinsinden ifade edilmektedir. C80'nin yüksek olması erken yansımaların enerjisinin fazla olduğunu ve bir müzik parçasındaki farklı notaların birbirinden ayrık algılanarak müziğe öznel belirginlik veya açıklık duygusu kazandıracağını göstermektedir. Eğer tam tersi olup erken ses enerjisinde, yani C80 değerlerinde azalma meydana gelirse (gecikmiş ses enerjisi artacağı için) öznel olarak sesin belirginliği veya açıklığı azalır sesin dolgunluk niteliği artacaktır. Ancak aşırı yüksek bir ses dolgunluğu sesi çamurlaştırmaya meyillidir. Böylelikle C80 ya da öznel olarak belirginlik veya açıklık parametresi ile T parametresi arasında ters orantılı hassas bir ilişkinin bulunduğu görülmektedir. T kısa olduğu durumlarda, ses enerjisi düşüş sürecinde erken ulaşan seslerin enerjisi gecikmiş seslerin enerjisinden daha büyük olduğu için öznel olarak algılanan açıklık ve belirginlik duygusu da yüksektir (Şekil 2.11 (a)). T arttıkça, erken enerji azalmakta ve gecikmiş yansımaların enerjisi artmaktadır, çünkü direkt sesteki sonraki ilk 80 ms içerisinde ulaşan enerji 60 dB düşüş süreci içerisinde oldukça küçük bir kesimi kapsamaktadır ve dolayısıyla öznel olarak belirginlik veya açıklık algısı da azalmaktadır (Şekil 2.11 (b)).



Şekil 2.11 C80 ile T arasındaki ilişki [10]

Düşük EDT değerleri öznel açıklık, yüksek T değerleri ise öznel canlılık (reverberance) sağlamaktadır ve müzik için önemli ancak birbiriyle zıt olan C80 ve T parametrelerini böyle bir ilişki içerisinde optimize edilebilmektedir [10].

2.2.3 Mekânsal Algılama (Spatial Impression or Spatial Response)

Bir mekânın akustik kalitesinin üzerindeki yanal yansımaların muhtemel önemi ilk olarak 1967 yılında Marshall'ın yaptığı çalışmalar ve bulgular ile ortaya koyulmuştur ve süratle mekansal algılama ile ilişkilendirilmiştir, halbuki kendisi mekansal tepkiyi vurgulamak istemiştir[15]. Marshall ve Baron 1981 yılındaki çalışmaları sonucunda mekânsal algılama ile ilgili erken yansımalarla dayana iki ölçü ortaya koyulmuşlardır; birincisi erken yanal enerji oranı (early lateral energy fraction-LF80) ikincisi ise kulak arası karşılıklı ilişki katsayısı (inter aural cross correlation- IAAC) parametreleri [16]. Ancak Morimoto ve Maekawa'nın 1989 yılındaki çalışmasıyla hacimce kuşatılmış olma hissinin mekânsal algılamadan (erken yanal yansımalarla oluşan mekansal algılamadan) bağımsız olduğunu ve kulak arası karşılıklı ilişki katsayısı (inter aural cross correlation- $IAAC_E$) etkisine bağlı olduğu ortaya koyulmuş ve Bradley ile Marshall'ın hipotezi gölgelemiştir [17]. Bu sav daha sonra 1995 yılında Bradley ve Soulodre tarafından da desteklenip hacimlerde meydana gelen iki mekânsal etkinin geçmişte sıkça birbiriyle karıştırıldığını belirtmişlerdir. Bu iki mekânsal etki: erken yansımalarla ilişkili kaynağın genişlemesi (source broadening) ve gecikmiş yansımaların yüksekliğine dayanan hacimce kuşatılmışlık (listener envelopment) parametreleri olarak tanımlanmıştır [18].

Günümüzde mekânsal algılama birçok kaynakta ve araştırmacı yazar tarafından farklı anlamlara gelecek şekilde kullanılmıştır. Ancak son çalışmalarda bu iki öznel mekânsal etki mekânsal algılama yerine, bir mekânda oluşan mekânsal tepki olarak aşağıdaki anlamlarıyla kullanılmaktadır [23]:

1. *Algılanan kaynak genişliği (apparent source width- ASW)*: Bir salonda yan duvarlardan gelen erken yanal yansımalar ses kaynağının ses alanını genişlemiş olarak algılanmasına sebep olarak müziğe hacim ve dolgunluk kazandırmakta olduğunu Marshall ve Baron çalışmalarıyla kanıtlanmıştır. Öznel olarak algılanan kaynağın genişliği parametresinin en iyi ölçümü kulak arası karşılıklı ilişki katsayısı (inter aural cross correlation- $IAAC_E$ (E erken enerjinin ele alındığını belirtmektedir) nesnel parametresi ile yapılmaktadır. İki kulakta ölçülen sesler birbirinden ne kadar farklı olursa, $IAAC_E$ parametresi o kadar düşük ve ASW büyük olacaktır. Alçak frekanslardaki müziğin ses düzeyi (G_{low}) de algılanan kaynak genişliğini arttırmaktadır. Bununla beraber erken yanal yansımalar enerji

oranı (LF80) nesnel parametresi de bu öznel nitelik ile ilişkilidir ve değeri arttıkça algılanan kaynak genişliği de büyümektedir [9].

2. *Dinleyicinin hacimce kuşatılmışlığı (Listener Envelopment-LEV)*: Hacimce kuşatılmışlık etkisi dinleyiciye 80 msn sonrasında ulaşan gecikmiş seslerin dinleyici tüm yönlerden eşit (yönden bağımsı olarak) olarak gelirmiş gibi hoş bir his bırakması durumunda çok yüksek olarak değerlendirilmektedir. Öznel olarak algılanan hacimce kuşatılmışlık etkisinin ölçümü gecikmiş seslerin düzeyini belirten (LG80) nesnel parametresi ile yapılmaktadır [18].

2.2.4 Ses Yüksekliği (Loudness)

Bir salonun akustik kalitesinin değerlendirilmesinde hacim içerisinde algılanan sesin yeterince yüksek düzeyde olması büyük önem taşımaktadır. Ses yüksekliği bir ses enerjisinin onu paylaşacak olan kişilerin sayısına bölünmesinin bir fonksiyonudur. Bu enerji aynı zamanda insanların, döşemeliklerin ve diğer malzemelerin yutuculuk özellikleri ile de azalmaktadır. Belli bir dinleyici noktasındaki ses yüksekliği, erken ve gecikmiş olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Her iki ses yüksekliğinin öznel olarak ayrı ayrı etkileri ve diğer öznel parametrelerle önemli etkileşimleri bulunmaktadır. Toplam ses yüksekliği G, gecikmiş ses yüksekliği ise LG80 nesnel parametreleriyle ölçülmektedir. Yetersiz bir ses yüksekliği düzeyi sinir bozucu olabileceği gibi, aşırı yüksek olması da dayanılmaz olabilir [9].

2.3 Tasarım Parametreleri

Konuşmanın anlaşılabilirliği, okul sınıfları, konferans ve toplantı salonları gibi konuşma amaçlı kullanılan mekânların tasarımında sağlanması gereken en önemli performans kriteridir. Konuşma anlaşılabilirliğinde yüksek performansın habercisi olan optimum çınlama süresi ile dinleyici alanındaki yüksek S/N oranının elde edilebilmesi için tasarım aşamasında sağlanması gereken koşullar aşağıda belirtilmiştir:

1. Salonda ses yüksekliği (loudness) yeterli düzeyde olmalıdır
2. Salonda her yerde ses düzeyi aynı olmalıdır.
3. Salonda kullanıma uygun optimum çınlama özellikleri sağlanmalıdır.
4. Salonda S/N oranı yüksek olmalıdır.

5. Arka plan gürültü düzeyleri dinleyici ortamını engellemeyecek kadar düşük olmalıdır.
6. Salon, uzun gecikmiş yansımalar, yanal eko, odaklanma ve rezonans gibi akustik kusurlardan arındırılmış olmalıdır.

Salonun formu, boyutları, yüzey geometrileri ve malzemeleri gibi mimari tasarım parametrelerinin tümü, bu koşulların sağlanması ile doğrudan ilişkilidir.

Bu bölümde konuşma amaçlı kullanılan salonlarda sağlanması gereken konuşmanın anlaşılabilirliği ile mimari tasarım parametrelerinin ilişkileri ve davranışları açıklanacaktır [6].

2.3.1 Salonun Formu

Bir hacimde sesin yüksekliği yeterli düzeyde olabilmesi için direkt ses alanının da düzeyi yüksek olmalıdır. Direkt ses alanı düzeyinin belirlenmesi için konuşmacı ile dinleyici arasındaki fiziksel ilişki tasarım parametreleri ile birlikte ele alınmalıdır.

Konuşmacı ile Dinleyici Arasındaki Mesafe

Direkt sesin konuşmacı ile dinleyici arasındaki yol boyunca azalımı iki şekilde gerçekleşmektedir; birincisi ters kare kanununa göre mesafenin artmasıyla, ikincisi ise az miktarda da olsa hava tarafından emilmesiyle. Bu demektir ki, mesafenin artmasıyla konuşma anlaşılabilirliği de hızla azalacaktır. Buna göre, her ne kadar konuşmacı ile dinleyici arasındaki mesafenin azaltılması akustik tasarım aşamasında izlenecek bir strateji olsa da dinleyici konforunu engellemeyecek şekilde ele alınmalıdır.

Dinleyici alanındaki direkt ses kadar yansımış seslerin sergileyeceği davranış ta önemlidir. Yansımış sesler direkt sestten daha uzun yol kat ettikleri için dinleyiciye gecikmeyle ulaşmaktadırlar. Helmut Haas'ın deney ve gözlemlerine göre eğer yansımış sesler dinleyiciye direkt sestten daha yüksek bir düzeyde ve 50 ms'den sonra ulaşıyorsa, yansımış ses ile direkt ses arasında bütünleşme gerçekleşmediği için yansımış sesler münferit yansımalar olarak duyulmaktadır. Bir sinyalin düşme sürecinde direkt sesle bütünleşmede geciken güçlü münferit yansımaların varlığı akustik ekonun habercisidir ve hacim akustiğinde meydana gelmesi istenmeyen bir akustik kusurdur. Gecikmiş güçlü yansımalar tesirindeki dinleyiciler, direkt sesin geliş yönü ile konuşmacının yerini belirlemede yansımalar yaşamaktadır. Buna

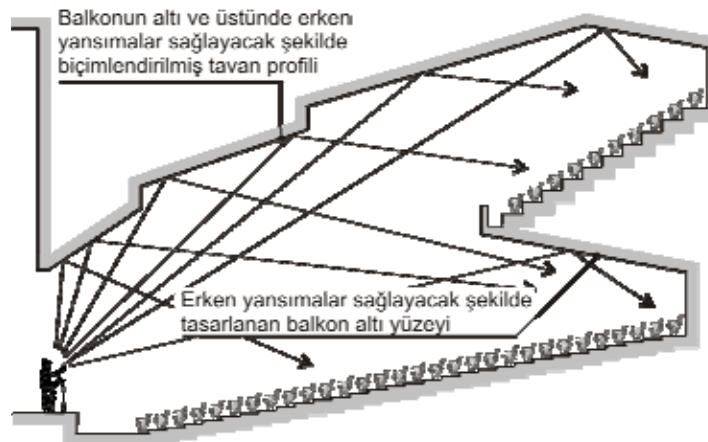
göre, direkt sesle yansımış ses arasındaki maksimum kabul edilebilir gecikme süresi 50 ms ise aradaki yol farkı da ($344\text{m/s} \times 0.050\text{s} = 17\text{m}$) maksimum 17 m olmalıdır. Pratikte konuşmacı ile dinleyici arasındaki mesafenin tasarımında direkt sesle yansımış ses arasındaki fark yuvarlatılmış bir şekilde 20 m olarak alınmaktadır.

Konuşmanın anlaşılabilirliği için konuşmacı ile dinleyici arasındaki mesafenin azatılımı akustik ihtiyaçların yanında görsel nedenlere de dayanmaktadır. Eğer dinleyici konuşmacıyı görmüyorsa direkt sestten mahrum kalacaktır. Konuşma anlaşılabilirliği için direkt ses alanının yüksek düzeyde olması kadar, dinleyicilerin konuşmacının yüz ifadelerini, el kol hareketlerini ve belli bir ölçüde dudak hareketlerini görebilmesi de önemlidir. Ortalama bir insan için 12 m'den uzağa yüz ifadelerini, 20 m'den uzağa el kol hareketlerini, 30 m'den uzağa da vücut hareketlerini görmesi güçtür. Buna göre sahne ile en uzaktaki dinleyici koltuğun arasındaki maksimum mesafe toplantı salonları için 25 m, tiyatro salonları için 20 m olması tavsiye edilmektedir.

Konuşmacı ile dinleyici arasındaki mesafenin kontrolü iki şekilde yapılabilir:

- Balkon uygulaması
- Yelpeze şekilli dinleyici alanı veya yayvanlaştırılmış yan duvarları

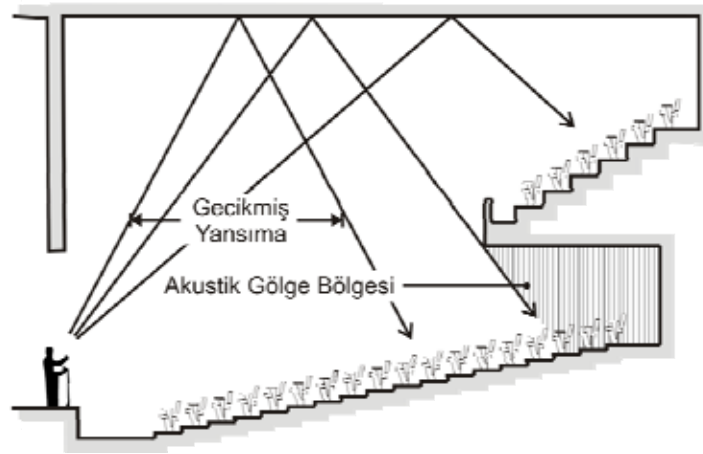
Genellikle 800 ve üzeri dinleyicili büyük toplantı salonlarında konuşmacı ile dinleyici arasındaki gerekli mesafenin sağlanabilmesi için balkonlu oturma düzenine gidilmektedir. Böyle uygulamalarda salon tavanı ile balkon altı yüzeyinin profili, balkon altındaki dinleyicilere yeterli düzeyde yansımış sesin akışını sağlayacak şekilde yapılmalıdır (Şekil 2.12).



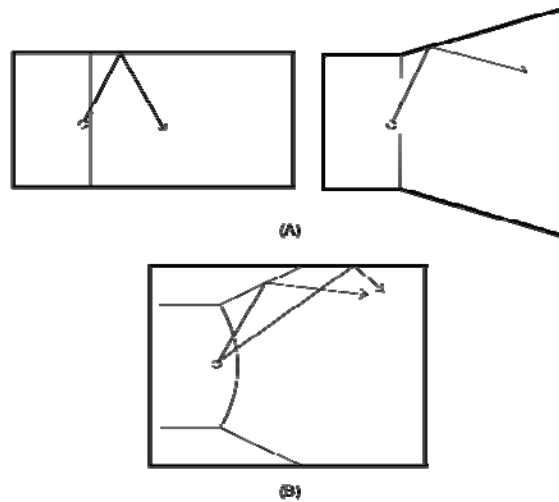
Şekil 2.12 Dinleyici alanı üzerinde düzgün yansımalar yönelten salon tavanı ve balkon altı profili [10].

Eğer salon tavanı ve balkon altı yüzeyinin profili doğru tasarlanmaz ise, balkon altındaki dinleyici alanı Şekil 2.13'te gösterildiği gibi akustik gölge etkisi altında kalarak yeterli düzeyde yansımış sesi alamayabilir. Böyle bir durumun engellenmesi için balkonun derinliği balkon altı yüksekliğinin 2 katından az olmalıdır.

Dik bir balkon parapeti dinleyici alanının ön kısmında ekoya neden olan gecikiş yansımaları kaynağ olabilmektedir. Genellikle parapetin yüksekliği (strüktürel mesnedi ile beraber) konuşma frekanslarının dalga boylarından daha büyük olduğu için yansıtıcı panel gibi davranmaktadır. Bu sorun, parapete yutuculuk özelliği kazandırılarak veya yayınlık yansıma sağlayacak profile getirilerek çözülebilir.



Şekil 2.13 Yanlış şekillendirilmiş tavan ile oluşan gecikmiş yansımalar ve balkon altı profilinin doğurduğu yansımış ışıktan mahrum akustik gölge bölgesi [10].

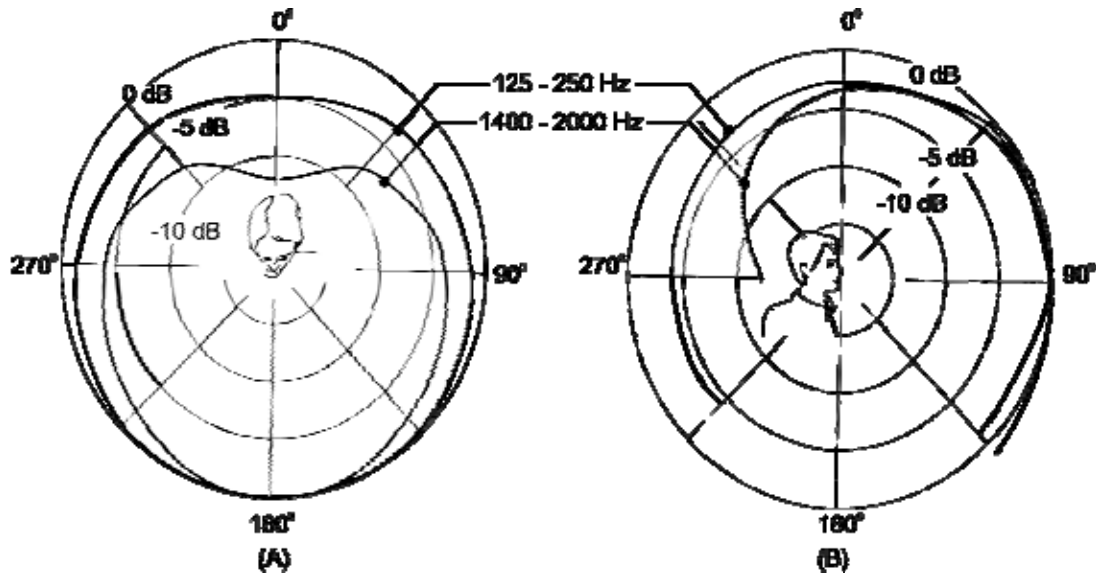


Şekil 2.14 Bir salonun yan duvarlarının dışa doğru açılmasının akustik etkileri [10].

Konuşmacı ile dinleyici arasındaki gerekli mesafenin korunması için uygulanan ikinci yöntem, yan duvarların dışa doğru açılmasıyla dinleyici alanının yelpaze biçimli hale getirilmesidir. Sağlanması gereken mesafe korunarak yan duvarların

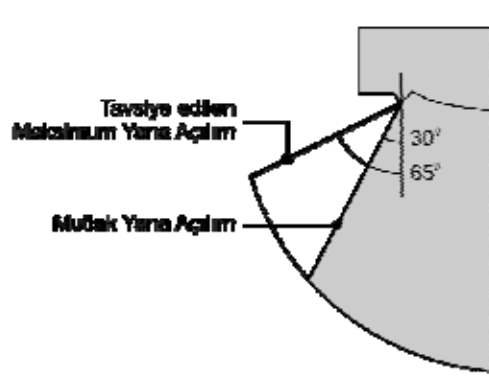
dışarıya doğru açılmasıyla dinleyici alanı genişlemekte ve salonun dinleyici kapasitesi de artmaktadır. Dikdörtgen biçimli salonlara kıyasla yelpaze biçimli salonların sağladıkları ek avantaj, yayvan yan duvarların yansıyan sesleri salonun arka kısımlarına, yani sese en çok ihtiyaç duyulan alanlara doğru yöneltmesidir (Şekil 2.14 (a)). Eğer herhangi bir nedenle salonun dikdörtgen biçiminde olması gerekli ise, sadece ön kısma ait yan duvarların yana doğru açılması tercih edilir (Şekil 2.14 (b)).

Yan duvarların dışa açılımı da belli limitler içerisinde gerçekleşmektedir. Bunun nedeni konuşmanın yön faktörüdür. Konuşmacının başı akustik gölge oluşturmamasından dolayı konuşma bütün yönlere eşit miktarda dağılamamaktadır. Şekil 2.15 (a)'da yatay bir düzlemde konuşmacının ağzı merkez alınarak iki frekans aralığı için (125 Hz- 250 Hz ve 1400 Hz- 2000 Hz) konuşmanın ses basınç düzeyleri gösterilmiştir. Ses basıncı konuşmacının önünde (0°) maksimum düzeydeyken önden her iki yana doğru azalmaya başlamaktadır. En büyük azalım konuşma anlaşılabilirliğine oldukça katkısı olan 1400 Hz - 2000 Hz frekans aralığında gerçekleşmektedir ve başın arka tarafına doğru gidildikçe (180°) ses basınç düzeyindeki azalım 12 dB'e kadar ulaşmaktadır. Şekil 2.15 (b) dikey bir düzlemde konuşmacının ağzını merkez alarak konuşmanın yönsel özelliğini göstermektedir. Dikey düzlemde de önden arkaya doğru gidildikçe aynı frekans aralıklarında ses basınç düzeyinde azalmalar olduğu görülmektedir [10].



Şekil 2.15 Bir konuşmacının ses basınç düzeyinin (a) yatay düzlemde ve (b) dikey düzlemde dağılımı [10].

Böylelikle konuşmanın yön faktörü dikkate alınarak yelpaze biçimli salonlarda yan duvarların yana açılımı maksimum 30° , mutlak maksimum ise 65° olarak tavsiye edilmektedir (Şekil 2.16).



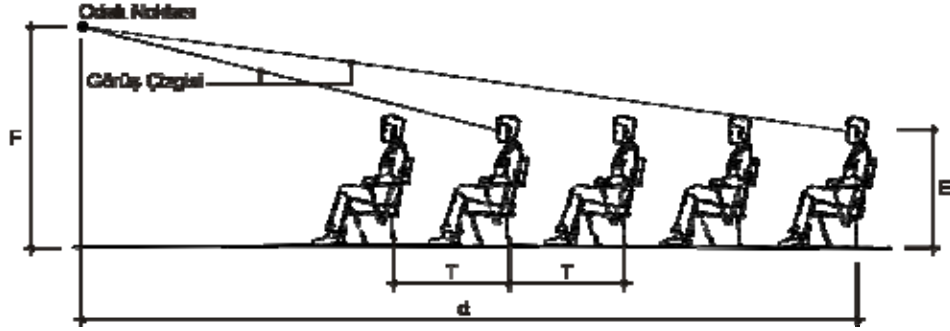
Şekil 2.16 Salon yan duvarları için mutlak maksimum yana açılım derecesi ile tavsiye edilen maksimum yana açılım [10].

Eğer dinleyici kapasitesi 400 ve üzeri ise konuşmacı ile dinleyici arasındaki gerekli mesafenin sağlanabilmesi için yelpaze biçimli dinleyici alanı uygulanmakta, ancak daha az dinleyici sayısı için dikdörtgen biçimli alan da kullanılabilir. Geçmişte birkaç tane yelpaze biçimli konser salonu yapılmış olsa da, dinleyici alanının kavisli arka duvarından yansıyan seslerin odaklanma oluşturmaları nedeniyle günümüzde pek tercih edilmeyen bir salon formudur [10].

Salon Döşeme Eğimi, Direkt Ses ile Görüş Çizgisinin İlişkisi

Her ne kadar eğimli bir döşeme görsel sebeplerden dolayı önemliyse, akustik için de istenilen bir salon formudur. Bir salonda, döşeme eğimi artıp sahne yükseldikçe dinleyici alanı da daha fazla ses almaktadır. Buna rağmen, eğer küçük bir konferans salonunda, dinleyici alanındaki her alıcı ile sahne arasında net bir görüş çizgisi mevcut ise yükseltilmiş platforma gerek kalmadan düz döşeme kullanılabilir. Görüş çizgisi dinleyici alanında oturmuş bir kişinin gözleri ile sahne üzerindeki görülebilir en alçak nokta olan odak noktasını birleştiren çizgidir. Herhangi bir görsel engelle takılmadan öndeki dinleyicinin başı üzerinden sorunsuzca geçen çizgiye net görüş çizgisi denilmektedir. Net görüş çizgisi prensibi esas alınarak, dinleyici alanı için düz döşeme derinliği Şekil 2.17’de gösterildiği gibi verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır. Genellikle küçük salonların dışındaki tüm salonlarda eğimli döşemenin bulunması istenilmektedir. Eğimli döşemelerde sabit rıht yüksekliğinin belirlenmesi ile düzgün eğimin sağlanması gerekmektedir. En son dinleyicinin net görüş çizgisi bir öndeki

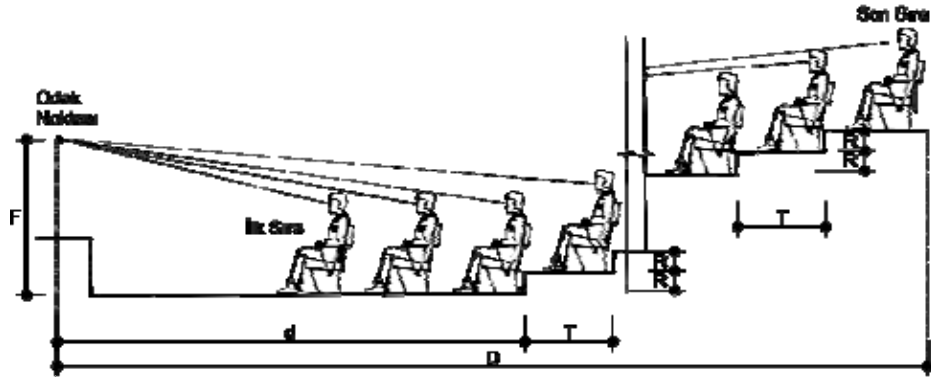
dinleyicinin başı üzerinden geçip sahne üzerindeki odak noktası ile birleşmesi, söz konusu dinleyici alanının döşeme eğimini oluşturmaktadır. Dinleyici platformu üzerindeki her sıranın rıht yüksekliğinin aşağıdaki bağıntı ile hesaplanarak, döşeme eğimi belirlenmektedir (Şekil 2.18).



Şekil 2.17 Düz döşeme sınırının hesaplanması [10].

$$d = \frac{T}{c} [F - E] \quad (2.15)$$

- E : [m] Göz seviyesinin yerden yüksekliği, (ortalama 1.1m)
 c : [mm] Ortalama bir insanın gözü ile başının üstü arasındaki mesafe (100mm)
 T : [m] Dinleyici sıralarının genişlikleri (ortalama 0.95)
 F : [m] Sahne üzerindeki odak noktasının yüksekliği



Şekil 2.18 Eşit yükseklikte rıhtlara sahip düzgün eğimli döşeme hesaplaması [10]

$$R = \frac{cD - T(F - E)}{d} \quad (2.16)$$

- R : [mm] Rıht yüksekliği
 D : [m] Son dinleyicinin odak noktasından uzaklığı
 D : [m] Düz döşeme derinliği (1. rıht ile odak noktası arasındaki mesafe)

Sahne yüksekliği

Her ne kadar sahnenin yerden yükselmesi gerekse de, birinci sıradaki dinleyicinin göz seviyesinden sahne tabanını görebilmek için maksimum yükseklik tecihen 1.05 m olmalıdır. Eğer salon konferans amaçlı kullanılacak ise sahne için altı dolu betonarme bir döşeme düşünülebilir. Ancak, salon drama ve müzikal icralar için kullanılacak ise, alçak frekanslardaki sesleri yükseltmek için altı hava dolu yükseltilmiş (200mm veya daha fazla) bir ahşap döşemeli sahnenin yapılması düşünülebilir [10].

2.3.2 Salonun Hacmi

Konuşma amaçlı kullanılan salonlarda hacmin küçültülmesi bir başka kritik ihtiyaçtır. Genellikle salon hacminin artması, yansıyan seslerin yolunu uzatmakta ve ses düzeyinde de azalmaya neden olmaktadır. Bu nedenle koltuk başına düşen hacim azaldıkça, her bir dinleyiciye gelen ses enerjisi de artmaktadır. Çınlama süresi ile hacmi doğru orantılı olduğu için (Bkz. Denklem 2.1), küçük bir hacim, aynı zamanda belli bir çınlama süresini elde etmek için daha az emilime ihtiyaç duyulacağı anlamına gelmektedir. Böyle bir durumda hacim yüzeylerinin büyük bir oranı yansıtıcı olabileceği için ses yüksekliğini de arttıracaktır.

Farklı kullanımdaki salon tipleri için tavsiye edilen kişi başına düşen hacim miktarları Tablo 2.1’de verilmiştir. Tablodan da anlaşılabileceği gibi, konuşma anlaşılabilirliğinin öncelikli olduğu konferans salonlarında tüm diğer salonlara kıyasla en düşük kişi başı hacim miktarına ihtiyaç duyulmaktadır [24].

Tablo 2.1 Farklı kullanımdaki salon tipleri için tavsiye edilen kişi başına düşen hacim miktarı

Salon Tipi	Kişi başına düşen hacim miktarı (m ³)		
	Minimum	Optimum	Maksimum
Konferans Salonu	2.3	3.1	4.3
Konser Salonu	6.2	7.8	10.8
Opera Salonu	4.5	5.7	7.4
Çok Amaçlı Salon	5.1	7.1	85
Kilise ve Sinagog	5.1	7.2	9.1
Sinema Salonu	2.8	3.5	5.1

2.4 Nesnel Akustik Parametreler için Optimum Değerler ve Kabul Edilebilir Değişim Aralıkları

Antalya Cam Piramiti'nin hacim akustiği değerlendirilmesi için bilgisayar simülasyon yöntemiyle hesaplanacak olan ve Bölüm 2.1'de açıklanan nesnel akustik parametreler ile ilgili optimum değerler ve kabul edilebilir değişim aralıkları ile ilgili değerler Tablo 2.2'de verilmiştir [25], [26].

Tablo 2.2 Nesnel akustik parametreleri için 1000 Hz'de önerilen optimum değerler ve değişim aralıkları

Nesnel Akustik Parametre	Sembol	ISO/CD 3382	Odeon
Erken Düşme Süresi	EDT (sn)	1.0 sn ile 3.0 sn arası	1.7sn ile 2.3 sn arası
Çınlama Süresi	T (sn)	-	1.7sn ile 2.3 sn arası
Ses Yüksekliği	G (dB)	-2 dB ile 10 dB arası	> 3 dB
Netlik, Açıklık	C80 (dB)	-5 dB' ile 5 dB arası	-1 ile 3 dB arası
Konuşmanın belirginliği	D50 (%)	0.3 ile 0.7 arası	-
Erken Yanal Enerji Oranı	LF80 (-)	0.05 ile 0.35 arası	> 0.25
Gecikmiş Ses Yüksekliği	LG80 (dB)	-	> 3dB
Konuşmanın Anlaşılabilirlik İndeksi	STI (-)	-	0.00–0.30 Kötü 0.30–0.45 Zayıf 0.45–0.60 Orta 0.60-0.75 İyi 0.75-1.00 Çok İyi

BÖLÜM 3: ANTALYA CAM PİRAMİTİ’NİN HACİM AKUSTİĞİNİN BİLGİSAYAR SİMÜLASYON YÖNTEMİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Hacim akustiği analiz çalışmalarında nesnel akustik parametrelerin hesaplanması için günümüze kadar kullanılan geometrik, istatistiksel ve ölçekli model yöntemlerinin yerini gerçek duruma oldukça yakın sonuçlar veren bilgisayar tabanlı simülasyon programları almaya başlamıştır. Akustik simülasyon programlar içerisinde sanal kaynak ve ışın tarama yöntemlerini birlikte kullanan bileşik hesap yöntemlerine dayanan programlar daha çok tercih edilmekteler. Bunun nedeni hacim akustiği ile ilgili tüm hesaplama, değerlendirme ve tasarım süreçleri bilgisayar simülasyon programlarının kullanımıyla parasal yönden ucuzlaması, zamansal olarak kısalması ve buna rağmen gerçeğe yakın sağlıklı sonuçlar elde edildiğinin doğrulanmasıdır.

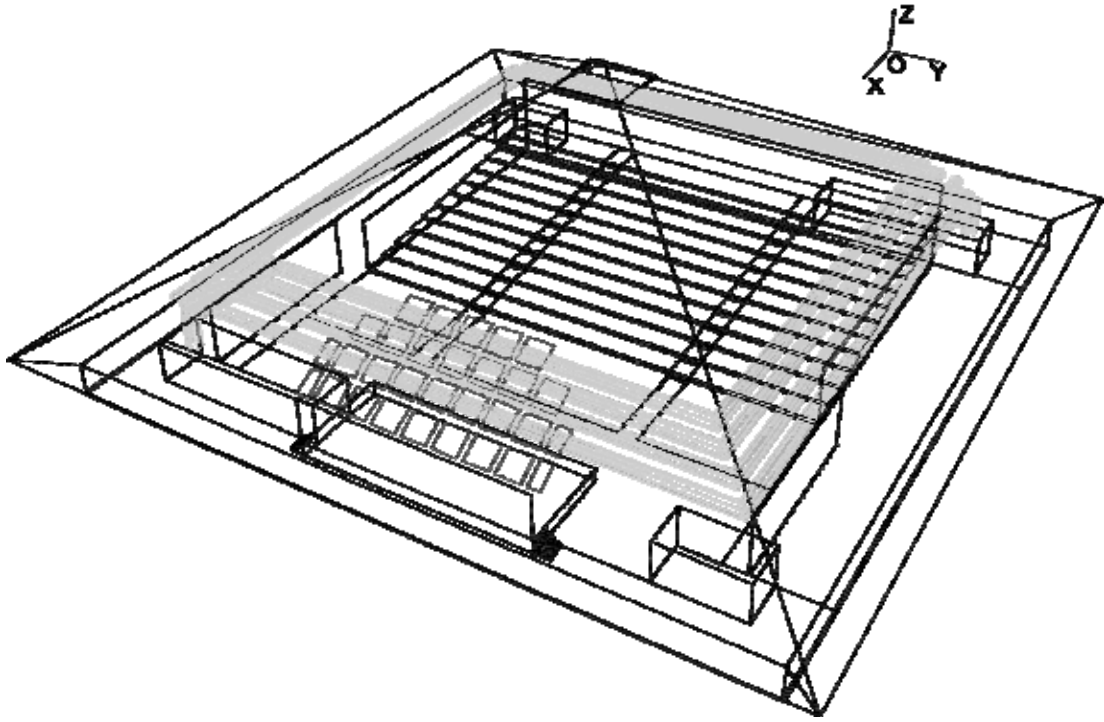
Bu sebeple 35,000 m³ gibi büyük bir hacme sahip Antalya Cam Piramiti’nin üç boyutlu modeli ile hacim akustiğinin Bölüm 2’de açıklanan akustik parametreler çerçevesinde değerlendirilmesi için bir bilgisayar akustik simülasyon programı kullanılmasına karar verilmiştir.

3.1 Bilgisayar Destekli Akustik Simülasyon Yönteminin Açıklanması

Bu çalışmada, Danimarka Teknik Üniversitesi Akustik Bölümü uzmanları tarafından hazırlanan ve bileşik hesap yöntemine dayalı çalışan, bilimsel olarak doğruluğu ve hassasiyeti kanıtlanmış ODEON Ver. 7.0 Hacim Akustiği Programı kullanılmıştır. Çalışma için öncelikle Antalya Cam Piramiti’nin mimari müellifi Y. Müh. Mimar Yaşar Marulyalı’dan temin edilen mimari proje doğrultusunda Architectural Desktop 2006 programıyla üç boyutlu yüzey modeli oluşturulmuştur (Şekil 3.1). Modelin ODEON programına yüklenmesinden sonra üç boyutlu geometride yanlışlıkların taranması (3D Geometry Debugger) komutuyla modelin doğruluğu tetkik edilmiştir. ODEON ile güvenilir sonuçlar elde etmek için modelde üst üste gelen, tekrarlanan ya da birleşmeyen yüzeyler bulunmamalı. Daha sonra modelin ışın sızdırmazlık testi yapılmıştır. Bunun için programın tanımlamış olduğu yüzeylere %20 emicilik verilip, mekanın herhangi bir yerine de bir noktasal kaynak atanarak üç boyutlu ışın taraması

tetkiği (3D Investigating Ray-tracing) komutuyla modelin ışın sızdırmazlık doğrulaması yapılmıştır.

ODEON programı gibi bileşik hesap yöntemlerini kullanarak hesap yapan simülasyon çalışmalarında karar verilmesi gereken en önemli parametreler; ilk yansımalarından gecikmiş yansımalara geçiş için gereken sanal kaynakların yansıma derecesi ile ışınla tarama sırasında tarama yapacak ışın sayısı ve her bir ışının kaç kere yansıyacağının doğru seçilmesidir. Doğru alınması gereken diğer önemli bir karar da gecikmiş yansımaların hesaplanmasında kullanılacak yüzey saçıcılık katsayıları.



Şekil 3.1 Antalya Cam Piramiti'nin üç boyutlu modeli

3.2 ODEON Bilgisayar Programının Dayandığı Hesap Yöntemleri

ODEON sanal kaynak ve ışın tarama yöntemlerini birlikte kullanarak bileşik hesap yöntemiyle çalışan bir hacim akustiği programıdır. Bu yöntemlere dayalı çalışma prensipleri aşağıdaki gibi açıklanabilir:

Işın tarama (Ray-tracing) Yöntemi: Herhangi bir noktasal kaynaktan yayılan ses ışınları, yansımalara uğrayarak hacmi tarayıp hacimle ilgili geometrik bilgiler (yüzeylerin listesi) üretmekte ve yüzeylerde oluşan sanal kaynakları tespit etmektedirler. Belirli bir ışının tarama sürecinin bitişi genellikle; ya ışının maksimum

tarama yapma süresine (impulse response length) veyahut ışının maksimum yansıma sayısına (maximum reflection order) bağlıdır. Aşağıda açıklanan bu hesap parametreler belirlenmeden ışın taraması yapılamaz. Program, ışın taraması sonucunda hacim geometrisine bağlı oluşan ses alanındaki erken ve gecikmiş yansımalarla neden olan yüzeylerle ilgili bilgileri sürekli olarak bilgisayarın sabit diskine kaydedip daha sonra seçilen herhangi bir alıcı noktasının konumuna bağlı olarak analizi için kullanmaktadır. Işın taramasına başlamadan önce aşağıda açıklanan dört hesap parametrenin ve arka plan gürültüsü ile ilgili kabullerin belirlenmesi gerekmektedir.[28]

Taramada kullanılacak ışın sayısı (number of rays): Seçilen nokta sinyal parametresine göre ODEON, ışın sayısına gıyaben bir öneride bulunmaktadır. Bu sayı hacmin en boy oranı ile geometrisindeki yüzey sayısına göre türetilmiştir. Ancak hacmin büyüklüğünden dolayı erken düşme zamanı (EDT) ve çınlama süresinin (T) doğru hesaplanması için önerilen ışın sayısının 2, yüzey sayısının ise 114 katı alınarak toplam 70000 ışın sayısı ile tarama yapılmıştır. Çalışma ‘engineering’ nokta sinyal parametresi ve ‘lambert’ saçıcılık yöntemine dayalı yapılmıştır.

Bir ışının maksimum yansıma sayısı (maximum reflection order): Bir yüzeye çarptıktan sonra ışınların yansıma sayılarını belirten parametredir. Çalışmada ODEON’un önerdiği maksimum 2000 yansıma sayısı alınmıştır.

Bir ışının maksimum yansıma süresi (impulse response length): Işınların kaynaktan yayıldıktan sonra tamamen yutulmasına kadar geçen süre. Sağlıklı sonuçların elde edilmesi için ya çınlama süresi kadar veyahut en az 2/3’ü kadar alınmalıdır. Çalışmada maksimum yansıma süresi 3000 ms olarak kabul edilmiştir.

Sanal kaynakların yansıma derecesi (transition order): İlk yansımaların hesaplanması için kullanılacak sanal kaynakların derecesini belirtmekte olup, bu derecenin üzerinde gerçekleşen yansımaların enerjileri gecikmiş yansımalarla katılmaktadır. Model düzgün yüzeylerden oluşan sade bir forma sahip olduğu için ilk yansımaların enerjisinin hesaplanmasında 2. dereceye kadar olan sanal kaynakların kullanılmasına karar verilmiştir.

Arka plan gürültüsü: Konuşma anlaşılabilirliği parametresi olan Konuşma Anlaşılabilirlik İndeksinin hesaplanabilmesi için ortam gürültüsü değerleri

belirtilmelidir. Bu nedenle arka plan gürültüsü için NCB 30 gürültü kriter değerleri kabul edilmiştir.

Sanal Kaynak (Imge-Source) Yöntemi: Noktasal kaynaktan çıkıp erken yansımalarla neden olan ışınlar sanal aynalanma ile yansydıkları için diğler ışınlardan farklı incelenmektedir. Eğer maksimum yansıma sayısı (maximum reflection order) ışın taraması öncesi belirtilen sanal kaynakların yansıma derecesinden (transition order) küçük veya eşitse, hacim yüzeylerinde oluşan sanal kaynaklar tespit edilmektedir. Sanal kaynağın yansıma derecesinin üzerinde kalan yansımalar saçıcılık katsayısını hesaba katmak için gecikmiş yansımalar 'late ray' olarak yansımaktadır [26].

3.3 Simölasyon Çalışması için Yapılan Kabuller

Bileşik hesap yöntemi ile hacmin sinyal tepkisi diyagramı hesaplanarak hesap parametrelerinin doğruluğı yapıldıktan sonra bu çalışmanın amacına hizmet edecek nesnel akustik parametrelerin hesaplanabilmesi için hacim, malzeme ve ses kaynağı ile alıcılar için bazı kabullerin yapılması gerekmektedir.

3.3.1. Hacim Kabulleri

Simölasyon çalışması için Madde 3.1'de belirtildiğı gibi Antalya Cam Piramiti'nin mimari projesi kullanılarak 3 boyutlu modeli yapılmıştır. Simölasyon programının düzlemsel yüzeyler prensibine dayalı çalışmasından dolayı sözkonusu model basit geometrik yüzeyler kullanılarak yapılmıştır (Bkz. Şekil 3.1). Modellerde fazla ayrıntı ve detayın belirtilmesi geometriğı karmaşık hale getirip yüzey sayısını arttırdığı için hesaplama sürecini uzatmaktadır. Hesaplama sürecinin sağlıklı çalışması için yüzeylerin doğru tanımlanması oldukça önemlidir. Program, hesaplamalarda sesi enerji olarak kabul etmekte ve ses herhangi bir yüzeye çarpınca geliş açısı hesaba katılmaksızın belirtilen yutuculuk katsayılarına göre yutulmaktadır. Yüzeylerin yutuculuk katsayısına (α) bağılı olarak ışınların enerjisinde azalma meydana gelmektedir. Yüzeylerden yansıyan ışınların enerjisi sinyal tepkisi diyagramına kaydedilmektedir. Bu prensipler doğrultusunda hacmin modellenmesinde esas alınan kabuller aşağıda özetlenmiştir:

a) Hacmin boyutları: Antalya Cam Piramiti'nin Toros Salonu Bölüm 1.2'de açıklandığı üzere 55x55 m boyutlarındaki yaklaşık 3025 m²'lik bir oturma alanına

sahiptir. Bu alanı örten piramit biçimindeki uzay sistem çelik çatı, yapıyı çevreleyen 24 adet 3.20 m yüksekliğindeki betonarme kolonun üzerine oturmaktadır. Çatının en üst noktası ile döşeme arası 22.50 m , en alçak noktası olan saçak ile döşemenin arası 2.70 m yüksekliğindedir. Mekânın toplam iç hacmi 35000 m³'tür. (Bkz. Ek A)

b) Hacmin yüzeyleri: Yapı, fonksiyonundan dolayı form ve malzeme anlamında yalın bir mimariye sahip olduğu için modelin hacim geometrisini toplam dokuz farklı türden yüzeyle tanımlanabilmiştir. (Bkz. Şekil 3.3)

Çatı ve Cephe Kaplaması: Toplam 7000 m²'lik strüktürel silikonlu ısı cam kaplama alanı ile hacmin en büyük yüzeyi. Çatı strüktürünü oluşturan uzay çatı fazla ayrıntı içeren karmaşık geometriye sahip olduğu için modele dâhil edilmemiştir. Onun yerine çatı kaplaması olan ısıcam yüzeye saçıcılık özelliği verilmiştir.

Havalandırma kanalı yüzeyleri: Uzay çatının çelik makasları arasından yapının dört bir tarafını 0.9 m çapında toplam 560 m uzunluğunda sacdan imal edilmiş havalandırma kanalları dolaşmaktadır.

Betonarme perde duvar yüzeyleri: Hacmin dört köşesinde bodruma inen asansör ve merdiven kovalarının 3.50 m yüksekliğindeki üzeri boyanmış beton perde duvardır.

Akustik duvar yüzeyleri: Çelik konstrüksiyon taşıyıcılara monte edilmiş gerektiğinde sökülebilen 5,0 m yüksekliğindeki akustik duvarlardır.

Döşeme yüzeyi: Toplam 1600 m² beton döşeme üzeri linolyum kaplama dolaşım alanıdır.

Podyum yüzeyi: Toplam 12 kademeden, her bir kademe 0.26 m yükseklik farkıyla dinleyici alanına kurulan ve gerektiğinde kaldırılan teleskopik podyumdur.

Dinleyici alan yüzeyleri: Toplam 1100 m² dinleyici alanıdır.

Sahne yüzeyi: Yerden 1.00 m yüksekliğinde ve 150 m² alana sahip çelik konstrüksiyon üzeri ahşap kaplama altı boş gerektiğinde sökülebilen sahnedir.

Yansıtıcı Panel Yüzeyleri: Sahne üzerinde her biri 2 x 2 m boyutlarında olan toplam 30 adet yansıtıcı panellerdir.

3.3.2. Yüzeylerin Malzeme Kabulleri

Simülasyon çalışmalarında karar verilmesi gereken en önemli parametrelerden biri erken yansımalar için sanal kaynakların yansıma derecesinin doğru belirlenmesidir.

İkinci önemli karar da yansıma derecesinin üzerinde gerçekleşecek yansımaların gecikmiş yansımalar olarak hesaplanması sırasında kullanılacak yüzeylere verilen saçıcılık katsayılarının doğru tanımlanmasıdır. Bir hacmin ses alanındaki erken yansımaların enerjisi doğrudan hacmin geometrisine ve o geometriyi tanımlayan yüzeylerin yutuculuk ve saçıcılık özelliklerine bağlıdır. Yüzeylerin yutuculuk derecesi erken yansıma, saçıcılık özellikleri ise gecikmiş yansıma enerjilerinin hesaplanmasında önemlidir. Akustik literatüründe, Bölüm 1.1’de de belirtildiği gibi malzemelerin yutuculuk değerlerinden daha fazla ses geçiş kaybı ile ilgili bilgiler bulunmaktadır. Bu nedenle simülasyonu yapılacak hacimler ile ilgili sağlıklı sonuçlar elde edebilmek için hacim geometrisini oluşturan yüzeylere gerçek hallerine uygun malzemeler atanmalıdır.

Sözkonusu çalışmada kullanılacak modelin hacim geometrisini oluşturan yukarda açıklanan toplam 10 yüzeye aşağıdaki Tablo 3.1’de belirtilmiş olan malzemeler ve saçıcılık katsayıları tanımlanmıştır.

Tablo 3.1: Hacim yüzeylerine atanan malzemeler, yutuculuk ve saçıcılık özellikleri

#	Yüzey Adı	Malzeme Kodu	Yutuculuk Katsayısı (α)							Saıcılık Katsayısı (β)
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	
1	Çatı Kaplama	2381	0.02	0.06	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.60
2	Cephe Kaplama	2381	0.02	0.06	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.30
3	Havalandırma Kanalı	805	0.30	0.25	0.20	0.10	0.10	0.15	0.15	0.20
4	Betonarme Duvar	102	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.10
5	Akustik Duvar	800	0.25	0.15	0.10	0.09	0.08	0.07	0.07	0.10
6	Döşeme	503	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.10
7	Podyum	2388	0.40	0.30	0.20	0.17	0.15	0.10	0.10	0.10
8	Dinleyici Alanı	2368	0.35	0.45	0.57	0.61	0.59	0.55	0.55	0.30
9	Sahne	2388	0.40	0.30	0.20	0.17	0.15	0.10	0.10	0.10
10	Yansıtıcı Panel	2033	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.10	0.11	0.10

Strüktürel silikonlu cam çatı kaplamasını taşıyan çelik uzay kafes çok fazla ayrıntı ve elemandan oluşan bir yüzey oluşu için ondan kaynaklanacak yansımalar için çat kaplama yüzeyine 0,6 değerinde saçıcılık katsayısı tanımlanmıştır. Dinleyici alanında da konferans sandalyelerinin oluşturduğu düzensiz yüzey yapısından dolayı dinleyici olarak tanımlanan yüzeye de 0,3 değerinde saçıcılık tanımlanmıştır. Salonun dolu

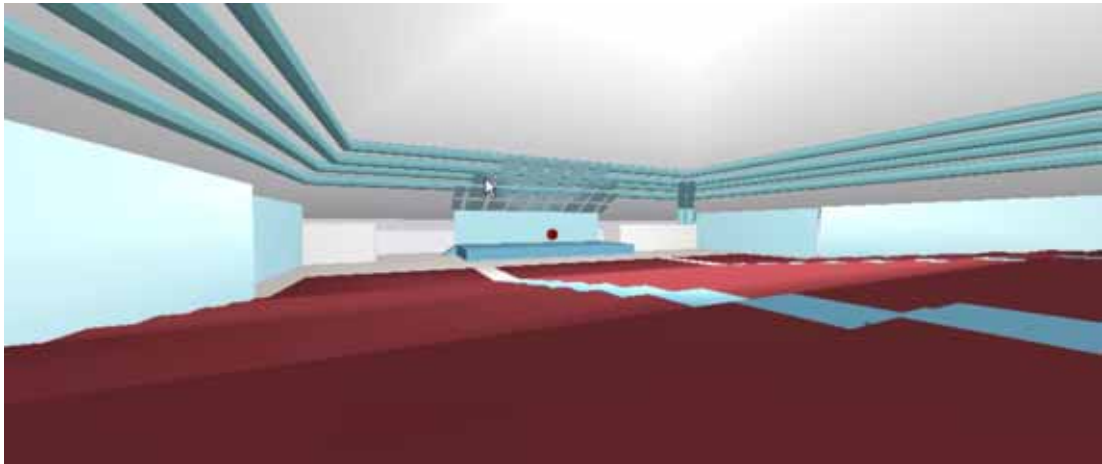
olduğu hallerdeki incelemelerde dinleyicilerin farklı oturma yükseltilerinden dolayı bu katsayı 0,7'ye kadar çıkmaktadır. Dairesel formlarının oluşturduğu konkav yüzeylerden dolayı havalandırma kanalları için de 0,2 saçıcılık belirtilmiştir [26].

3.3.3. Ses Kaynağı ve Alıcılarla İlgili Kabulleri

Sözkonusu hacmin simülasyon çalışması ile yapılacak hesaplamalar sonucunda hacim akustiğinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi ve değerlendirilmesi için hacim genelinde toplam 20 alıcı ile sahne üzerinde 1 ses kaynağı kullanılmıştır.

- **Ses Kaynağı ile ilgili kabulleri**

Ses kaynağı olarak frekanslar göre değişim göstermeyen (omni) beyaz gürültü yayımlayan nokta kaynak tipi bir ses kaynağı seçilmiştir. Hacimde ses yüksekliği (G-strength) parametresinin hesaplanabilmesi için bu kaynağa 31dB ses gücü de tanımlanmıştır [25].



Şekil 3.2 Kaynağın üç boyutlu modelde konumu

Kaynak ile ilgili yapılan kabuller aşağıdaki gibidir:

Kaynağın sahneden yüksekliği	: 1.4
Kaynak- sahne önü uzaklığı	: 1.5 m
Kaynak-arka duvar uzaklığı	: 5.0 m
Kaynak- 1. yan duvar uzaklığı	: 20.0 m
Kaynak- 2. yan duvar uzaklığı	: 20.0 m
Kaynak- tavan uzaklığı	: 7.0 m
Kaynak- ilk dinleyici uzaklığı	:13.0 m

- **Alıcılarla ilgili kabuller**

Toros Salonu'nun kapasitesi itibarıyla büyük bir alanı ve hacmi kapsamasından dolayı hacimde oluşan ses alanının tüm nesnel akustik ve tasarım parametrelerine göre davranışını ayrıntılı olarak inceleyebilmek için hacim genelinde toplam 4 grupta 20 alıcı nokta belirlenmiştir (Şekil 3.3). Hacim çok büyük ve mükemmel bir simetriye sahip olması dolayısıyla 20 alıcı salonun bir yarısına konumlandırılmıştır.

Alıcı noktalarında hesaplanan akustik parametrelerinin gerçeğe yakın olmalarını sağlamak için, gerçek durumun tespiti için kullanılan ölçüm yöntemlerinde izlenen ISO 3382 standardındaki alıcılarla ilgili belirtilen tanımlara uyulmalıdır. Alıcılarda direkt sesin güçlü tesirinden sakınarak hesaplamalarda daha sağlıklı çınlama süresi sonuçlarının elde edilebilmesi için alıcı ve kaynak arasındaki minimum uzaklığının ISO 3382'ye göre aşağıdaki gibi ilişkilendirilmesi gerekmektedir:

$$d_{min} = 2 \sqrt{\frac{V}{c \times T}} \quad (3.1)$$

V: mekânın hacmi m^3 cinsinden

c: sesin hızı m/s cinsinden

T: beklenen çınlama süresi tahmini saniye (s) cinsinden

Yukarıdaki formül ile sözkonusu simülasyon çalışması için yapılan aşağıdaki hesaplamada ilk alıcı ile ses kaynağı arasında minimum 11.7 m uzaklık olması gerektiği belirlenmiştir [26].

$$d_{min} = 2 \sqrt{\frac{35000}{340 \times 3}} = 11.7m$$

$$V = 35000 m^3$$

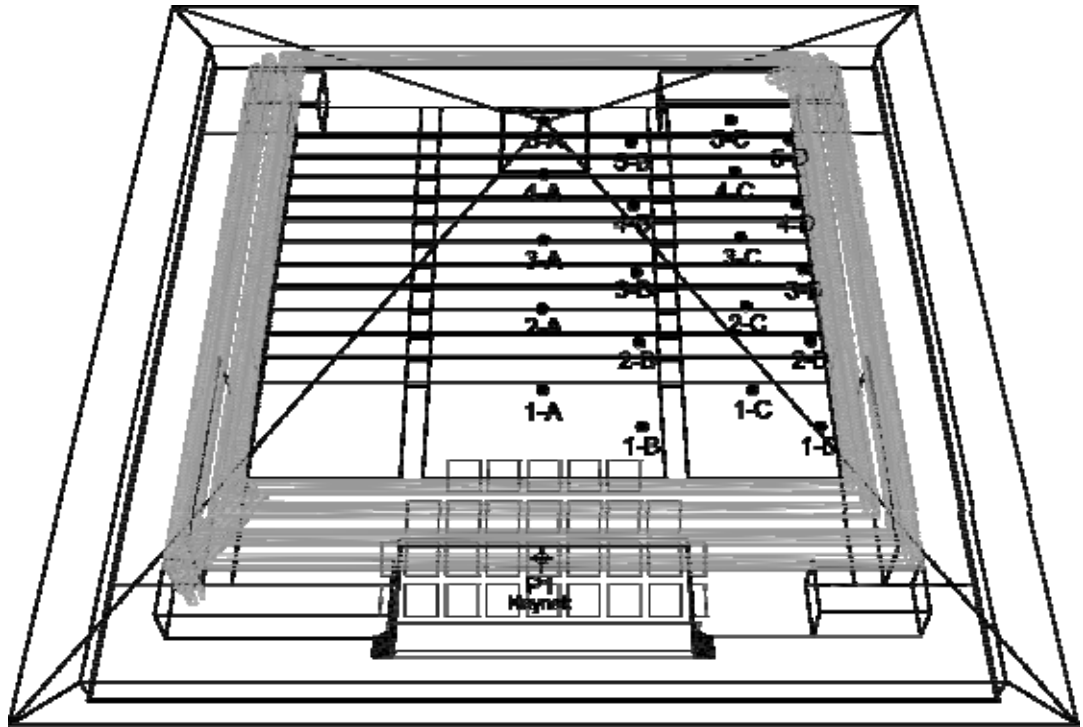
$$c = 340 m/s$$

$$T = 3.0 s$$

Buna göre hacim içinde tanımlanan 20 alıcının ses kaynağı ve yakın fiziksel çevreleriyle ilişkileri aşağıdaki Tablo 3.2'de özetlenmiştir.

Tablo 3.2 Alıcıların özellikleri ve hacim içindeki konumu

Alıcı #	Alıcı Grubu	Alıcı Yüksekliği (m)	Alıcı-Kaynak Uzaklığı (m)	Alıcı-Duvar 1 Uzaklığı (m)	Alıcı-Duvar 2 Uzaklığı (m)	Alıcı-Duvar 3 Uzaklığı (m)
#1	B	1.2	13.0	13.5	27.5	29.0
#2	A	1.2	14.0	20.5	20.5	26.0
#3	D	1.2	22.5	1.00	40.0	29.0
#4	C	1.2	20.5	5.5	35.5	26.0
#5	B	1.2	19.5	13.5	27.5	22.0
#6	A	1.2	21.0	20.5	20.5	19.0
#7	D	1.2	26.5	1.0	40.0	22.0
#8	C	1.2	26.0	5.5	35.5	19.0
#9	B	1.2	25.0	13.5	27.5	16.0
#10	A	1.2	27.0	20.5	20.5	13.0
#11	D	1.2	31.0	1.0	40.0	16.0
#12	C	1.2	31.0	5.5	35.5	13.0
#13	B	1.2	31.0	13.5	27.5	10.0
#14	A	1.2	33.0	20.5	20.5	7.0
#15	D	1.2	36.0	1.0	40.0	10.0
#16	C	1.2	36.5	5.5	35.5	7.0
#17	B	1.2	36.5	13.5	27.5	4.0
#18	A	1.2	38.0	20.5	20.5	2.0
#19	D	1.2	41.0	1.0	40.0	4.0
#20	C	1.2	41.0	5.5	35.5	2.0



Şekil 3.3 Kaynak ve 20 alıcının hacim içindeki konumu.

3.4 Simülasyon Sonuçları ve Analizler

Bir önceki üç bölümde tarif edilen yöntem ve kabuller doğrultusunda Odeon simülasyon programı çalıştırılarak Antalya Cam Piramiti için Bölüm 2’de açıklanan hacim akustiği parametreleri hesaplandı.

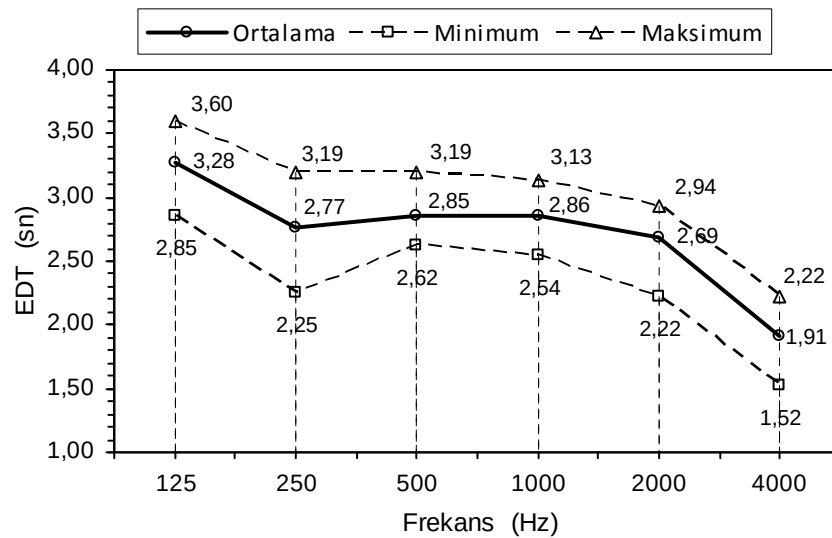
Bu bölümde bir omni nokta tipi ses kaynağı ile 4 grupta tanımlanan 20 alıcının her biri ve hacmin geneli için elde edilen akustik parametrelerinin sonuçları açıklanmakta ve hacim akustiği analizleri yapılmaktadır..

3.4.1 Hacmin Ortalama Simülasyon Sonuçları

Antalya Cam Piramiti’nin akustik performansının değerlendirilmesi için esas alınan altı hacim akustiği parametresiyle ilgili elde edilen ortalama değerler aşağıda açıklanarak optimum değerler ile karşılaştırılarak performans analizi yapılmakta. Hacmin minimum ve maksimum akustik parametre değerleri Ek B’de verilmiştir.

Erken Düşme Süresi (Early Decay Time – EDT)

Hacimde sesin ilk 10 dB düşüşü için geçen süreyi tanımlayan EDT değerleri hacmin ilk yansımalarına dayandığı için hacim geometrisinin daha detaylı incelenmesine olanak sağladığı için akustikçiler tarafından tasarım veya analiz çalışmalarında ana parametre olarak ele alınmaktadır.



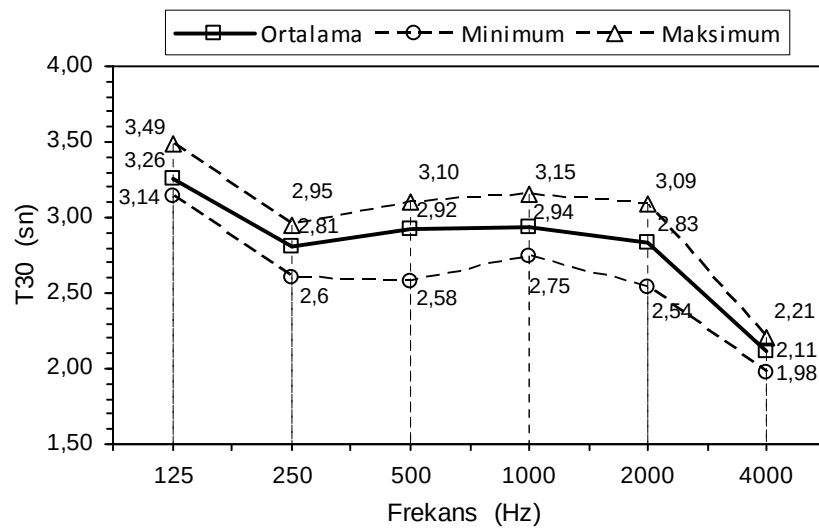
Şekil 3.4 Antalya Cam Piramiti’nin erken düşüş süresi (EDT) simülasyon değerleri

Antalya Cam Piramiti’nin erken düşüş süresi (EDT) için hesaplanan ve Şekil 3.4’te belirtilen değerler, 4000 Hz dışındaki tüm frekanslarda bir hayli yüksek olup adeta

bir katedralinkine benzer oldukça çınlayan bir hacmin varlığına işaret etmektedirler. En uzun süren düşüş alçak frekanslarda 125 Hz’te, 3.28sn olarak hesaplanmıştır. EDT, orta frekanslarda yine yüksek olup 500Hz ve 1000 Hz’te 2.85 sn’ye tekabül eden eşzamanlı düşüş süreleri hesaplanmıştır. 2000 Hz’ten sonra yüksek frekanslarda düşüş süresi ivme kazanmakta ve en düşük EDT 1,91 sn olarak 4000 Hz için hesaplanmıştır. Bir hacimde alçak frekanslarda yüksek, yüksek frekanslarda ise düşük EDT değerleri konuşma anlaşılabilirliği (SI) ve konuşma netliği (C80) parametrelerini olumsuz etkilemektedir. Bunun nedeni konuşmanın anlaşılabilirliğinde yüksek frekans seslerin etkin olması ve alçak frekanslarda EDT değerinin artmasıyla bas seslerin konuşmayı maskeleye etkisinin de artmasıdır. Sonuç olarak Antalya Cam Piramiti için elde edilen EDT değerleri çok amaçlı kullanılan hacimlerin akustik ihtiyaçlarının gerektirdiği EDT değerlerinden oldukça yüksek sonuçlanmıştır.

Çınlama Süresi- T, T30 (Reverberation Time – T30)

Bir hacmin T parametresinin hesaplanmasında kullanılan 2.1 denkleminde belirtilen hacimle doğru, fakat hacmin yutuculuk özellikleri ile ters orantılı davranış Antalya Cam Piramiti için elde edilen T değerlerine aynen yansımış olduğu Şekil 3.5’te görülmektedir. Antalya Cam Piramiti’nin geometrisini oluşturan 7000m²’lik yansıtıcı cam yüzeyler ile kaplanan 35,000 m³’lük hacmi için, bir katedralin veya kilisenin akustiğini yansıtan oldukça yüksek T değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.5 Antalya Cam Piramiti’nin çınlama süresi T simülasyon değerleri

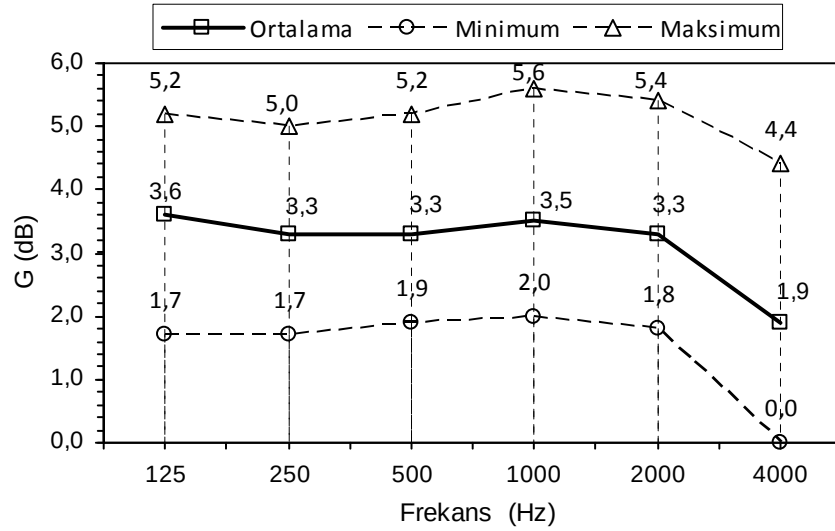
En yüksek deęer alçak frekanslarda 125 Hz için 3,26 sn olarak hesaplanmıřtır ve 250 Hz'te 0,45sn'lik ani bir dūřuř yařanmıřtır. Orta frekanslarda 2,9 sn civarında seyreden eřzamanlı dūřuř grafięinden sonra yüksek frekanslarda 2000 Hz'ten 4000 Hz'e yeniden ancak daha sert olan 0.72 sn'lik bir dūřuř oluřmuřtur. 250 Hz'te yařanan ani T dūřuřünün nedeni, hacim geometrisinin bu frekanstaki toplam yūzey yutuculuęu orta frekanslardaki yūzey yutuculuęundan daha yüksek olmasıdır. Ancak yüksek frekanslardaki dūřuř davranıřı Antalya Cam Piramiti gibi būyūk iç mekânların tūmūnde gōrūlmektedir ve mekân içinde bulunan būyūk hava hacminin yutuculuęundan dolayı kaynaklanmaktadır [8].

Eęer bir hacmin iki eęimli dūřuř eęrisi yoksa EDT ve T deęerleri birbirine eřit olmaktadır. Birçok durumda erken seslerin dūřuřu gecikmiř seslerin dūřuřunden daha çabuk gerçekleřmektedir ve bōylece EDT deęerleri için T deęerlerinden daha dūřuk sonuçlar elde edilmektedir. Sōz konusu hacmin simūlasyonunda yüksek ve orta frekanslar için elde edilen EDT deęerleri T deęerlerinden daha dūřuktur. Bu fark yüksek ve orta frekanslarda yaklařık olarak 0,1 sn iken, yüksek frekanslarda gittikçe artmakta ve 2000 Hz'te 0.14sn 4000 Hz'te ise 0.2 sn olmaktadır. EDT ve T arasında Hacimdeki ses canlılıęının algılanmasını etkilemeyecek olan EDT ve T deęerleri arasındaki fark eřięi 0.1 sn'dir [29]. Konu ūzerinde yapılan çalıřmalarla alçak tavanlı konser salonlarda EDT'nin T'den 0,4 sn kadar (yani fark eřięinin 4 katı kadar) kısa olabileceęini belirtmiřtir. Ancak bōyle bir farkın, dūřuk EDT'den dolayı kaynaklanacak canlılık kaybı ve yüksek T'nin arttıracāęı ses dolgunluęu sonucunda oluřabilecek sesin amurlařması hissi ile deneyimli deneyimsiz tūm dinleyiciler tarafından açıkça duyulabileceęi vurgulanmıřtır [30]. Genellikle EDT ve T deęerlerinin birbirine eřit olması tercih edilmektedir, ancak mūkemmel akustik kaliteyle nitelendirilen konser salonlarında EDT'nin T'den %10 daha yüksek olduęu tespit edilmiřtir [10]. Buna raęmen Antalya Cam Piramiti'nde olduęu gibi birçok hacimde EDT deęerleri T deęerlerinden daha kısadır [30] ve bu tarz sapmaların oluřması bařlıca hacim geometrisi ve biçim karmařıklıęı ile iliřkilendirilmektedir [31].

Ses Yūkseklēęi - G (Strength, Loudness - G)

Sōz konusu hacmin ses yūkseklēęi (G) parametresinin hesaplanabilmesi için simūlasyon çalıřmasında kullanılan omni nokta tipi ses kaynaęına 31 dB ses gūcū

tanımlanarak Şekil 3.6’da ifade edilen ses basınç düzeyleri (SPL) G olarak dB cinsinden elde edilmiştir. Direkt ses ile yansıyan seslerin gücünden oluşan G değeri, Şekil 3.4’te EDT ve Şekil 3.5’te T30 değerleri ile doğru orantılı bir davranış içinde olduğu görülmektedir. Hacimle ve kaynağa olan mesafe ile G değeri ters orantılıdır, yani hacim büyüdükçe veya ses kaynağından uzaklaştıkça sesin gücü veya basınç düzeyi de azalmaktadır. Hacimdeki ses düzeyini azaltan diğer faktör dinleyici alanının büyüklüğüdür, çünkü belli miktardaki bir ses enerjisinin onu paylaşacak olan kişilerin sayısına bölünmesi ses yüksekliğini belirleyen fonksiyonudur. Tüm bu faktörler göz önünde bulundurulduğunda, 2500 kişilik dinleyicili bir alanın sahip olduğu yutuculuğa ve salonun büyüklüğüne rağmen, elde edilen G değerlerinin gösterdikleri değişim grafiği ve performansın büyük ölçüde yansımış seslerle güçlendirildiği anlaşılmaktadır.



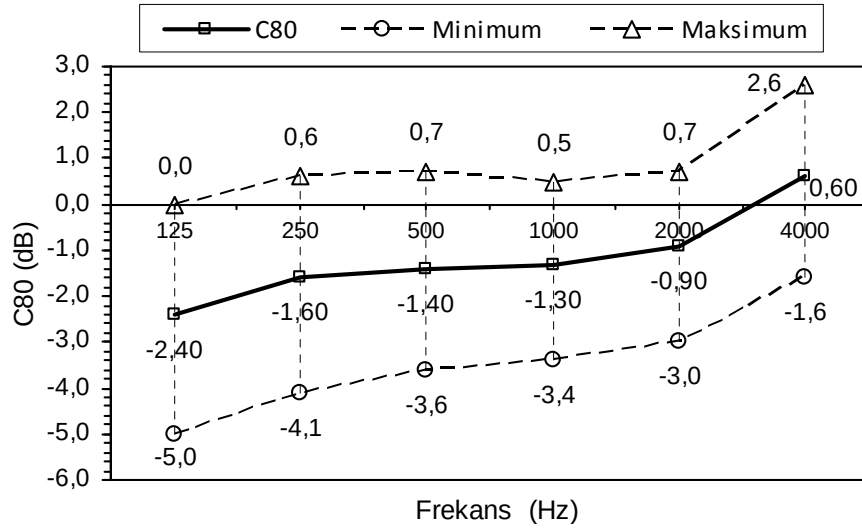
Şekil 3.6 Antalya Cam Piramiti’nin Ses Yüksekliği (G) simülasyon değerleri

Ses yüksekliği frekansın bir fonksiyonudur ve bu nedenle ses frekansı yükseldikçe G değerleri 4000Hz ve 8000 Hz’te Şekil 3.6’da görüldüğü gibi düşmektedir, alçak ve orta frekanslarda ise yeterli derecede yüksek olmasa da uygun değerler aralığında bulunmaktalar.

Sesin Açıklığı - Netliği (Clarity – C80)

Sesin açıklığı erken ses enerjisinin gecikmiş ses enerjisine logaritmik oranıdır ve (dB) cinsinden ifade edilmektedir. İlk yansımalarla ulaşan enerjiye bağlı olarak değişim göstermektedir ve eğer sesin büyük oranı direkt ses ve erken yansımalarla ulaşmaktaysa açıklık değeri yükselmekte, fakat gecikmiş yansımaların enerjisi daha

yüksek ise açıklık değeri azalmakta ve bu ilişki sonucunda çınlama süresi ile T ters orantılı olduğu anlaşılmaktadır. Bu ters orantı ilişkisi Antalya Cam Piramiti için hesaplanan ve aşağıda Şekil 3.7’de gösterilen C80 değerleri ile Şekil 3.5’te verilen T30 değerleri arasında görülmektedir. Elde edilen sonuçlardan da anlaşıldığı üzere orta ve alçak frekanslardaki yüksek T değerleri çınlayan bir ortamın varlığını belirttikleri için C80 değerleri bu frekanslarda düşüş görülmektedir. T değerlerinde 2000 Hz’ten sonra yaşanan ani düşüşler aynı frekanslardaki C80 değerlerine ani yükselişler olarak yansımıştır. Ancak C80 parametresi için elde edilen minimum, maksimum ve ortalama değerlerine bakılınca, hacmin ses düşüş sürecindeki gecikmiş yansımaların enerjilerinin oldukça yüksek olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.7 Antalya Cam Piramiti’nin Sesin Açıklığı (C80) simülasyon değerleri

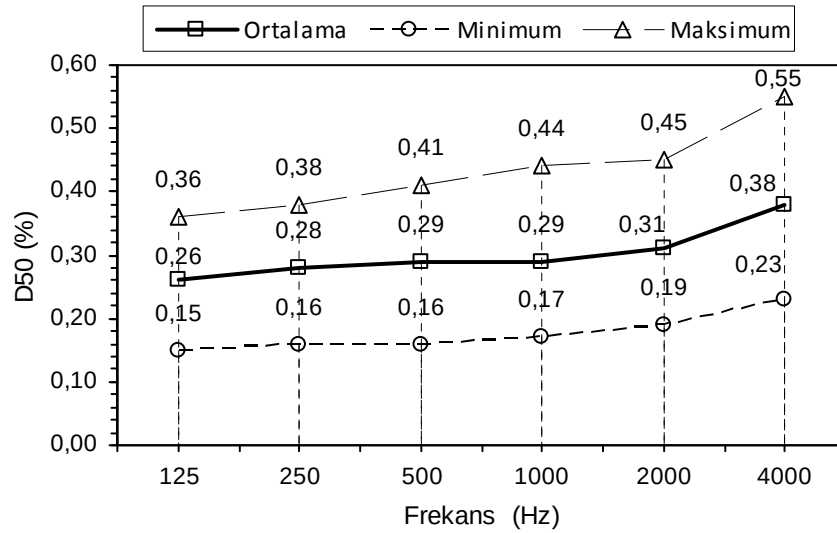
C80 parametresi için farklı kullanımlara göre farklı değer aralıkları tercih edilmektedir. Konuşma anlaşılabilirliği için 0 ile 4 arası değişen C80 değerleri uygun görülürken [19] Beranek’in çalışmalarında ise dinleyicisiz konser salonları için tam tersi -4 ile -1 arası değerler tercih edildiği belirtilmiştir. C80’nin konser salonlarında daha düşük değerlerde, yani çınlayan bir hacmin varlığını belirtecek değerlerde tercih edilmesinin nedeni, salonun dinleyici ile dolmasından sonra hacmin toplam yutuculuğunun artmasıyla düşme eğilimi gösterecek olan T değerleri C80 değerlerinin yükselmesine neden olmaktadır. Eğer dinleyicisiz konser salonlarında istenilen optimum C80 değerleri baştan sağlanılırsa, dinleyicili hallerinde T değerlerinde oluşacak düşüşlerden dolayı daha da yükselecek olan optimum C80 değerleri ile hacim canlılığını kaybederek sesin oldukça net ve açık algılandığı ölü bir mekana dönüşecektir [9]. Buna göre Antalya Cam Piramiti için elde edilen C80

değerlerinin yüksek T değerleri de esas alındığında müzik performansları için yeterli düzeyde oldukları anlaşılmaktadır, ancak konuşmanın açıklığı ve netliği için ideal koşulların çok ötesinde kalmaktadırlar.

Yapılan değerlendirmeler neticesinde öznel açıklık ve canlılık parametreleri için istenilen performansın elde edilebilmesi için T parametresinin her ikisini de tatmin edecek şekilde tasarlanması gerektiği anlaşılmıştır. Çok amaçlı kullanılan hacimlerde her iki öznel parametreyi sağlayabilmek adına açıklık için düşük EDT değerleri, canlılık için ise yüksek T değerlerinin tercih edilmektedir [10].

Konuşmanın Belirginliği (Definition- D50)

Konuşmanın belirginliği 50 msn zaman dilimi içerisinde gelen erken enerjinin toplam enerjiye lineer oranıdır ve % olarak belirtilmektedir. Erken ve toplam ulaşan enerjiye dayalı olduğu için EDT ile doğru ancak T ile ters orantılıdır.

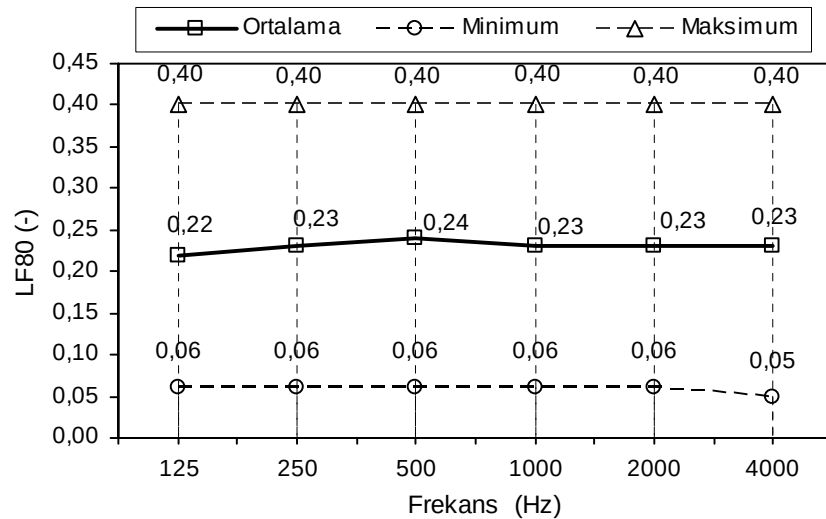


Şekil 3.8 Antalya Cam Piramiti'nin Belirginlik (D50) simülasyon değerleri

Konuşmanın belirginliği için istenilen ve 0,3 ile 0,7 aralığında değişen optimum değerlere uygun sonuçlar T değerlerinin düşüşe geçtiği yüksek frekanslarda elde edilmiştir (Şekil 3.8). Ancak orta ve alçak frekanslardaki yüksek T değeri konuşmanın belirginliği (D50) parametresinin performansını olumsuz etkilemekte olduğu belirlenmiştir. D50 parametresi için elde edilen sonuçlar neticesinde hacmin genelinde gecikmiş yansıma enerjisinin baskın olduğu ve konuşmanın anlaşılabilirliği için olumsuz bir hacim akustiğinin bulunduğu anlaşılmaktadır.

Erken Yanal Enerji Oranı (Early Lateral Energy Fraction Index – LF80)

Algılanan kaynağın genişlemesi ve hacimce kuşatılmışlık bir hacim içerisinde meydana gelen ve nesnel olarak ifade edilebilen iki önemli öznel mekansal etkidir ve uzun yıllardır farklı araştırmacılar tarafından farklı yayınlarda birbiriyle karıştırılmış ve mekansal algılama ile ilişkilendirilmiş. Ancak her ikisi de birbirinden bağımsız iki öznel mekansal etkidir. Algılanan kaynağın genişlemesi (ASW) parametresi nesnel olarak kulak arası karşılıklı ilişki katsayısı (inter aural cross correlation- $IAAC_E$) ve Barron'un 1981 yılında ortaya koyduğu erken yanal enerji oranı (LF80) parametreleri ile ölçülmektedir [19]. LF 80 parametresi direkt sestten sonraki ilk 80 ms içinde hacmin yan yüzeylerinden ulaşan enerjinin direkt sestten sonraki ilk 80 ms içinde ulaşan toplam ses enerjisine oranını ifade etmektedir ve performansı hacmin yan duvarlarının oluşturduğu hacim geometrisine bağlıdır. Sesin yanallığını etkileyen ve Bölüm 2.1.6'da belirtilen faktörlerin arasında en önemlisi hacmin büyüklüğü ve iki yan duvar arasındaki mesafedir. Bu nedenle eski dikdörtgen biçimli dar ve uzun salonların hacim akustik kalitesi günümüzdeki birçok geniş ve büyük kapasiteli salonlarından daha iyidir. Ancak Antalya Cam Piramiti için hesaplanan LF80 değerlerine bakılınca her ne kadar frekans bazında elde edilen maksimum LF80 değerleri istenilen optimum değeri sağlıyor olarak görünse de elde edilen minimum değerler o kadar düşük ki hacmin LF80 ortalaması 0,25 olan minimum kabul edilebilir değerin altında çekilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Antalya Cam Piramiti'nin LF80 simülasyon değerleri

LF80 için elde edilen 0,40 olan maksimum değerler ile 0,06 olan minimum değer arasındaki büyük fark, 40 m'lik salon genişliğinin LF80 parametresinin

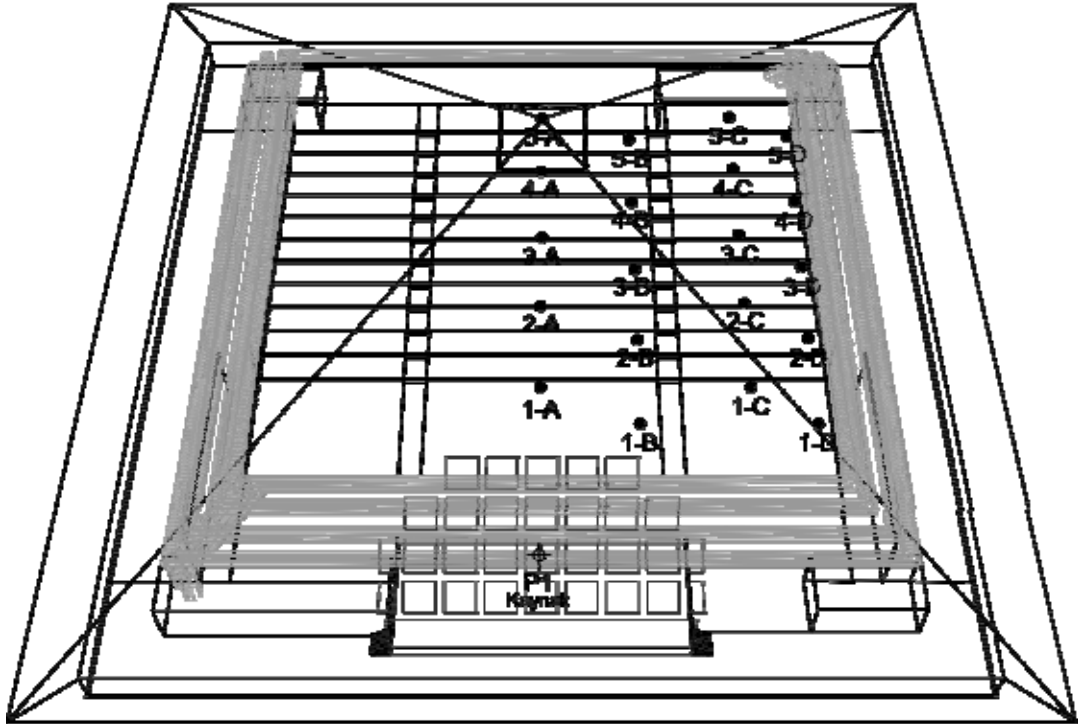
performansını belli başlı yerlerde olumsuz etkilediğini, yani bazı dinleyicilerin yanıl seslerin enerjisinden mahrum kaldığını diğerlerinin ise oldukça tatminkar olduklarını göstermektedir.

Konuşmanın Anlaşılabilirlik İndeksi (Speech Transmission Index – STI)

Antalya Cam Piramiti'nin konuşma anlaşılabilirlik indeksi hacmin bütününde “0,00” olarak hesaplanmıştır. STI, konuşma sinyali üzerindeki T ve arka plan gürültüsünün neden oldukları modülasyon değişimi esas alınarak hesaplanmaktadır. Söz konusu çalışmada T30 değerleri konferans ve kongre tipi kullanımlar için 1,0 - 1,3 sn optimum çınlama süresinin oldukça üzerinde çıkması STI değerinin hesaplanamamasına neden olmuştur. STI'nin “0,00” değerinde olması konuşma anlaşılabilirliğinin kötü olduğunu ifade etmektedir.

3.4.2 Hacimdeki 20 Alıcı Noktasının Simülasyon Sonuçları

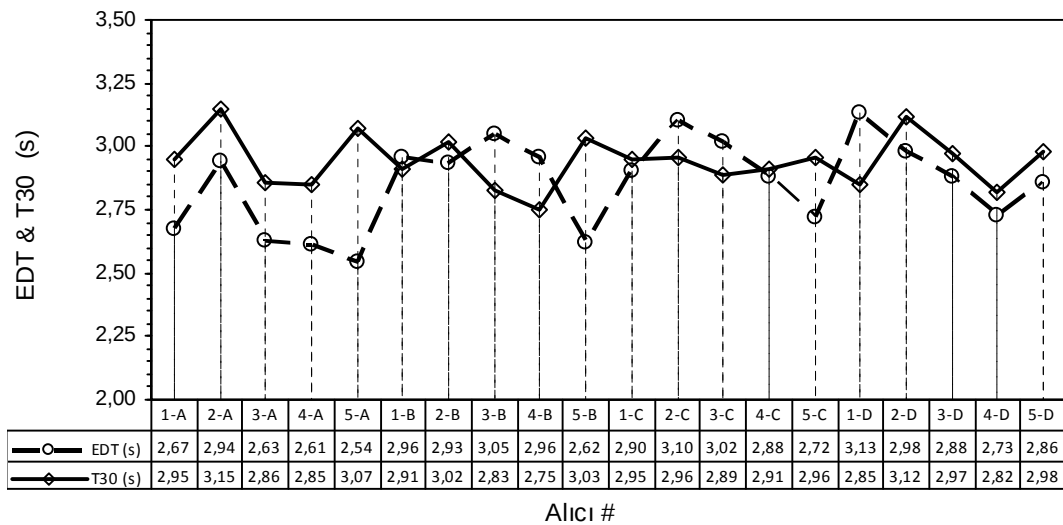
Bu bölümde Antalya Cam Piramiti'nin, simülasyon çalışmasında tanımlanan 1 kaynak ve 4 grupta (A,B,C,D) 1000 Hz bandında toplam 20 alıcı noktası için elde edilen ışın diyagramları, yansıma grafikleri ve nesnel parametrelerin sonuçları hacmin tasarım parametreleri ile ilişkilendirilerek hacim geometrisinin hacim akustiği üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Antalya Cam Piramiti'nin modelinde kaynak ve alıcıların konumu

Erken Düşme Süresi ve Çınlama Süresi (EDT - T30)

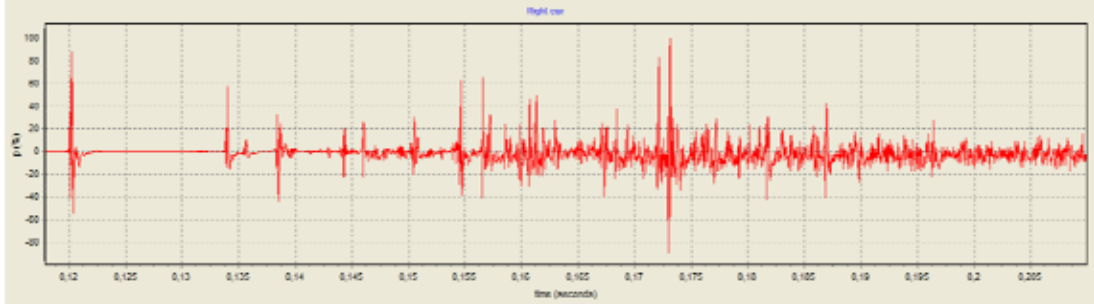
Bir önceki bölümde değerlendirilen hacmin ortalama EDT ve T değerleri, bu bölümde hacim içerisinde belirlenen 20 alıcı noktasındaki mekânsal değişimleri analiz edilmektedir. EDT ve T parametrelerinin ortalama değerlerine dayalı yapılan analizlerde alçak ve orta frekanslarda T değerlerinin EDT değerlerinden yaklaşık olarak 0,1 sn yüksek frekanslarda ise 0,7 sn kadar daha yüksek oldukları belirlenmiştir, hâlbuki EDT ve T parametreleri için ya birbirine eşit veya EDT/T oranının 1.1 kadar olması tercih edilmektedir. EDT ve T arasındaki böyle bir davranışın nedeni genellikle hacim geometrisi ve biçim karmaşıklığı ile ilişkilendirilmektedir [31], ancak açıkça anlaşılması için ortalama değerlerinin hesaplanmasında kullanılan 20 alıcı noktasının her birindeki EDT ve T parametrelerinin sergiledikleri mekânsal değişimin analizi yapılmalıdır. Simülasyon çalışmasında 4 grupta belirlenen 20 alıcı için hesaplanan EDT ve T değerlerinin arasındaki ilişki Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Hacmin 20 alıcının konumuna göre EDT ve T değerleri

Grafikte belirtilen EDT ve T değerlerinin değişimleri, her alıcının hacmin geometrisine bağlı konumuna ve yansıma grafiklerine göre incelenmiştir. Birçok alıcıdaki T değerleri EDT değerlerinden daha yüksek olup, bu noktaların erken yansılardan çok gecikmiş yansımalar aldıkları anlaşılmaktadır. EDT ve T değerleri arasındaki en büyük farklar A grubunun tüm alıcıları ile B, C ve D gruplarının en son ve salonun en arka kısmında bulunan 5 numaralı alıcılarda gerçekleştiği tespit edilmiştir. Şekil 3.11’de ifade edildiği üzere EDT ve T değeri arasındaki en büyük fark 5-A alıcısında 0,53 sn olarak ve onu takip eden 5-B

alıcısında 0.41 sn olarak gerçekleşmiştir. EDT ve T arasındaki en az hissedilebilir fark eşiği 0.1 sn olup, bu noktalardaki fark bu eşiğin 4 veya 5 kat kadar olduğu için deneyimli veya deneyimsiz tüm dinleyiciler tarafından fark edilecektir, çünkü yüksek T değerlerinin oluşmasına neden olan gecikmiş yansımaların düşüş sürecinde dinleyiciye ulaşan direkt sese yakın düzeydeki bazı gecikmiş sesler eko olarak duyulabilecektir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 5-A numaralı alıcıda 60 msn sonrasında ulaşan güçlü gecikmiş yansımanın oluşturduğu eko

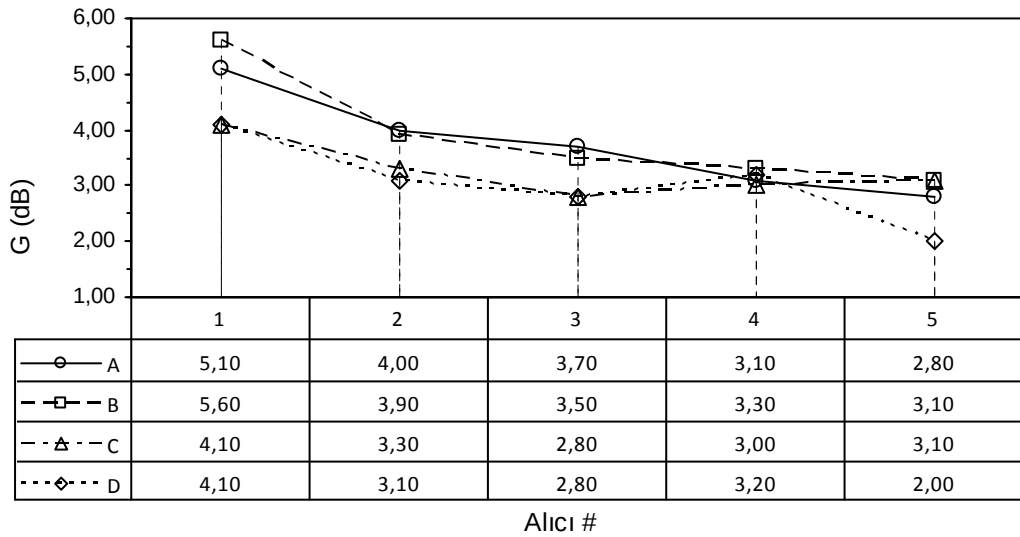
Her alıcı noktasında oluşan ses düşüşü ile ilgili yansıma grafikleri Ek B’de verilmiştir. Bununla beraber her ne kadar düşük EDT değerlerinden dolayı algılanan öznel canlılık azalıp açıklık parametresi yükselme trendinde olsa da yüksek T değerleri ile artan sesin dolgunluğu hissi belirtilen farklar neticesinde ses çamurlaşması (muddied sound) olarak da algılanabilir. Sözkonusu noktalardaki EDT ve T değerleri arasındaki farklar tasarım parametrelerinden hacmin şekline bağlı olarak gelişmekte olduğu tespit edilmiştir. Ek B’de her alıcı için verilen yansıma diyagramlarına dayanarak yapılan analizler çerçevesinde genellikle dinleyicilere erken yansımalar sağlaması gereken tavan yüzeyi, bir başka deyişle Antalya Cam Piramiti’nin çatısı oldukça yüksek olduğu için salonun özellikle orta aksında bulunan A grubu alıcılarına gecikmiş yansımalar sağlayarak T değerinin yükselmesine neden olmaktadır. Yüksek çatının yanı sıra salonun çok geniş (40 m) ve derin (42 m) olmasından dolayı yan duvarların arasındaki büyük mesafeden dolayı orta aksta bulunan A grubundaki ve arka kısımdaki son alıcılara yan duvarlardan ulaşan gecikmiş yansımalar T değerlerini yükseltmektedir. Yan duvarların birbirinden uzak ve mükemmel paralellikte olması salonun arka ve ön kısmındaki alıcılarda uzun yansıma yolları ile ulaşan ve tekrarlayan eko olarak algılanabilecek güçlü ses yansımalarına neden oldukları tespit edilmiştir.

Salonun “B” ve “C” grubundaki birçok alıcı noktasında EDT değerlerinin T30 değerlerinden yüksek oldukları görülmektedir. Bunun nedeni bu bölgedeki piramital çatının yana eğiminden dolayı çatı yüksekliğinin azalmasıyla sözkonusu gruptaki alıcılara çatıdan ulaşan erken yansımalar EDT değerini ve dolayısıyla algılanan öznel canlılığı da arttırmaktadır.

Alıcılar seviyesinde yapılan noktasal analizler doğrultusunda, hacimde oluşan yüksek T30 çınlama sürelerinin nedeni hacmin çok büyük olmasından dolayı yansıma yollarının uzaması ve hacmin geometrisini oluşturan yüzeylerde düzgün dağılımlı yutuculuk ve saçıcılık özelliklerinin bulunmamasıdır.

Ses Yüksekliği - G (Strength, Loudness - G)

Bir alıcıda algılanan ses yüksekliği ulaşan direkt ses ve yansıma seslerin yüksekliğine bağlıdır. Buna göre sesin yüksekliği parametresi T ile doğru orantılı, ancak Bölüm 2.1.3’te açıklanan dinleyicinin ses kaynağına olan mesafesi ve dinleyici alanının büyüklüğü ile ters orantılıdır. Salondaki 2500 kişilik dinleyici alanına rağmen sesin yüksekliği parametresi için hesaplanan ve Şekil 3.13’te ifade edilen değerlerin istenilen uygun değer alt sınırının üzerinde oldukları görülmektedir.



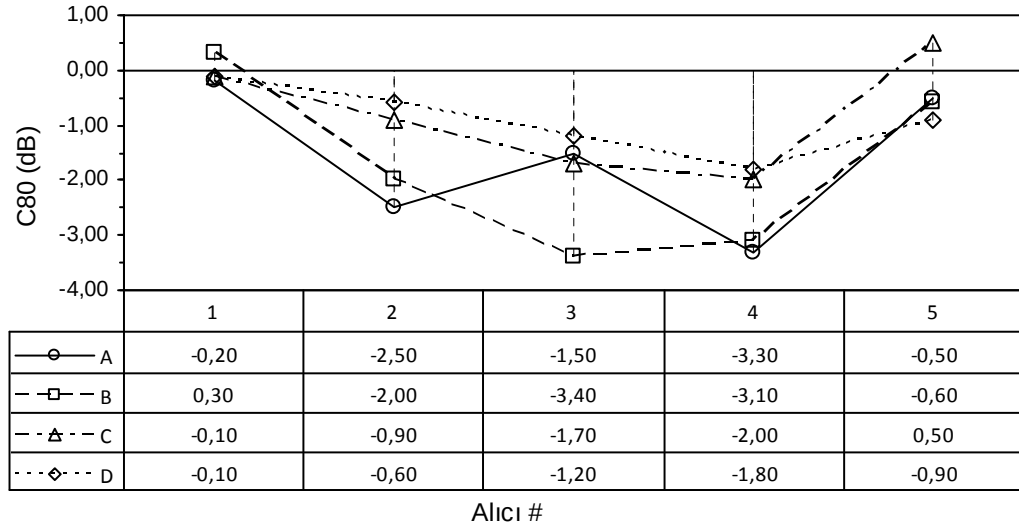
Şekil 3.13 Tanımlanan 20 alıcının konumuna göre G simülasyon değerleri

Bununla beraber 20 alıcı noktası için hesaplanan G değerlerinin hacim içerisinde homojen dağılım içerisinde olmadıkları anlaşılmaktadır ve bunda nedeni her alıcı için hesaplanan farklı T değeri ile kaynağa olan farklı uzaklık mesafesine dayanmaktadır. Bu nedenle 20 alıcının tanımlı olduğu 4 gruptan kaynağa en yakın uzaklıkta bulunan ve en yüksek T değerlerin (Şekil 3.11) hesaplanmış olduğu A

grubu alıcıları için en yüksek G değerleri elde edilmiştir. B, C ve D gruplarında salonun arka kısımlarına ve yan duvarlara doğru ilerleyip kaynaktan uzaklaştıkça hesaplanan G değerlerinde de düşüş meydana geldiği görülmektedir. Hacim içerisinde sesin homojen dağılımı ses güçlendirme sistemi kullanımı ile sağlanabilir ve salonun mevcut kullanımında hâlihazırda efektif olarak kullanılsa da bir ses güçlendirme sistemi bulunmaktadır. Ancak G parametresi için istenilen performansın elde edilebilmesi için söz konusu durumdaki gibi oldukça çınlayan bir hacimde sesin güçlendirilmesinin kullanımı mevcut akustik sorunlarının algılanma düzeyini de arttıracığı için önce hacim akustiği optimize edilmelidir [32].

Sesin Açıklığı - Netliği (Clarity – C80)

Bir hacim içerisinde birbirine zıt bir şekilde değişen öznel açıklık ve ses dolgunluğu parametrelerinin sağlanması EDT ve T nesnel parametrelerinin her iki öznel algılamayı tatmin edecek şekilde tasarlanmasına bağlıdır. Genellikle bir hacimde her iki öznel algılamının performansını sağlamak için düşük EDT ile açıklık yüksek T değerleri ile sesin dolgunluğu hissi elde edilmektedir. Söz konusu durum aynen daha önce açıklanan ve EDT ile T değerleri arasında en yüksek farkların tespit edildiği tüm grupları 5 numaralı son alıcısı ve kaynağa yakın olan tüm grupların 1 numaralı alıcısı için Şekil 3.14'ten de anlaşılacağı gibi en yüksek C80 değerleri elde edilmiştir.



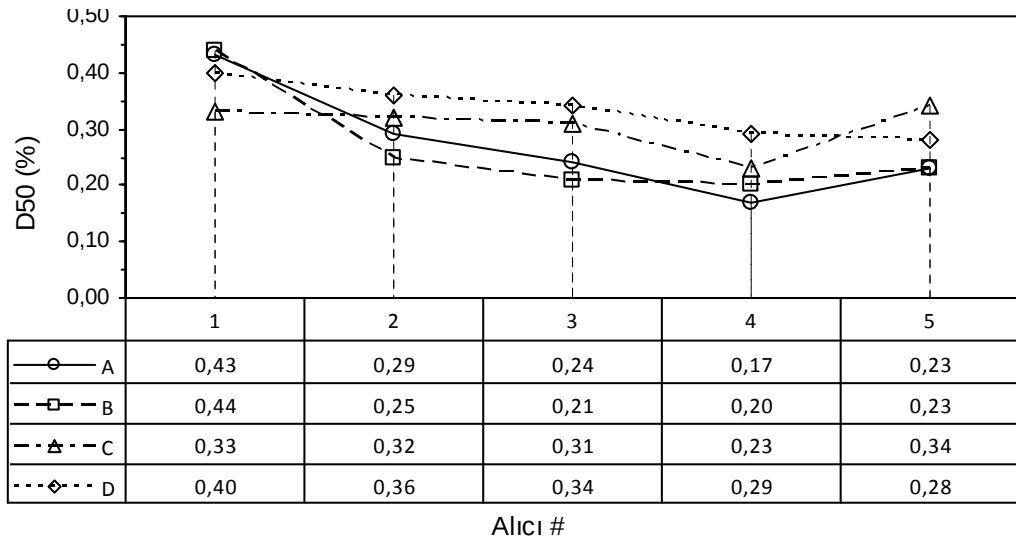
Şekil 3.14 Tanımlanan 20 alıcının konumuna göre C80 simülasyon değerleri

Salonda oldukça çınlayan olarak nitelendirilen A grubu alıcıları yüksek T değerlerinden olumsuz etkilenerek en düşük C80 değerlerini almışlardır. Salonun B ve C gruplarındaki alıcılarda yüksek EDT değerlerinden dolayı artan öznel canlılık

(reverberance) algılamasından dolayı, bu bölgedeki alıcılarda öznel açıklığın düştüğü elde edilen düşük C80 değerlerinden anlaşılmaktadır. Salon genelinde elde edilen C80 değerleri müziğin açıklığı için tatminkâr sayılırken, konuşmanın anlaşılabilirliğini destekleyecek bir açıklık veya belirginliğinin sağlanması için C80 için 0 dB'in üzerinde değerlerin elde edilmesi gerekmektedir.

Konuşmanın Belirginliği (Definition- D50)

Bu bölümün başında analiz edilen 20 alıcı noktasının EDT ve T değerleri ile doğrudan ilişkili D50 değerleri hesaplanmıştır ve sözkonusu Antalya Cam Piramiti'nde de konuşmanın belirginliği parametresi alıcı bazında tespit edilen EDT değerleri ile doğru ve T değerleri ile ters orantılı bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Şekil 3.15'te verilen 4 grupta hesaplanmış olan D50 parametresinin en düşük değerlerin bölümün başından beri en çok gecikmiş yansıma alan ve yüksek T değerleri olan A grubu alıcıları için elde edilmiştir. B grubundaki alıcıların yüksek EDT değerleri neticesinde elde edilen D50 değerleri de A grubundakilere kıyasla yükselme eğiliminde bulundukları, ancak istenilen minimum değerleri sağlamak için yeterli olmadıkları tespit edilmiştir. D50 parametresi için en olumlu sonuçlar yüksek EDT değerleri olan C grubu ve yan duvarlardan erken yanal yansımalar alan D grubu alıcıları için elde edilmiştir.



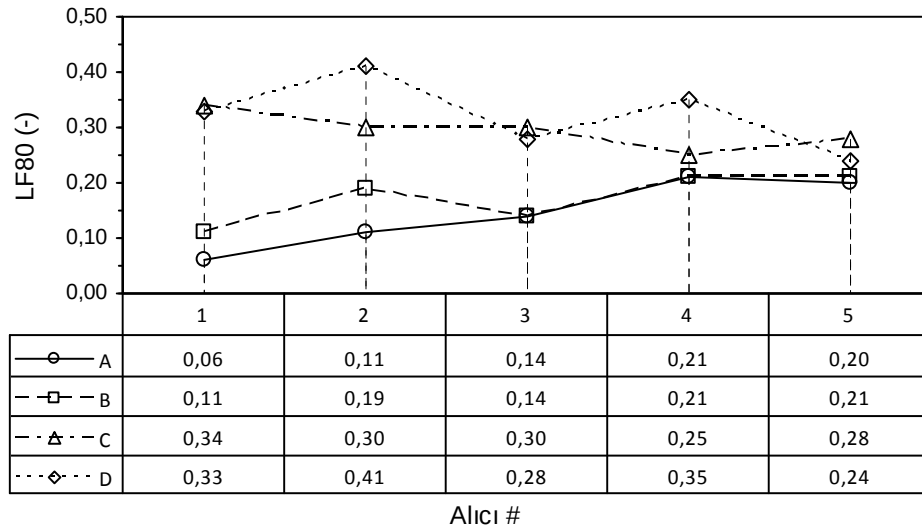
Şekil 3.15 Tanımlanan 20 alıcının konumuna göre D50 simülasyon değerleri

Sonuçta yan duvarlara yakın olan alıcılara ulaşan erken yanal yansımalar konuşmanın belirginliğini artırırken, salonun orta kısmındaki alıcılara yan duvarlara ve yüksek çatıya olan uzaklıktan dolayı az miktarda ulaşan erken yansımalar

konuşma belirginliğinin azalmasına ve dolayısıyla konuşma anlaşılabilirliğinin olumsuz etkilenmesine neden olmuştur.

Erken Yanal Enerji Oranı (Lateral Energy Fraction- LF80)

Bir hacimde erken algılanan kaynağın genişliğinin nesnel ölçümü ile ilişkili LF80 parametresinin performansı, tasarım parametrelerinden salonun formu ve yan duvarların birbirine olan uzaklığından etkilenmektedir. Antalya Cam Piramiti gibi büyük salonlarda yan duvarların birbirine olan uzaklığından dolayı LF80 parametrelerinin performansının sağlanması oldukça zorlayıcı bir akustik koşuldur. Söz konusu hacimde tanımlanan 4 gruptaki alıcılar için hesaplanan ve Şekil 3.16’da verilen LF80 değerleri, C ve D grubu alıcılarının güçlü erken yansımalar olarak hacim içerisinde tanımlanan ses kaynağını daha geniş algıladıklarını, A ve B grubu alıcılarına ise oldukça az miktarda erken yanal enerjinin ulaştığını ifade etmektedirler.



Şekil 3.16 Tanımlanan 20 alıcının konumuna göre LF80 simülasyon değerleri

Hacmin orta kısmında bulunan A ve B gruplarına erken yanal enerjinin ulaşımını sağlamak için ya yan duvarlar arasında ki mesafe azaltılmalı, ancak bu da dinleyici kapasitesinde düşüşe neden olacağı için yan duvarların yanallığı Bölüm 2.1.6’da tarif edilen yöntemlerle arttırılabilir.

Konuşmanın Anlaşılabilirlik İndeksi (Speech Transmission Index – STI)

Antalya Cam Piramiti’nin konuşma anlaşılabilirlik indeksi tüm alıcılarda “0,00” olarak hesaplanmıştır. T ve arka plan gürültüsünden etkilenen STI parametresi için

bu kadar büyük ve çınlayan bir hacimde elde edilen sonuçlar istenilen optimum STI değerlerini sağlamanın güç olacağını göstermektedir. Sözkonusu alıcılarda konuşma anlaşılabilirliği ile ilişkili hesaplanan C80 ve D50 gibi diğer parametreler için elde edilen sonuçlar da yüksek T değerlerinden olumsuz etkilenmiştir. Alıcıların tümü için elde “0,00” STI değeri hacimdeki öznel konuşma anlaşılabilirliğinin kötü olduğunu ifade etmektedir (Tablo 2.2).

BÖLÜM 4: ANTALYA CAM PİRAMİTİ’NİN AKUSTİK KOŞULLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN BİR ÖNERİ GELİŞTİRİLMESİ

Bölüm 3’te simülasyon yöntemiyle hesaplanan akustik parametrelerin analizi sonucunda Antalya Cam Piramiti’nin kilise akustiğine yakın oldukça çınlayan bir hacim özelliğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Mekan, çok amaçlı kullanıma hizmet edecek şekilde tasarlanmış olsa da, elde edilen akustik parametre değerlerine bakılınca hacmin konuşma (kongre) ve müzik (konser) amaçlı kullanımları destekleyecek akustik yeterliliğe sahip olmamasının başlıca nedenleri aşağıda tanımlanmıştır:

- Hacmin simülasyonunda ses güçlendirme sistem hesaba katılmadan hesaplanan EDT ve T30 parametreleri için oldukça yüksek değerler elde edilmiştir ($EDT_{1000}=2,86$ sn, $T30_{1000}=2,94$ sn).
- Orta ve yüksek frekanslarda tespit edilen $EDT < T$ ilişkisi hacmin bu frekanslardaki ses enerjisi düşüşünde iki veya daha fazla farklı eğimlerde düşüş eğrilerinin olduğu anlamına gelmektedir. Bu ilişkinin özellikle hacmin orta aksındaki A grubu ve tüm grupların en arkadaki 5 numaralı alıcılarında görülmesi, o noktaların az erken yansıma ile daha fazla gecikmiş ve ekoya neden olabilecek güçlü yansımaların etkisi altında bulundukları anlaşılmaktadır. Hacimde bu tür gecikmiş yansımalar sağlayan başlıca geometrik parametreler tavan işlevini gören yüksek çatı ile birbirinden 40 m uzakta olan yan duvarlardır. Konser amaçlı kullanımlar için ideal EDT ve T ilişkisi $EDT=1.1 T$, konuşma için ise $EDT=T$ olarak tanımlanmaktadır.
- Sesin açıklığı (C80) çınlama süresi T30 ile ters orantılıdır, yani gecikmiş yansımalar arttıkça C80 değeri de düşmektedir. Çınlama süresinin alçak ve orta frekanslarda yüksek olması C80 değerinin de bu frekanslarda -1 (dB)’in altına inmesine neden olmuştur. Müzik için dinleyicisiz hacimlerde optimum değer aralıkları -4 ile -1 dB arasında, konuşma için ise 0 ile 4 dB arasından değişmektedir. Antalya Cam Piramiti için elde edilen C80 değerleri müzik

performansları için tatmin edici kabul edilebilirken, konuşmanın açıklığı ve anlaşılabilirliği için yetersiz görülmektedir.

- Konuşmanın belirginliği (D50) parametresi için frekans bazında elde edilen hacim ortalaması değerler de alçak ve orta frekanslardaki yüksek çınlama sürelerinden olumsuz etkilenmiştir. Salonda D50 parametresi için en düşük değerler, EDT/T oranının 1'den az olduğu salonun orta aksındaki A grubu alıcıları için hesaplanmıştır. Bunun nedeni sözkonusu konumdaki ve gruptaki alıcıların hacim geometrisinden (yüksek çatı ve yan duvarların uzaklığı) olumsuz etkilenecek gecikmiş yansımalarla maruz kalmalarıdır.
- Yanal enerji oranı (LF80) salonun ön kısımlarında çok düşük, yan duvarlara yakın D ve C gruplarında oldukça yüksek, A ve B grubunun arka kısmındaki alıcılarda ise tatmin edici seviyelerde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni salonun ön kısmındaki alıcıların yan duvarlardan yeteri kadar yansımalar alamamasıdır. Yan duvarlara yakın alıcıların ise yayıcı özelliği olmayıp tam yansıtıcı olan yan duvarlardan gelen gecikmiş güçlü yansımalarla maruz kaldıkları için LF80 değerleri oldukça yüksektir.
- Konuşmanın anlaşılabilirliği indeksi için oldukça kötü sonuçlar elde edilmiştir ve bunun da nedeni şüphesiz hacmin büyüklüğü ve bundan dolayı kaynaklanan yüksek T değerleridir. Konuşma anlaşılabilirliği ile ilişkili olan C80 ve D50 parametreleri için elde edilen sonuçlar da yüksek T değerlerinden, veyahut başka bir deyişle çınlayan bir ortamın varlığından olumsuz etkilenmiştir. Bu kadar büyük hacimli ve dinleyici kapasiteli bir salonda konuşma anlaşılabilirliği için istenilen optimum akustik koşulların doğal akustikle sağlanılmasının zor bir durum olduğundan mutlaka ses güçlendirme sistemlerinin kullanılması gerekli olacaktır. Ancak, bu kadar çınlayan bir ortamda ses gücünün artmasıyla iyileştirilmesi hedeflenen akustik parametrelerdeki değişim muhtemelen hissedilmeyecektir, çünkü mevcut olan eko gibi akustik kurslar daha da belirginleşerek ortam sesinin gürültüye dönüşmesine neden olacaktır ve konuşma anlaşılabilirliğini olumsuz etkileyecektir [32]. Bu nedenle mevcut hacim akustiği koşullarının ilk önce optimizasyonu yapılmalıdır.

Akustik parametreler için elde edilen sonuçlar ile hacim geometrisinin davranışını yansıtan ışın diyagramları karşılaştırmalı olarak incelendiğinde hacmin akustik yetersizliği ile ilgili yukarıda yapılan tespitlerin nedeni daha iyi anlaşılmaktadır.

Salonun iki yan duvar arasındaki dinleyici alanının genişliği 40.00 m, sahnenin arka duvarı ile dinleyici alanının arka duvarı arasındaki mesafe 42.00 m, piramidal cam kaplama çatının en üst noktası ise 22.5 m'dir. Salonun geometrisini oluşturan bu yüzeylerden en olumsuz salonun orta aksında bulunan A grubu alıcıları ile tüm grupların en arkadaki 5 numaralı alıcıları etkilenmiştir. Bunun nedeni:

- Bu tarzdaki geniş salonlarda dinleyicilere ulaşması gereken yararlı erken yansımalar tavandan gelmeliyken, piramidal çatının oldukça yüksek olması çatıdan gelen yansımaların yolunu uzatmakta ve salonun tam orta aksında, yani çatının en yüksek olduğu yerde bulunan A grubu alıcılarına gecikmiş yansımalar yönlendirerek çınlama süresinin artmasına neden olmaktadır.
- Salonun genelinde yaygın olan yüksek T değerlerinin başlıca nedeni kişi başına düşen 14 m^3 gibi yüksek hacim miktarı ve dinleyici alanının dışındaki tüm hacim yüzeylerinin yansıtıcı özellikte olmasıdır.
- Salonun oldukça geniş (40,00 m) olmasından dolayı birbirine paralel olan yan duvarlardan yansıyan sesler salonun arka kısmındaki alıcılara 80 msn üzerinde, bazen titreyen eko (flutter eko) olarak algılanabilecek yükseklikte gecikmiş yansımalar olarak ulaşmaktadırlar. İncelenen 20 alıcının ışın diyagramlarında yan duvarlardan gelen gecikmiş veya tekrarlanan dalga yansımalarının düşüş eğrilerinde çınlama süresini arttıracak, ekoya işaret eden güçlü münferit yansımalar olarak belirdikleri tespit edilmiştir (Ek B). Yan duvarlardan gelen gecikmiş yansımalar en çok ön ve arka alıcılar ile duvar kenarındaki D grubu alıcılarını etkilenmektedir.
- T değerinin EDT'den yüksek olmasının nedeni hacim geometrisine bağlı gecikmiş yansımaların yanı sıra, salonu çevreleyen, kurulup sökülebilen akustik duvarlar ile giydirme cam çatıyı taşıyan uzay kafes konstrüksiyonunun arasındaki birleşim ile hacmin sızdırmazlığı sağlanamamış olmasıdır. Bu durumda salon mekanı ile akustik duvarlar arkasında kalan lobi gibi alanlar bağlaşıklık mekan davranışı sergiledikleri için hacmin düşüş diyagramında yansıma bölgesinde iki veya daha fazla eğimli düşüş eğrisinin oluşmasından dolayı çınlama süresi veya T de artmaktadır [33].
- Dinleyici alanının arka duvarından gelen yansımalar en öndeki alıcılarda eko olarak algılanacak şiddetleyken, en arkadaki alıcılarda ise çınlama süresi ve G değerlerinin artmasına neden olmaktadır.

- Bu kadar büyük ve çınlayan bir mekanda C80, D50 ve STI gibi konuşmanın performansını belirleyen akustik parametreler için istenilen değerlerin doğal akustik koşulları ile sağlanması neredeyse imkansız. Özellikle erken yansımaların düşük olduğu salonun orta aksındaki ve arka kısımdaki alıcıların elektro-akustik ile desteklenmesi gerekmektedir. Salonun hâlihazırda kullanılan bir ses güçlendirme sistemi bulunmakta, ancak yüksek çınlama ve eko gibi olumsuz akustik koşullar altında ses gücünü arttırmak kusurların şiddetini de arttıracığından mekânda gürültülü bir sesin algılanmasına neden olacaktır.

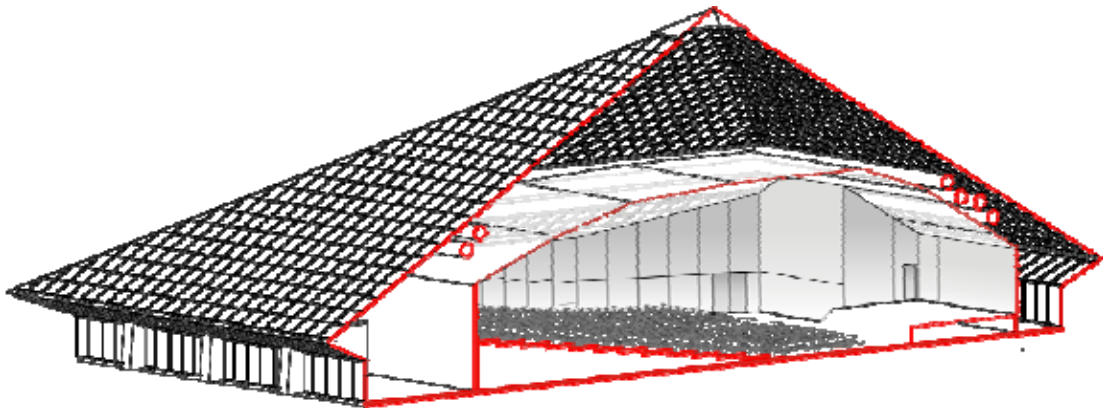
Yukarıda açıklanan akustik ve geometrik parametrelerin karşılaştırmalı analizlerinden sonra yapılan tespitler çerçevesinde Antalya Cam Piramiti'nin akustik koşullarını optimize etmek için bir iyileştirme önerisinin geliştirilmesine karar verilmiştir.

4.1 İyileştirme Önerisinin Geliştirilmesinde İzlenen Adımlar

İyileştirme önerisinin akustik değerlendirmesi de Bölüm 3'te açıklanan simülasyon yöntemiyle yapılmıştır. Simülasyon çalışması öncesi yapılan analiz ve tespitler doğrultusunda hacmin dinleyici kapasitesinden ve mimari konseptinden ödün verilmeden hacmin iyileştirme modellemesi için alınan kabuller aşağıdaki gibidir:

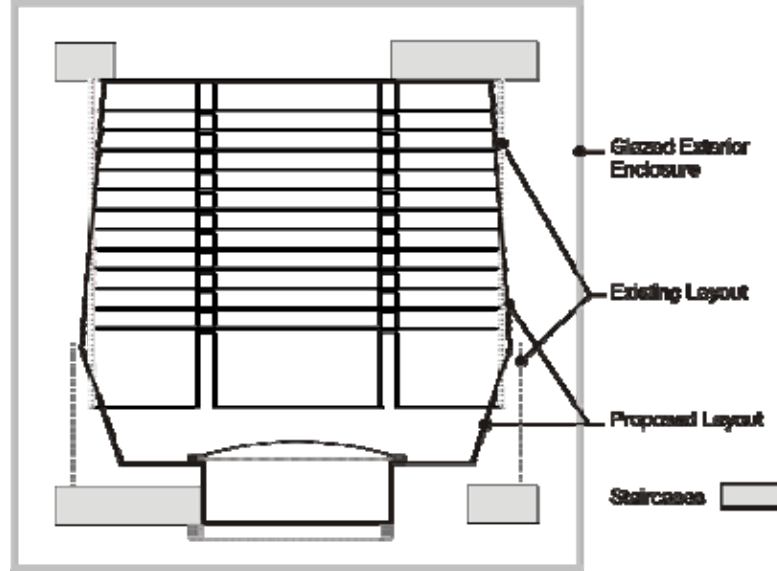
4.1.1 Hacim Geometrisiyle İlgili Kabuller

Antalya Cam Piramiti'nin mükemmel simetri içerisindeki piramidal geometrisinin şeffaflık konseptine saygılı kalarak akustik koşullarının optimize edilmesi için aşağıdaki geometrik parametreler için yapılan kabuller çerçevesinde hacmin 3 boyutlu iyileştirme modeli yapılmıştır (Şekil 4.1)



Şekil 4.1 İyileştirme önerisi üç boyutlu model kesiti

Salon formu: Dinleyici alanında kapasite kaybına neden olmaksızın yan duvarların paralelliğini bozup ekoya neden olan durağan dalga yansımaların oluşumunu engelleyip yansımaların yanal etkisini mümkün mertebe optimize etmek için yan duvarlar salonun arka kısmından 5° içe doğru döndürülerek, salona ters yelpaze şekli verilmiştir. Kaynaktan gelen sesleri dinleyici alanına direkt ışınla yol farkını azaltacak biçimde dinleyici alanına yöneltilerek modellenmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Salon formunu oluşturan yan duvarların paralelliğini bozmak için geliştirilen öneri

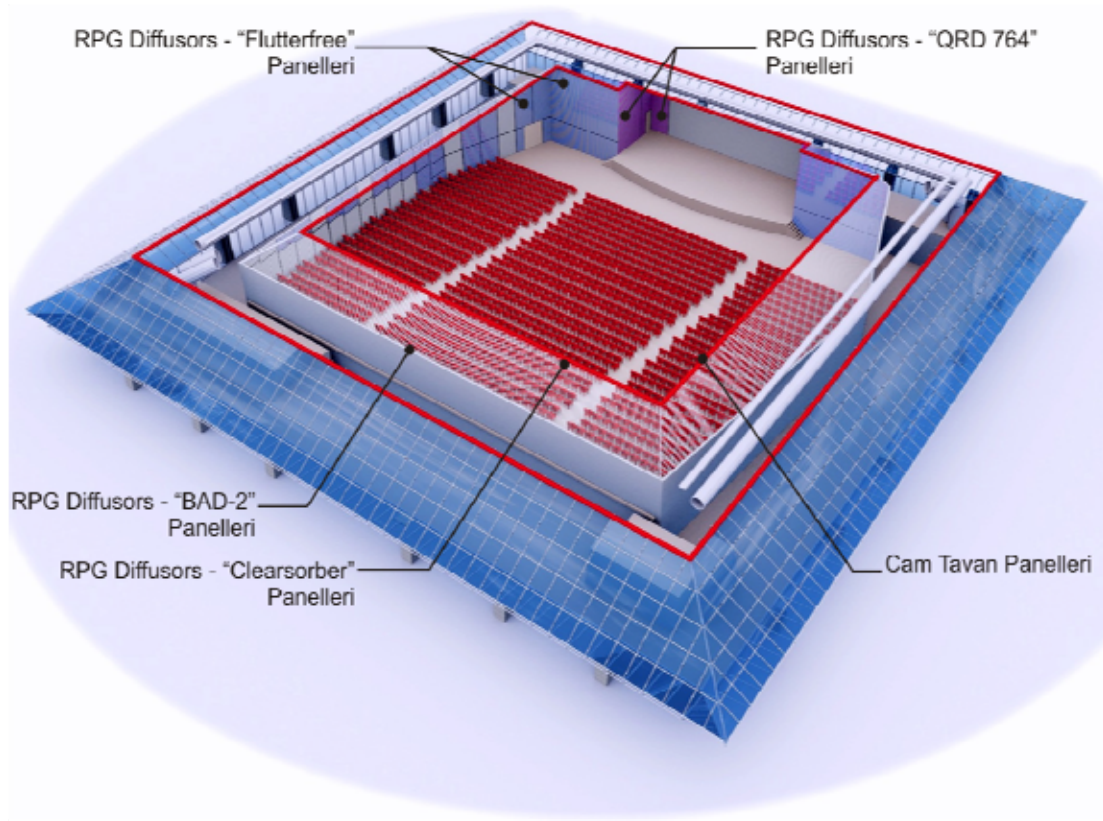
Salon hacmi: Salonun 35.000 m³ hacmi konuşma ve hafif müzik olarak çok amaçlı kullanımlara göre optimize edilmesi için yüksek piramidal çatı örtüsünün altında ikinci bir şeffaf cam kabuk tasarlanmıştır. Çok amaçlı salonlar için optimum değer olan kişi başı 7.0 m³ kabulü yapılarak, bu şeffaf kabuk ile salonun hacmi 17.500 m³ olarak yarıya indirilmiştir. Çatının piramidal formundan dolayı, mecburen dört yanı eğimli, fakat orta kısmı arkalara ses yansıtacak bir tavan modeli elde edilmiştir. Tavan ile yan duvarlar sızdırmaz bir hacim sağlayacak şekilde bütünleşik modellenmiştir.

Sahne: Sahnedekilerin dinleyici ile daha samimi bir temas içinde olmasını sağlamak için sahne dinleyici alanına doğru hafif bir dairesellik verilerek büyütülmüştür. Sahne duvarları diğer salon duvarları ile bir bütünlük ve süreklilik sağlayarak ses kaçışlarına neden olmayacak şekilde çözülmüştür.

İyileştirme modelinde yukarda belirtilen geometrik parametrelerdeki değişiklikler dışında kalan tüm yüzeyler mevcut haliyle kabul edilmiştir (Bkz. Ek C).

4.1.2 Hacmin Yüzey Kaplamalarıyla İlgili Malzeme Kabulleri

Hacmin iyileştirme modelindeki yüzeylerin çoğuna tanımlanan malzemeler mevcut durum simülasyonunda kullanılan malzemelerle aynıdır. Ancak, iyileştirme modelinin hacim geometrisine bağlı akustik davranışını incelemek için yapılan ışın taraması sonucunda, hacimde yayınık ses dağılımını sağlamak için bazı yüzeylere yansıtıcı ve saçıcı, bazılarına emici bazılarına ise hem emici hem saçıcı özelliği olan malzemeler atanması gerektiği saptanılmıştır. Buna göre, konuşma ve müzik performansını sağlayacak akustik koşullarını elde etmek için hacim yüzeylerine aşağıdaki malzemelerin atanması uygun görülmüştür (Şekil 4.3):



Şekil 4.3 İyileştirme önerisi için yapılan yüzey ve malzeme kabulleri

Tavan: Hacmin ışın diyagramlarından elde edilen bilgiye göre alıcılara tüm erken yansımaların tavandan geldikleri tespit edilmiştir. Genellikle salonların tavan yüzeyleri dinleyici alanına erken yansımalar iletip hacmin canlılığına ve ses yüksekliğine katkıda bulundukları için yayınık bir ses ortamını sağlayabilmeleri için yansıtıcı ve saçıcı özellikte olmaları istenilmektedir. Bu nedenle piramidal cam çatının altında salonun hacmini de optimize eden şeffaf tavan kabuğu için sahne

üzerinde tamamen yansıtıcı, salonun orta kısmında ise yansıtıcı ve saçıcı konkav cam paneller tanımlanmıştır (Odeon- Malzeme No: 2022).

Dinleyici alanın arka kısmında arka duvardan ve tavandan gelen yansımaların kontrolünü sağlayabilmek için tavanın arka kısmına alçak frekanslarda yutucu yutucu ve yüksek frekanslarda saçıcı özellikte perfore plexiglass (RPG Diffusors Inc.- “Clearsorber Panel”- Malzeme No:1109) paneller kullanılmıştır.

Sahne duvarları: Sahnenin yan duvarlarından dinleyicilere ulaşan ikinci veya üçüncü dereceden yansımaların şiddetini optimize etmek için bu duvarlara yansıtıcı ve saçıcı özellik veren (RPG Diffusors Inc.- “QRD764”- Malzeme No:1120) paneller kullanılmıştır.

Yan duvarlar: Salonun orta kısmından sonraki alıcılara gecikmiş güçlü yansımalar gönderen ön yan duvarlara hacmin canlılığına katkı sağlayacak özellik kazandırmak için yansıtıcı ve saçıcı (RPG Diffusors Inc.-“Flutterfree non-slotted”- Malzeme No:1114) paneller ile kaplanması uygun görülmüştür.

Aynı paneller salonun orta kısmındaki yansıtıcı duvarların 2.5m üzerindeki kısımlarda yanlara doğru eğimli tavan yüzeylerinden gelen yansımaların kontrolünü sağlamak için kullanılmıştır.

Arka Yan Duvar: Orta frekanslarda yutucu alçak frekanslarda ise saçıcı özellikte paneller kullanılmıştır (RPG Diffusors Inc.-“BAD-2”- Malzeme No:1118).

Arka duvar: Dinleyici alanın ön kısımlarında ekolara neden olan arka duvar yansımalarının kontrolünü sağlamak için genellikle bu duvara emici ve saçıcı özellikteki kaplamalar uygulanmaktadır. Bu nedenle arka duvar için orta frekanslarda emici yüksek frekanslarda ise saçıcı olan (RPG Diffusors Inc.-“BAD-2”- Malzeme No:1118) panelleri kullanılmıştır [34].

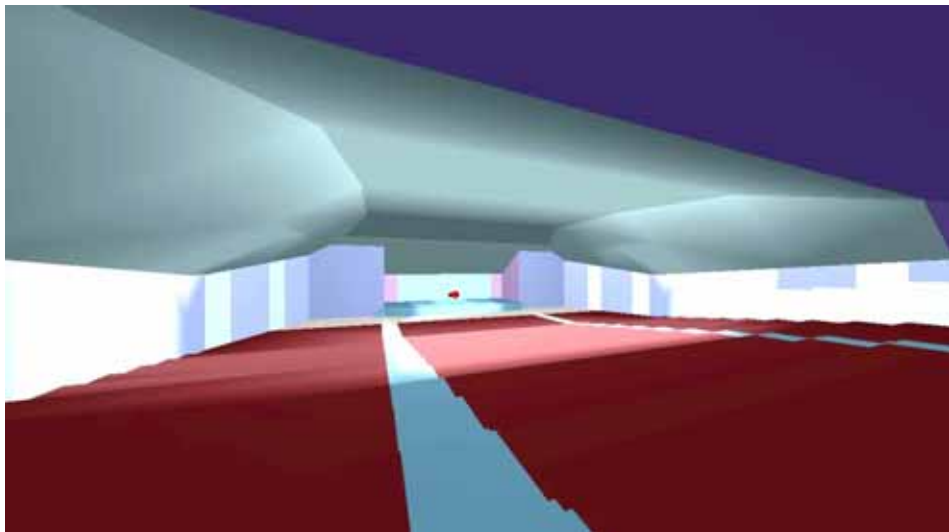
Hacmin yukarda belirtilmiş tanımların dışında kalan tüm yüzeyler için mevcut halin simülasyonunda kullanılan malzemeler aynen tekrar atanmıştır. Simülasyonda hacim ile ilgili tanımlanan tüm yüzey ve malzemeleri ile ilgili yutuculuk ve saçıcılık verileri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 İyileştirme modelinin yüzeylerine atanan malzemeler, yutuculuk ve saçıcılık özellikleri

#	Yüzey Adı	Malzeme Kodu	Yutuculuk Katsayısı (α)						Saıcılık Katsayısı (δ)
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
1	Sahne Tavanı	2022	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.10
2	Orta Tavan	2022	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.5
3	Yan Tavan	2022	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.10
4	Arka Tavan	1109	0.23	0.59	0.35	0.20	0.10	0.08	0.50
5	Sahne Duvarı	800	0.25	0.15	0.10	0.09	0.08	0.07	0.10
6	Sahne Yan Duvarları	1120	0.23	0.24	0.35	0.17	0.15	0.10	0.60
7	Yan Duvarlar	1114	0.34	0.69	0.26	0.12	0.14	0.16	0.50
8	Yan Duvarlar	800	0.25	0.15	0.10	0.09	0.08	0.07	0.10
9	Yan Arka Duvarlar	1117	0.41	0.77	0.91	0.61	0.42	0.44	0.40
10	Arka Duvar	1118	0.45	0.82	1.00	0.97	0.83	0.64	0.10
11	Sahne	2388	0.40	0.30	0.20	0.17	0.15	0.10	0.10
12	Podyum	2388	0.40	0.30	0.20	0.17	0.15	0.10	0.30
13	Dinleyici Alanı	2368	0.35	0.45	0.57	0.61	0.59	0.55	0.30

4.1.3 Simülasyon Kurulumunda Alınan Kabuller

Simülasyon kurulumunda iyileştirme modelinin yüzeylerine atanan bazı yeni malzemeler dışında hesap parametrelerinde arka plan gürültüsü ile de ilgili NCB-15 olarak yeni bir kabul yapılmıştır. Bunun nedeni yapılan iyileştirme önerisinin arka plan gürültüsünün azalmasına da katkı sağlamış olacağı varsayılarak, böyle bir salonda ideal durumu yansıtan NCB-15 gürültü kriter değerleri kabul edilmiştir.



Şekil 4.4 Kaynağın iyileştirme modelindeki konumu

Bunun dışında mevcut durumun simülasyonu için tanımlanan hesap parametreleriyle, alıcı ve kaynak lokalizasyonları ile ilgili Bölüm 3.3.3'te yapılan tüm kabuller iyileştirme önerisinin simülasyonunda da aynen hiçbir değişiklik yapmadan kullanılmıştır. Kaynağın iyileştirme modelindeki konumu ve yeni hacim geometrisiyle ilişkisi Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

4.2 İyileştirme Önerisinin Simülasyon Sonuçları ve Analizler

Yukarda tarif edilen kabuller doğrultusunda Antalya Cam Piramiti için geliştirilen iyileştirme modelinin hacim akustiği parametreleri Odeon simülasyon programı çalıştırılarak hesaplandı.

Bu bölümde bir omni nokta tipi ses kaynağı ile 4 grupta tanımlanan 20 alıcının her biri ve hacmin geneli için elde edilen akustik parametrelerinin sonuçları analiz edilip hacmin mevcut durumu ile iyileştirme önerisinin karşılaştırmalı olarak değerlendirmesi yapılmaktadır.

4.2.1 İyileştirme Önerisinin Ortalama Simülasyon Sonuçları

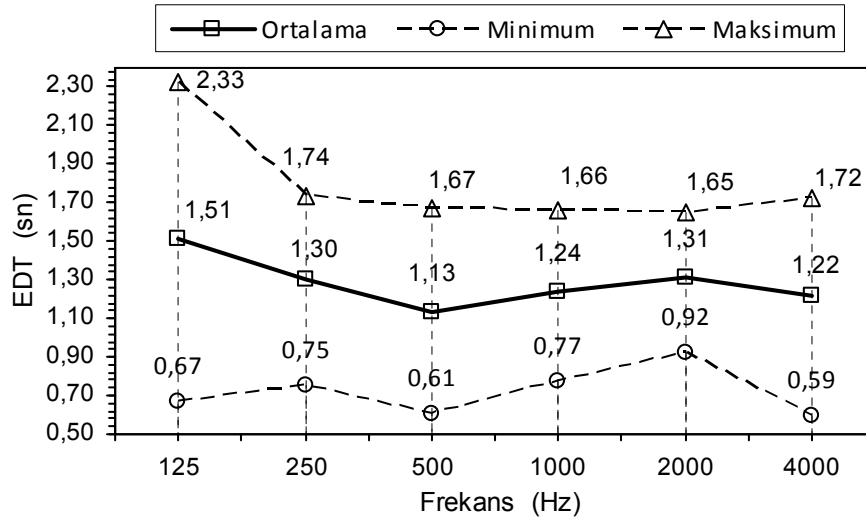
Çok amaçlı kullanılan 2000 kişi ve üzeri kapasiteli salonlarda konuşma ve müzik için istenilen asgari müşterek akustik koşullarını elde etmek oldukça zorlayıcı bir iştir. Bunun nedeni her ikisinin de gerektirdiği akustik koşullarının birbirinden farklı ve tam zıttı olmasıdır. Konuşma ve konuşmanın anlaşılabilirliği için erken, müzik için ise geç seslerin enerjisi önemlidir. Söz konusu büyüklükteki hacimlerde her ne kadar optimum doğal akustik koşulları sağlanılsa da her iki eylem için gerekli akustik performans elde etmek için mutlaka elektro-akustik sistemler kullanılmaktadır.

Antalya Cam Piramiti'nin iyileştirme önerisi modelinin akustik performansının değerlendirilmesi için esas alınan sekiz hacim akustiği parametresiyle ilgili elde edilen ortalama değerler aşağıda açıklanarak optimum değerler ile karşılaştırılarak performans analizi yapılmaktadır. Hacmin minimum ve maksimum akustik parametre değerleri Ek D'de verilmiştir.

Erken Düşme Süresi (Early Decay Time – EDT)

İyileştirme modelinin simülasyonu sonucunda Şekil 4.5'te frekanslara göre belirtilen EDT değerleri elde edilmiştir. EDT ve T frekansa bağlı gelişen ve farklılık gösteren

akustik parametrelerdir ve genellikle ya ikisinin birbirine eşit veya müzik amaçlı kullanımlarda $EDT = 1.1 T$ oranı ile ilişkili olmaları tercih edilmektedir.



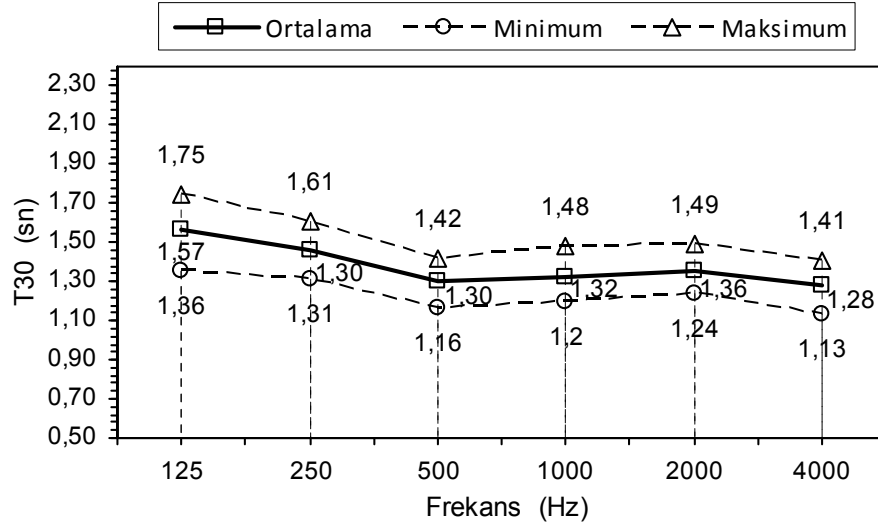
Şekil 4.5 İyileştirme önerisi için hesaplanan EDT değerleri

Bunun yanı sıra konuşmanın anlaşılabilirliği bakımından orta ve yüksek frekanslarda erken enerjinin eşdeğer düşüşte olması istenilen bir olgudur [8]. Bu bakımdan Şekil 4.5'te iyileştirme modelinin simülasyonunda 500 Hz dışında orta ve yüksek frekanslarda EDT için elde edilen birbirine çok yakın ($EDT_{1000}=1,24sn$, $EDT_{2000}=1,31sn$) süreler olumlu bir gelişmedir. EDT değerleri hacmin ilk yansımalarına dayandığı için hacim geometrisi ile doğrudan ilişkili olduğundan, 500 Hz frekansındaki EDT değerinin ani düşüşü hacim yüzeylerine tanımlanan malzemelerin söz konusu frekanstaki yutuculuk özelliklerinin yüksek olduğunu göstermektedir. Çok amaçlı salonlar için uygun görülen 1.2 - 1.6 sn arasında değişen T süreleri göz önünde bulundurulunca, söz konusu hacim için elde edilen EDT değerleri daha çok konuşmanın performansı bakımından olumlu kabul edilebilir. Ancak öznel canlılığı belirleyen nesnel parametre olarak EDT için Şekil 4,5'te süreler salonu müzik performansları için yetersiz ve hatta öznel olarak “ölü” kılmaktadır. Bu nedenle salonda gerçekleşecek müzik performansları mutlaka elektro-akustik ile desteklenmelidir.

Çınlama Süresi- T , $T30$ (Reverberation Time – $T30$)

Çok amaçlı kullanım için optimum çınlama süresini sağlamak için piramidal çatının altına asma tavan gibi cam panellerden oluşan ikinci bir kabukla söz konusu mekanın hacmi yarıya indirilerek elde edilen çınlama süresi değerleri Şekil 4.6'da verilmiştir.

Bir ortamda çınlama süresi T hacimle doğru, fakat hacmin yutuculuk özellikleri ile ters orantılı bir davranış sergilemektedir. Dolayısıyla salonun hacminin yarıya düşmesiyle çınlama sürelerinde de neredeyse aynı oranda düşüş meydana gelmiştir.

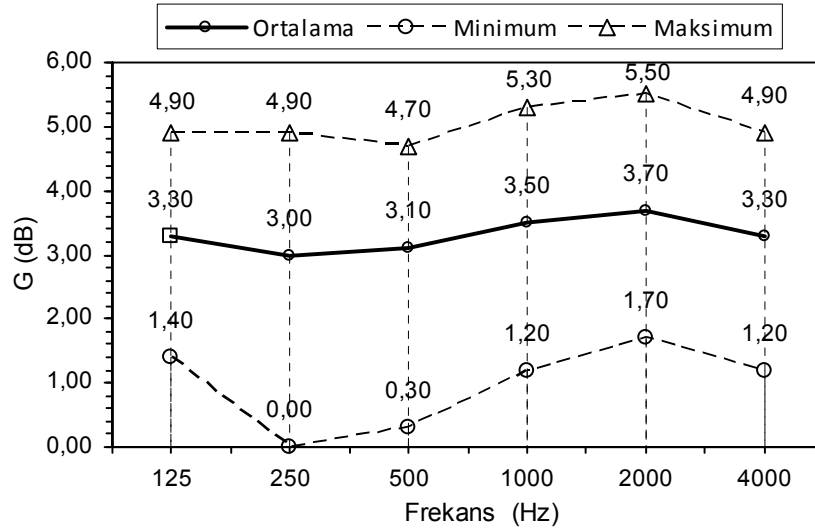


Şekil 4.6 İyileştirme önerisi için hesaplanan T30 değerleri

Orta ve yüksek frekanslarda EDT ve T değerleri 0,05 sn'lik cüzi farklılıklarla neredeyse aynı olup, 250 ve 500 Hz'te T değerleri EDT değerlerinden 0,16 sn kadar yüksek hesaplanmıştır, ancak bu farklar dinleyiciler tarafından duyulamayacak kadar küçük sayılırlar. Hacmin yansıma diyagramları ve düşüş grafiklerinden de anlaşılacağı gibi EDT değerindeki 0,16 sn'lik düşüşün nedeni hacmin geneline atanan malzemelerin bu frekanslarda biraz daha fazla yutucu özellikte olmasıyla (Bkz. Tablo 4.1), erken enerjinin büyük kısmı yutulmakta yansıyan ise çınlama süresinin artmasına neden olmaktadır. Işın diyagramların analizlerinden söz konusu frekanslardaki çınlama süresinin artış nedeni salonun ön yan duvarlarına ve dinleyici alanına tanımlanan, alçak ve orta frekanslarda hafif emici olan yüzeylerden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Hem konuşma hem müzik performansları için önemli olan bas seslerin sıcaklığı ile ilgili T1000 değeri için istenilen değerler arasında bulunana salonun BR=1.16 bas seslerin orta frekans seslere oranı olumlu bir gelişmedir. Ancak, iyileştirme önerisi için elde edilen T değerleri konuşma performansları için üst sınır sayılırken, müzik için istenilen 1,7 sn değerlere ulaşmak için elektro-akustik kullanımı uygun olacaktır.

Ses Yüksekliği - G (Strength, Loudness - G)

Ses yüksekliği (G) değeri simülasyon çalışmasında kullanılan omni nokta tipi ses kaynağına 31 dB ses gücü tanımlanarak söz konusu hacim için Şekil 4.7’de ifade edilen ses basınç düzeyleri (SPL) hesaplanarak G değeri elde edilmiştir. Direkt ses ile yansıyan seslerin gücünden oluşan G değeri, Şekil 4.5’te EDT ve Şekil 4.6’da T değerleri ile doğru orantılı bir davranış içinde olduğu görülmektedir.



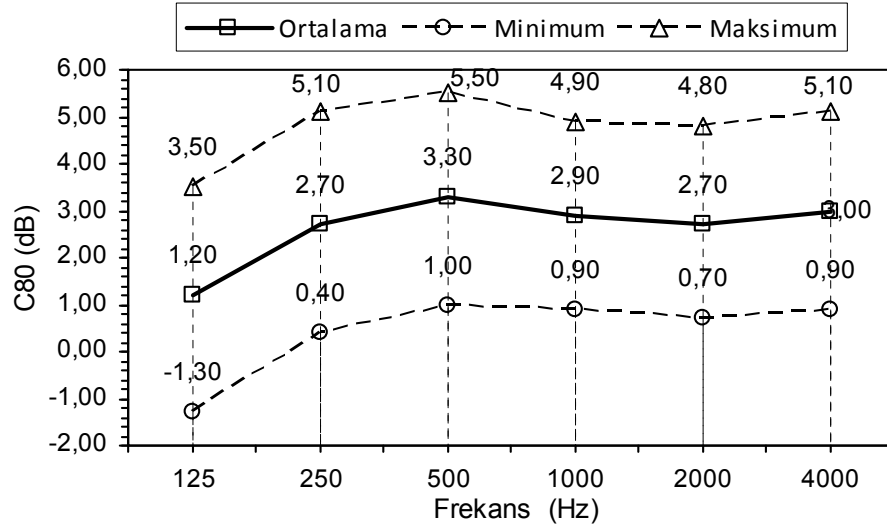
Şekil 4.7 İyileştirme önerisi için hesaplanan Ses Yüksekliği (G) değerleri

Hacimle ve kaynağa olan mesafe ile ters orantılı olduğu için iyileştirme önerisinde salon hacminin küçülmesi ile alçak frekanslardaki G değerinde de artış gözlemlenmiştir. Ses güçlendirme sistemi hesaba katılmaksızın, bu büyüklükteki bir hacmin doğal akustik koşulları için elde edilen G değerleri başarılı sayılmaktadır.

Sesin Açıklığı - Netliği (Clarity – C80)

Çınlama süresi T ile ters orantılı olan C80 parametresi için iyileştirme önerisi ile optimize edilen T değerlerine (Şekil 4.6) paralel olarak C80 değerleri için de olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 4.8). Salonun mevcut durumu için Bölüm 3.4.1’de elde edilen düşük değerlerin çok üstünde özellikle konuşmanın anlaşılabilirliğini destekleyecek istenilen optimum değerlere ulaşılmıştır. Ancak salonun mevcut halinin ve iyileştirme önerisinin de simülasyonu dinleyicisiz kabul edilerek yapılmıştır ve dinleyicili haliyle hacmin yutuculuğu artıp çınlama süresi belli bir miktar azalacağı için C80 değerlerinin de bir miktar daha artması muhtemeldir. Bu durum, konuşma için sorun teşkil etmese de müzik performanslarında sesler

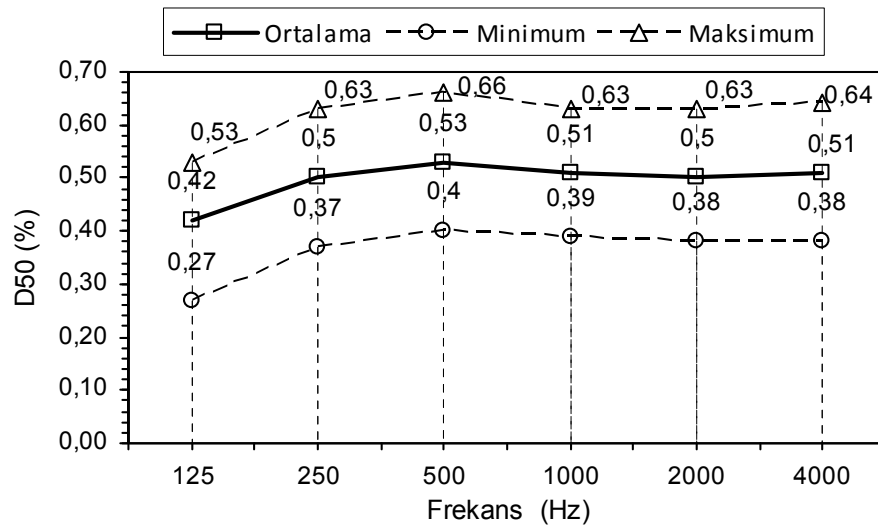
gereğinden fazla parlak ve açık algılanmasına neden olacağı için, sesi canlandırmak için elektro-akustik ile destek sağlanması gerekli olabilecektir.



Şekil 4.8 İyileştirme önerisi için hesaplanan Sesin Açıklığı (C80) değerleri

Konuşmanın Belirginliği (Definition- D50)

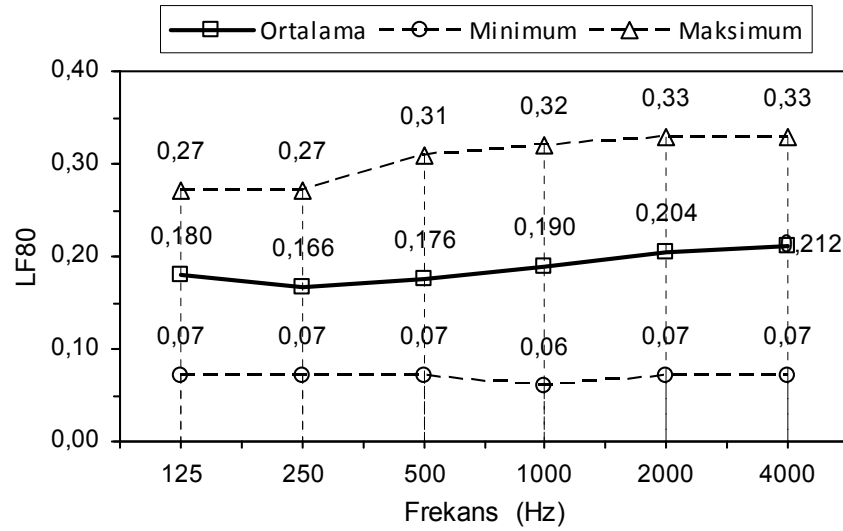
Konuşmanın belirginliği erken ve toplam ulaşan enerjiye dayalı olduğu için EDT ile doğru, T ile ters orantılı bir ilişkiliği bulunmaktadır. Orta ve yüksek frekanslarda düşüşe geçen T değerleri ile ters orantılı olan D50 değerlerinde yükselme eğilimi görülmektedir (Şekil 4.9). Çınlama süresinin optimizasyonu ile D50 için hesaplanan değerler D50 için 0,3 ile 0,7 arası kabul edilen optimum değer aralığında yer almaktadırlar ve hacimde öznel olarak konuşmanın belirgin olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 4.9 İyileştirme önerisi için hesaplanan Konuşma Belirginliği (D50) değerleri

Yanal Enerji Oranı (Lateral Energy Fraction- LF80)

Hacmin yan yüzeylerden gelen enerjinin toplam ses enerjisine oranı olan bu parametre hacmin genişliğiyle ve yan duvarların uzaklığı ile yakından ilgilidir. Yan duvar uzaklığı arttıkça LF80 değerleri azalmakta ve özellikle salonun orta aksındaki dinleyicilerde en düşük değerlerini almaktadır. Salonun mevcut durumunun simülasyonunda LF80 değerleri için elde edilen sonuçlar Odeon'un koyduğu kritere göre düşük, Barron'a göre ise tatminkâr iken, iyileştirme önerisinde yan duvarlardan gelen enerji oranı alçak ve orta frekanslarda düşüş yaşanmıştır (Şekil 4.10). Bunun muhtemel nedeni iyileştirme önerisinde ön yan duvarlardan gelen gecikmiş yansımaların şiddetini optimize etmek için alçak frekanslarda yutucu orta ve yüksek frekanslarda yansıtıcı ve saçıcı panellerin kullanılmış olmasıdır. Aşağıdaki grafikten de anlaşılacağı üzere yan duvarların belli bir kısmının orta ve yüksek frekanslardaki yansıtıcılık ve saçıcılık özelliklere sahip olmasından dolayı bu frekanslarda LF80 parametresi değerleri de yükselişe geçmektedir.



Şekil 4.10 İyileştirme önerisi için hesaplanan Yanal Enerji Oranı (LF80) değerleri

Konuşmanın Anlaşılabilirlik İndeksi (Speech Transmission Index – STI)

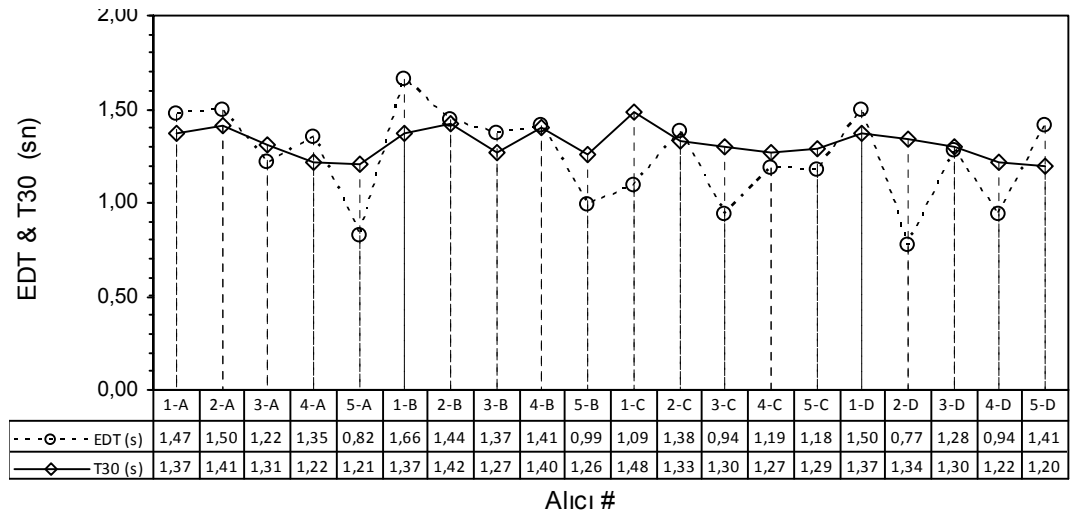
STI parametresi T ve arka plan gürültüsü ile ters orantılı bir alaka içindedir. Bu demektir ki hacim arttıkça istenilen STI değerlerini ulaşmak ta zorlaşmakta. Mevcut durumun simülasyonundan farklı olarak iyileştirme önerisinin simülasyon hesap parametrelerinde arka plan gürültü düzeyleri için NCB-15 gürültü kriterleri kabul edilmiştir. Buna rağmen konuşmanın anlaşılabilirliği (SI) için kötü sayılan 0.08 STI değeri elde edilmiştir.

4.2.2 İyileştirme Önerisindeki 20 Alıcı Noktasının Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde iyileştirme önerisi simülasyon çalışmasında tanımlanan 1 kaynak ve 4 grupta (A,B,C,D) toplam 20 alıcı noktasında 1000 Hz bandında hacim geometrisine bağlı oluşan ışın diyagramları, yansıma grafikleri ve akustik parametrelerin sonuçları [Bkz. Ek D] hacmin tasarım parametreleri ile ilişkilendirilerek değerlendirilmektedir.

Erken Düşme Süresi ve Çınlama Süresi (EDT - T30)

Bir önceki bölümde değerlendirilen hacmin ortalama EDT ve T30 değerleri, bu bölümde 20 alıcı için Şekil 4.11’de belirtilen değerler doğrultusunda noktasal analizlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 4.11 Hacmin 20 alıcının konumuna göre EDT ve T30 değerleri

EDT ile T arasındaki ilişki önemlidir, genellikle ikisinin birbirine eşit olması veya müzik performansı için EDT’nin T’den %10 kadar büyük olması istenilmektedir. T’nin EDT’den $\pm 0,2$ sn’den daha büyük farkların olmasının nedeni:

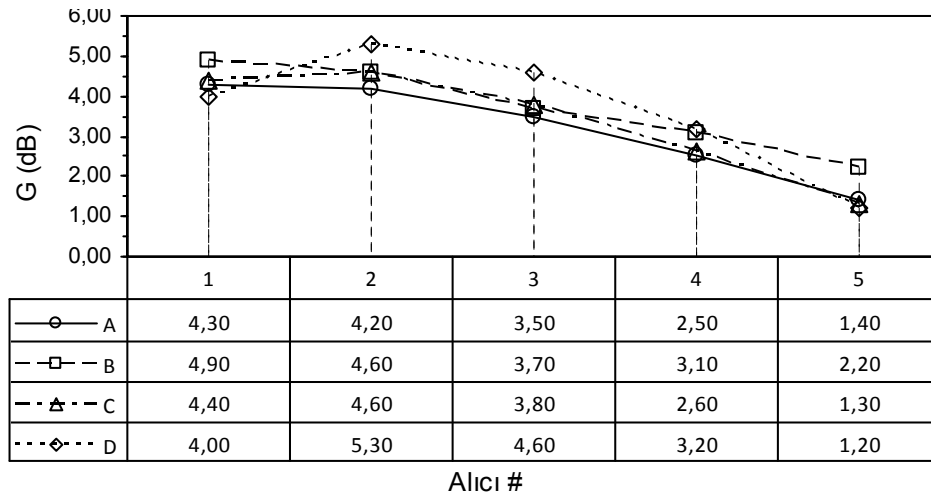
- Sinyal diyagramının yansıma bölgesinin sönüm sürecinde gecikmiş şiddetli münferit yansımaların iki eğimli düşüş eğrilerin oluşmasına neden olması
- Hacmin yükseklik ve genişlik geometrik parametrelerinin arasındaki oran aynen EDT’nin T’ye oranına da yansıdığı ortaya konmuştur. Eğer genişlik/yükseklik oranı 1.0’den büyük ise EDT/T oranının da 1.0’den büyük olduğu tespit edilmiştir [30].
- Diğer bir neden ise hacim yüzeylerine tanımlanan malzemelerle düzensiz yutuculuğa sahip bir hacim geometrisinin elde edilmiş olmasıdır.

Şekil 4.1'e bakılınca iyileştirme önerisinde A ve B grubu alıcılarında istenilen $EDT \geq T$ koşulunun sağlandığı görülmektedir. Bu gruplardaki arka duvara yakın son 2 alıcı sahneden 40 m uzaklıkta tüm gecikmiş yansımalara maruz kaldıkları için bu koşulu sağlayamamaktadırlar. C ve D grubu alıcılarında zayıf erken yansımalar tespit edilmiştir. Bunun nedeni erken yansımalar sağlama bakımından söz konusu modelde oldukça uygun olan tavan, o bölgede hacmin piramidal çatısının dört yana doğru eğiminden dolayı alçalmaktadır ve yukarda belirtilmiş olan hacmin yükseklik/genişlik oranı ihlal edilmektedir. Bunun sonucunda yansıtıcı olan tavan ve emici olan dinleyici alanı arasında yansıyan ışının kat edeceği yol uzunluğu azaldığı için erken yansımaların enerjisinde hızlı bir düşüş yaşandığı için $EDT < T$ sonuçları elde edilmiştir.

Mevcut durumda paralel yan duvarların arasında gerçekleşen tekrarlayan yansımaların neden olduğu titreşimli eko (flutter eko) algılamalarının üstesinden iyileştirme önerisinde yan duvarların paralellliğini bozarak gelinmiştir.

Ses Yüksekliği - G (Strength, Loudness - G)

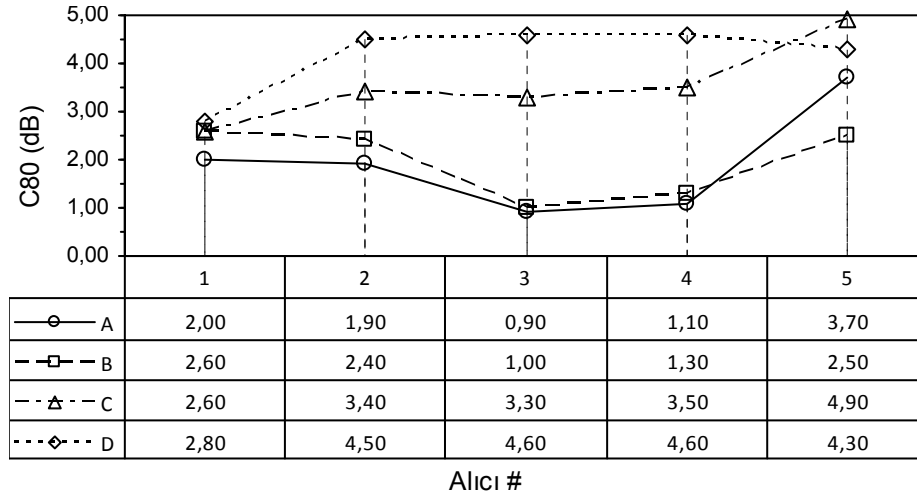
Direkt ses ile yansıyan seslerin gücünden oluşan G değeri hacimle ters orantılı EDT ve T ile doğru orantılıdır. Şekil 4.12'deki alıcı grupları için elde edilen G değerlerinin alıcı konumuna göre değişimine bakıldığında, sahneden uzaklaştıkça sesin yüksekliği G değerlerinin de azaldığı görülmektedir. Söz konusu alıcı gruplarındaki G değerinin salonun arkalarına doğru gittikçe çınlama süresinin de azalmasıyla doğrudan bağlantılıdır.



Şekil 4.12 Hacmin 20 alıcının konumuna göre hesaplanan G değerleri

Sesin Açıklığı - Netliği (Clarity – C80)

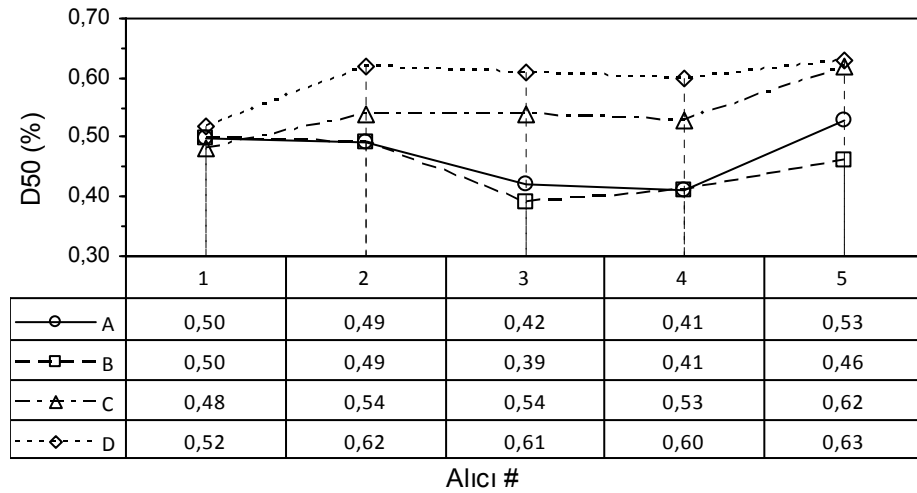
Şekil 4.13'teki C80 değerlerine bakılınca, B ve C grubundaki düşük EDT değerleri olan alıcılar için yüksek C80 değerleri elde edilmiştir. A ve B gruplarında EDT'nin uzun olmasından dolayı C80 değeri C ve B grubuna göre daha düşük hesaplanmıştır. Bu veriler ışığında salonun orta kısmı daha canlı ve düşük ses açıklığı ile algılanmaktadır, ancak yan duvarlara doğru gittikçe açıklık ve sesin dolgunluğu hissi artmakta olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.13 Hacmin 20 alıcının konumuna göre hesaplanan C80 değerleri

Konuşmanın Belirginliği (Definition- D50)

Konuşmanın belirginliği parametresi için en yüksek değerler yan duvara yakın D ve C grubu için elde edilmiştir (Şekil 4.14).

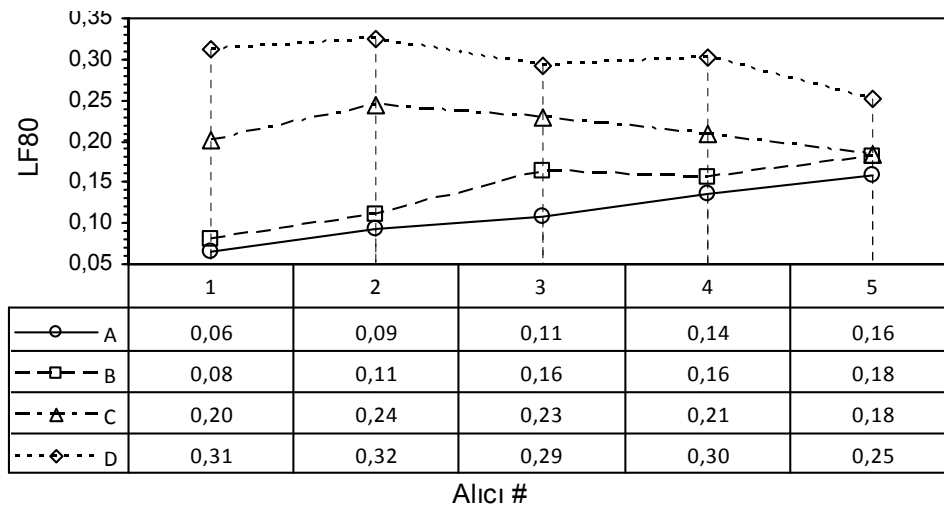


Şekil 4.14 İyileştirme önerisi için hesaplanan Konuşma Belirginliği (D50) değerleri

A ve B grubu alıcılarının yan duvarlara olan uzaklığından dolayı, yan duvarlardan ulaşması gereken erken seslerin yansıma yolu uzadığı için alıcı noktalarına gecikmiş yansımalar olarak ulaşmaktadırlar. Dolayısıyla çınlama süresinin uzadığı için sözkonusu gruplar için C ve D grubu alıcılarında daha düşük ancak istenilen optimum değer aralığında yer alan D50 değerleri hesaplanmıştır. Ancak C ve D grubu yan duvarlara yakın oldukları için alıcılara ulaşan erken enerjinin büyük bir kısmı yan duvarlardan gerçekleşen erken yansılardan oluştuğu için bu gruptaki alıcılarda konuşmanın belirginliği parametresi için oldukça yüksek değerler elde edilmiştir.

Yanal Enerji Oranı (Lateral Energy Fraction- LF80)

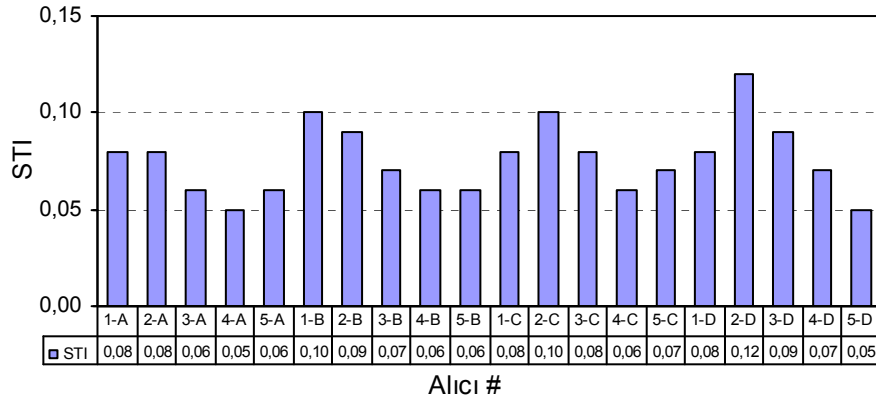
Yan duvarlardan gelen erken seslerin yansımalarının yanallığını arttırmak için hacim geometrisinde yapılan modifikasyonlar salonun 40 m gibi oldukça büyük ve zorlayıcı bir genişliğe sahip olması gerçeğini ortadan kaldırmadığını Şekil 4.15'te elde edilen değerlerden anlaşılmaktadır. Hatta salonun arka kısmındaki alıcılara iki yan duvarlar arasında titreşerek ulaşan yansımaların (flutter reflections) neden olduğu titreşimli eko oluşumunu kontrol etmek için salonun ön kısmındaki yan duvarlara uygulanan hem yansıtıcı hem yayıcı paneller ki bunlar orta frekanslarda da orta dereceden yutucu sayılmaktadırlar, LF80 parametresinin performansı mevcut halin simülasyonu ile kıyaslanınca küçük miktarda düştüğü anlaşılmaktadır. Elde edilen değerler sonucunda hacim geometrisinin bazı parametrelerinin hacmin akustiği kalitesi üzerindeki etkilerinin ıslah edilmesinin çoğu zaman güç olduğu ve daha kökten modifikasyonlara başvurulması gerektiği anlaşılmıştır.



Şekil 4.15 İyileştirme önerisi için hesaplanan Yanal Enerji Oranı (LF80) değerleri

Konuşmanın Anlaşılabilirlik İndeksi (Speech Transmission Index – STI)

İyileştirme önerisinde, hacmin küçülmesi ile çınlama süresinin kısılması gibi uygulamalar sonucunda STI parametresi de yükselme eğiliminde bulunmuştur, ancak yeterli olmamıştır. Hacim içerisinde tanımlı 20 alıcı noktasında elde edilen STI değerleri Şekil 4.16’da verilmiştir, ancak gerçekleşen artışlarla halen daha istenilen optimum değerlerin sağlanamadığı görülmektedir.



Şekil 4.16 İyileştirme önerisi için hesaplanan konuşmanın iletim indeksi (STI) değerleri

İyileştirme modeli önerisinde yapılan küçük modifikasyonlarla STI değerlerinin Şekil 4.16’da gösterildiği kadar artma eğiliminde bulunmuşsalarsa, mevcut kullanımdaki hacim geometrisinin konuşmanın anlaşılabilirliği ile ilgili sağlanması gereken akustik performansının üzerindeki olumsuz etkileri anlamamak mümkün değil. Ancak, yapılacak daha da radikal değişikliklerle bu kadar büyük bir salonda STI değerlerinin doğal akustik koşulları ile istenilen optimum değerlere çıkarılması belki de oldukça zor veya imkansız olacaktır. Bu hacmin mümkün mertebe akustik optimizasyonu yapıldı mı STI gibi C80 ve LF80 parametreleri ile ilgili salonun her köşesinde her alıcısında istenilen optimum akustik değerlerinin homojenliğini sağlamak için ses güçlendirme sistemi kullanılmalıdır.

4.3 Hacmin Mevcut Kullanımının ve İyileştirme Önerisinin Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılmalı Olarak Değerlendirilmesi

Bu çalışmada Antalya Cam Piramiti’nin mevcut kullanımına ait akustik koşullarının öngörülmesi için yapılan simülasyon çalışmasında elde edilen hacim ortalaması ve alıcı bazındaki nesnel akustik parametreler Bölüm 3’te analiz edilmiş ve tespit edilen bulular neticesinde Bölüm 4’te sözkonusu hacim için iyileştirme önerisi

geliştirilmiştir. Mevcut kullanım ile iyileştirme önerisi için simülasyon yöntemiyle hesaplanan ve hacmin akustik performansı ile ilgili öngöründe bulunmayı sağlayan akustik nesnel parametrelerle ilgili elde edilen sonuçlar ODEON akustik simülasyon programı ve ISO 3382’de tavsiye edilen optimum değerlerle karşılaştırmalı değerlendirilmesinin yapılması için Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2 Hacmin mevcut kullanımının ve iyileştirme önerisinin simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Nesnel Akustik Parametre	Sembol	ISO/CD 3382	Odeon	Mevcut Durum Sonuçları 1000 Hz	Öneri Sonuçları 1000 Hz
Erken Düşme Süresi	EDT (sn)	1.0 sn; 3.0 sn	1.7sn; 2.3 sn	2.86 sn	1,24 sn
Çınlama Süresi	T (sn)	-	1.7; 2.3 sn	2,94 sn	1,32 sn
Ses Yüksekliği	G (dB)	-2 dB; 10 dB	> 3 dB	3,5 dB	3,5 dB
Netlik, Açıklık	C80 (dB)	-5 dB; 5 dB	-1; 3 dB	-1,3 dB	2.9 dB
Konuşmanın belirginliği	D50 (%)	0.3; 0.7	-	0.29	0.51
Erken Yanal Enerji Oranı	LF80 (-)	0.05; 0.35	> 0.25	0.23	0.19
Konuşmanın Anlaşılabilirlik İndeksi	STI (-)	-	0.00–0.30 Kötü 0.30–0.45 Zayıf 0.45–0.60 Orta 0.60-0.75 İyi 0.75-1.00 Çok İyi	0,00	0,08

EDT ve T: Mevcut durum için hesaplanan 2,86 sn’lik EDT parametresi her ne kadar ISO’nun koyduğu optimum değerlerle uygunluk içerisinde görünse de, 35,000 m³’lük hacmi olan Antalya Cam Piramiti için müzik ve konuşma (opera gibi) olarak hedeflenen çok amaçlı kullanımın için tavsiye edilen EDT ile T’nin birbirine eşit ve 1,5-1,7 sn aralığında olmasıdır (Şekil 2.5). Ancak konuşma ile ilgili akustik koşulların sağlanması daha güç olduğu için iyileştirme önerisinde tasarlanan T parametresinin daha çok konuşma amaçlı performansının değerlerine yakın olmasına önem verilmiştir, çünkü bu kadar büyük dinleyici kapasiteli bir salonda tüm parametrelerin optimizasyonu doğal akustikle sağlanmasının zor olacağı için bu amaçla kullanılacak ses güçlendirme sistemi ile istenilen müzik akustik koşulları da sağlanılabilir. İyileştirme önerisi ile yarı yarıya azaltılan salonun hacmi için konuşma amaçlı performansına uygun olan 1,24 sn’lik EDT ve 1,34 sn’lik T süreleri elde edilmiştir. Konuşma için her ne kadar uygun bir değer ise, müzik performansı için yetersizdir, ve EDT öznel canlılığın nesnel ölçüsü olduğu için, bu değerdeki EDT parametresine sahip salonlar ölü olarak nitelendirilmektedirler.

Ses Yüksekliği (G): Mevcut durum için de iyileştirme için de aynı değerler elde edilmiştir. Hacimle ters, EDT ve T ile düz orantılı olduğu için, mevcut kullanımda çınlama çok yüksek olduğu için yansıyan sesler direkt sesi güçlendirmekteydi, ancak iyileştirme önerisinde hacim küçüldüğü için ses enerjisini yutan hava hacmi de küçüldüğü için direkt sesin enerjisi artmaktadır ve tablodaki değişmez durum oluşmuştur.

Netlik ve Açıklık (C80): Mevcut durumdaki C80 değerleri yüksek EDT ve T değerlerinin bir sonucu olarak oldukça düşük hesaplanmıştır, ancak müzik performansları için uygunluk gösterirken, konuşma için netliğin kaybolmuş olması manasına gelmektedir. İyileştirme sonucunda konuşma için olumlu sonuçlar elde edilmiştir, ama müzik için oldukça ölü bir hacim akustiğini tanımlayabilirler.

Konuşmanın belirginliği (D50): Yüksek EDT ve T değerlerine sahip oldukça çınlayan bir hacim olan salonun mevcut kullanımında konuşmanın belirginliğinden söz etmenin güç olduğunu elde edilen D50 değerleri ifade etmektedir. Ancak iyileştirme önerisinde EDT ve T'nin kontrol altına alınması D50 parametresini de optimum değer aralıklarına taşımıştır.

Erken Yanal Enerji Oranı (LF80): LF80 parametresi mevcut kullanımda ve iyileştirme önerisinde de istenilen optimum değerleri sağlayamamıştır. Bunun nedendi hacim geometrisi parametrelerinden salonun genişliği LF80 açısından hacim akustiği performansının olumsuz etkilemesidir.

Konuşmanın Anlaşılabilirlik İndeksi (STI): LF 80 parametresi gibi iyileştirme önerisinin geliştirilmesiyle STI değerlerinde de yükselme eğilimi gözlemlenmiştir, ancak daha da iyi değerlerin elde edilmesi için hacim geometrisine daha da müdahale edilmesi gerekli olabilir, ancak bu durumun diğer parametreleri nasıl etkileyeceği de önemlidir. Bu nedenle bir hacmin mümkün mertebe akustik optimizasyonu yapıldı mı yetersiz kalmış olan nesnel parametrelerin performansı, hacim geometrisine fazla müdahalede bulunup durumu daha da zorlaştırmamak için ses güçlendirme sistemi ile sağlanmalıdır.

BÖLÜM 5: SONUÇ

Bu tez çalışması ile Antalya Cam Piramiti'nin bilgisayar simülasyon yöntemiyle hesaplanan hacim akustiği parametreleri çerçevesinde başlıca konuşma ve ikincil olarak müzik performansları için çok kullanım amaçlı olarak akustik yeterliliğini değerlendirilmesi yapılmıştır. Antalya Cam Piramiti'nin bilgisayar ortamında hazırlanan üç boyutlu modeli ve ODEON 7.0 simülasyon programı kullanılarak hacim akustiği parametreleri hesaplanmış, hacmin geometrik parametreleriyle karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve saptanan bulgular neticesinde hacim akustiğini optimize etmeye yönelik Bölüm 4'te bir iyileştirme önerisi geliştirilmiştir. İyileştirme önerisinin de yine aynı prosedürle modellenerek bilgisayar simülasyon yöntemiyle hacme sağladığı akustik koşulların değerlendirilmesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar genel olarak incelendiğinde, her akustik parametre değeri ve hacim geometrisinin akustik tepkisi için aşağıdaki yargılara ulaşılmıştır.

Erken Düşme Süresi(EDT) ve Çınlama Süresi (T30)

- Hacmin simülasyonunda ses güçlendirme sistem hesaba katılmadan hesaplanan EDT ve T30 parametreleri için oldukça yüksek değerler elde edilmiştir ($EDT_{1000}= 2,86$ sn, $T30_{1000}= 2,94$ sn) bu da hacmin oldukça çınlayan bir yer olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni iç hacmin büyüklüğü ve kişi başına düşen hacim miktarının gerekenin iki katı olmasından dolayı kaynaklanmaktadır.
- Orta ve yüksek frekanslarda tespit edilen $EDT < T30$ ilişkisi hacmin bu frekanslardaki ses enerjisi düşüş diyagramında iki veya daha fazla eğimli düşüş eğrisinin oluştuğunu işaret etmektedir. Bu ilişkinin özellikle arka ve yan duvarlara yakın alıcı noktalarında görülmesi, o noktaların az erken yansıma ile daha fazla gecikmiş ve ekoya neden olabilecek güçlü yansımalar aldıkları tespit edilmiştir. Konser amaçlı kullanımlar için ideal EDT/T oranı olan 1,1 değeri, konuşma için ise $EDT=T$ oranlarını elde etmek için hacim geometrisine dayalı alıcı bazındaki sinyal tepki diyagramları incelenmiş ve yapılan gözlemler doğrultusunda hacim miktarı yarıya indirilerek bir iyileştirme önerisi geliştirilmiştir.

- İyileştirmenin simülasyonu ile EDT ve T değerleri 250 ve 500Hz dışındaki frekanslarda hemen hemen birbirine eşit sonuçlar elde edilmiştir. İyileştirme ile sağlanan EDT ve T parametreleri için elde edilen değerler konuşma amaçlı kullanımlar için üst, müzik amaçlı kullanımlar ise alt sınırdaki optimum sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır, çünkü bu kadar büyük bir yerde EDT ve T dışındaki akustik kaliteyi yansıtan diğer parametrelerin de etkin performansı için mutlaka ses güçlendirme sistemleri kullanılması gerektiği belirlenmiştir.

Ses Yüksekliği - G (Strength, Loudness - G)

Ses yüksekliği (G) değeri simülasyon çalışmasında kullanılan omni nokta tipi ses kaynağına 31 dB ses gücü tanımlanarak hesaplanmıştır elde edilmiştir. Direkt ses ile yansıyan seslerin gücünden oluşan G değeri, EDT ve T30 değerleri ile doğru orantılı bir davranış sergilemiştir. Hacimle ve kaynağa olan mesafe ile G değeri ters orantılıdır, yani hacim büyüdükçe veya ses kaynağından uzaklaştıkça sesin gücü veya basınç düzeyi de azalmaktadır.

Antalya Cam Piramiti'nin simülasyonu ile elde edilen değerler dinleyici alanının arkalarına doğru gittikçe G değeri azalmıştır. Hacmin olağanüstü çınlama süresine rağmen 3 dB civarında frekansa göre önemli değişiklik göstermeyen değerler elde edilmiştir.

İyileştirme önerisinin simülasyonunda G değerleri yüksek frekanslarda artmıştır. Ancak yine salonun arkalarına doğru gittikçe azalım devam etmektedir. Yanal yansımaların G değerini arttırdıkları tespit edilmiştir. Bu nedenle duvara yakın C ve D alıcı gruplarının G değerleri salonun ortalarına göre daha iyi kabul edilebilir. Hesaba herhangi bir ses güçlendirme sistemi katmaksızın doğal akustik koşullardan bir olarak 1000 Hz'te 3.5 dB gibi kabul görülen sınırlar içerisinde bir değer elde edilmesi başarılı sayılır.

Sesin Açıklığı - Netliği (Clarity – C80)

Sesin açıklığı erken ses enerjisinin gecikmiş ses enerjisine logaritmik oranıdır ve (dB) cinsinden ifade edilmektedir. İlk yansımalarla ulaşan enerjiye bağlı olarak değişim göstermektedir ve eğer sesin büyük oranı direkt ses ve ilk yansımalarla ulaşmaktaysa değeri yükselmekte, fakat gecikmiş yansımaların etkisi baskın ise

değeri azalmakta ve neticede çınlama süresi T, hacim ve yükseklik ile ters orantılı olduğu anlaşılmaktadır.

C80 parametresi için farklı kullanımlara göre farklı değer aralıkları tercih edilmektedir. Konuşma anlaşılabilirliği için 0 ile 4 arası değerler uygun görülürken, Beranek'in araştırmalarında dinleyicisiz konser salonları için tam zıt -4 ile -1 arası değerler belirtilmektedir. C80'nin konser salonlarında daha düşük, çınlayan değerlerde tercih edilmesinin nedeni, dinleyicili hallerde salonların emicilik özelliğinin artması ve çınlama süresindeki düşüş nedeniyle C80 değerlerinin yükselişe geçip optimum değerlere gelmesidir. Eğer dinleyicisiz konser salonları için optimum C80 değerleri sağlanırsa, dinleyicili hallerinde müzik sesi cansız algılanacaktır.

Antalya Cam Piramiti'nin simülasyonunda elde edilen C80 değerleri alçak ve orta frekans aralıklarında konser salonu için istenilen değerlerle uygunluk içinde, ancak konuşma anlaşılabilirliği için daha yüksek değerlere ihtiyaç duyulmaktadır. C80 değerlerin bu kadar düşük çıkmasının nedeni yüksek çınlama süresidir.

İyileştirme önerisi ile salonun mevcut durumu için elde edilen düşük değerlerin çok üstünde özellikle konuşmanın anlaşılabilirliğini destekleyecek istenilen değerlere ulaşılmıştır. Ancak salonun mevcut halinin ve iyileştirme önerisinin de simülasyonu dinleyicisiz kabul edilerek yapılmıştır ve dinleyicili haliyle hacmin yutuculuğu artıp çınlama süresi belli bir miktar azalacağı için C80 değerlerinin de bir miktar daha artması muhtemeldir. Bu durum, konuşma için sorun teşkil etmese de müzik performanslarında sesler gereğinden fazla parlak ve açık algılanmasına neden olacağı için, sesi canlandırmak için elektro-aksutik ile destek sağlanması gerekli olabilecektir.

Konuşmanın Belirginliği (Definition- D50)

Konuşmanın belirginliği 50 msn zaman dilimi içerisinde gelen erken enerjinin toplam enerjiye lineer oranıdır ve % olarak belirtilmektedir. Erken ve toplam ulaşan enerjiye dayalı olduğu için EDT ve T ile ilişkilidir. Sahneye uzaklığın artmasıyla D50 parametresi de azalmaktadır.

Antalya Cam Piramiti'nin simülasyonu ile yüksek çınlama süresinden dolayı düşük ile D50 değerleri elde edilmiştir.

İyileştirme önerisinde çınlama süresinin optimizasyonu ile istenilen değerler aralığında yer alan D50 sonuçlar elde edilmiştir.

Yanal Enerji Oranı (Lateral Energy Fraction- LF80)

Hacmin yan yüzeylerinden gelen enerjinin toplam ses enerjisine oranı olarak tanımlanan bu parametrenin performansı, genişlik ile oldukça ilişkilidir ve yan duvar uzaklığı arttıkça değeri azalır.

Güçlü yanal yansımalar LF80 değerini artırır. Antalya Cam Piramiti'nin mevcut durum simülasyonunda, iyileştirme önerisinde de yan duvarlara yakın noktalarda olan B ve C grubu alıcılarında olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ancak salonun ortalarına doğru gidildikçe bu değer oldukça azalmakta. Bunun nedeni salonun 40 m oldukça büyük genişliğe sahip olmasıdır.

Konuşmanın Anlaşılabilirlik İndeksi (Speech Transmission Index – STI)

STI parametresi hacimle ve T ile ters orantılıdır, ve Antalya Cam Piramiti'nin mevcut kullanımı için öngörülen STI parametresinin aldığı 0,00 değeriyle hacmin ne kadar çınlayan ve konuşma anlaşılabilirliği performansından oldukça uzak bir yer olduğunu belirtmektedir. Öngörülen çetin hacim akustiğinin iyileştirmek için hacim geometrisinde hacmi azaltmak gibi yapılan bazı modifikasyonlar STI için umut vaat ediciyken elde edilen yükselme eğilimi yeterli olmamıştır. Böylelikle LF80 parametresi gibi STI parametresi de hacmin geometrisinden olumsuz etkilendiği ortaya koyulmuştur.

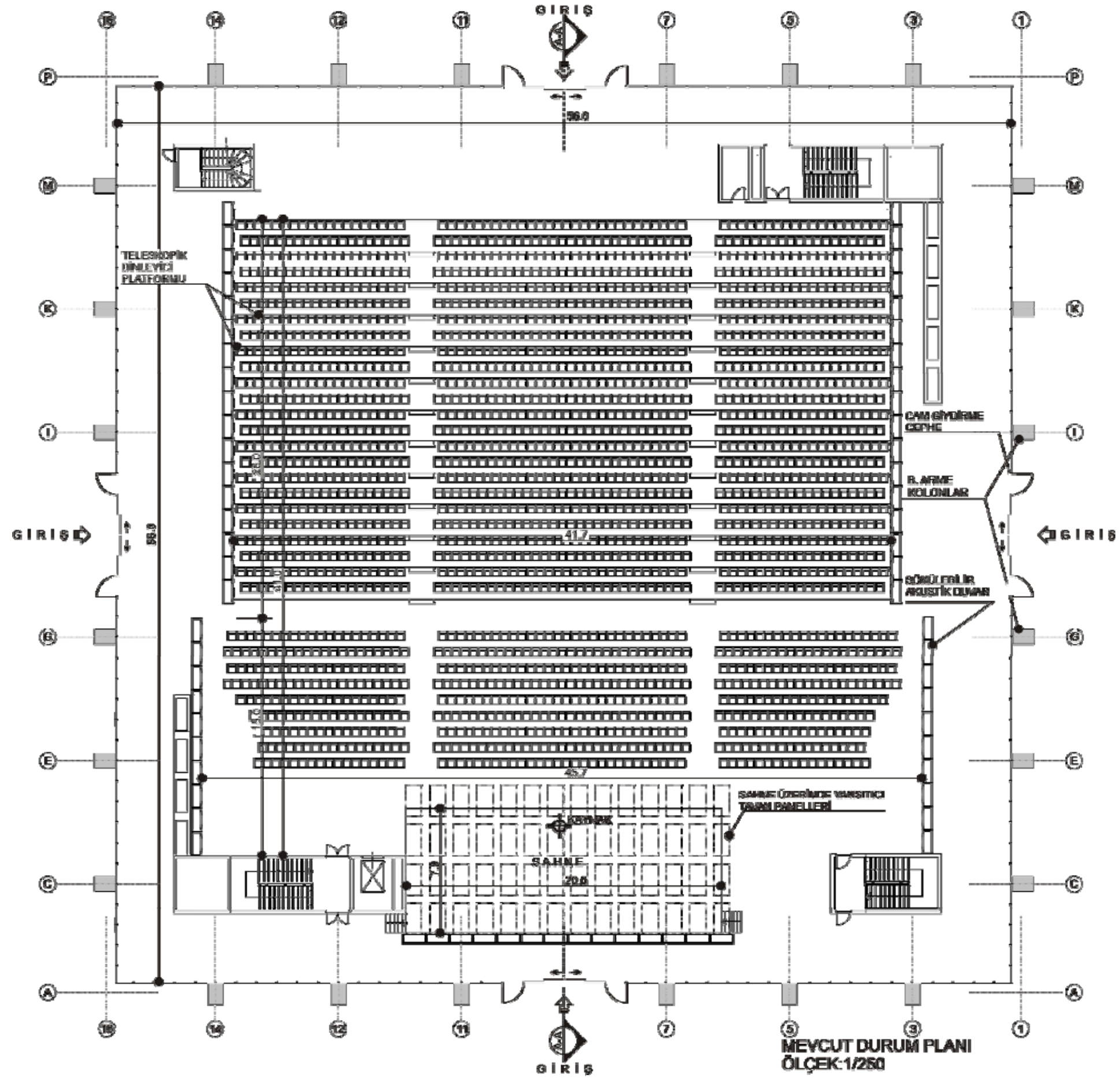
KAYNAKLAR

- [1] **Wigginton, M.**, 1996. Glass in Architecture, Phaidon Press, London.
- [2] <http://www.bilesim.com.tr/mistoportal/showmakale.nsf?xd=2771.xml>
- [3] **Barron, R.F.**, 2003. Industrial Noise Control and Acoustics, Marcel Dekker, New York.
- [4] **Button, D. and Pye B.**, 1993. Glass in Architecture, Pilkington Glass, London.
- [5] **Fronek, S.**, 2005. Acoustic options for Windows and Curtain Walls, *The Construction Specifier*, **July**, 40-46.
- [6] **Long, M.**, 2006. Architectural Acoustics, Elsevier Academic Press, USA.
- [7] **Everest, F.A.**, 2001 The Master Handbook of Acoustics, McGraw-Hill, N.Y.
- [8] **Barron, M.**, 1993. Auditorium Acoustics and Architectural Design, E & FN SPON, London
- [9] **Beranek, L.L.**, 1996. How They Sound: Concert and Opera House, Acoustical Society of America, New York
- [10] **Mehta, M., Johnson, J., and Rocafort, J.**, 1999. Architectural Acoustics Principles and Design, Prentice Hall, New Jersey
- [11] **Baron, M. and Lee, L.-J.**, 1988. Energy relations in concert auditoriums, *I. Journal of the Acoustical Society of America*, **84**, 618-628
- [12] **Kuttruff, H.**, 1991. Room Acoustics, Elsevier Applied Sciences, London.
- [13] **Bradley, J.S.** 1998. Relationships among measures of speech intelligibility in rooms, *Journal of Audio Engineering Society*, **46 (5)**, 396-404
- [14] **Marshall, A.H.**, 1967. A note on the importance of room cross-section in concert halls, *Journal of Sound and Vibration*, **5**, 100-112

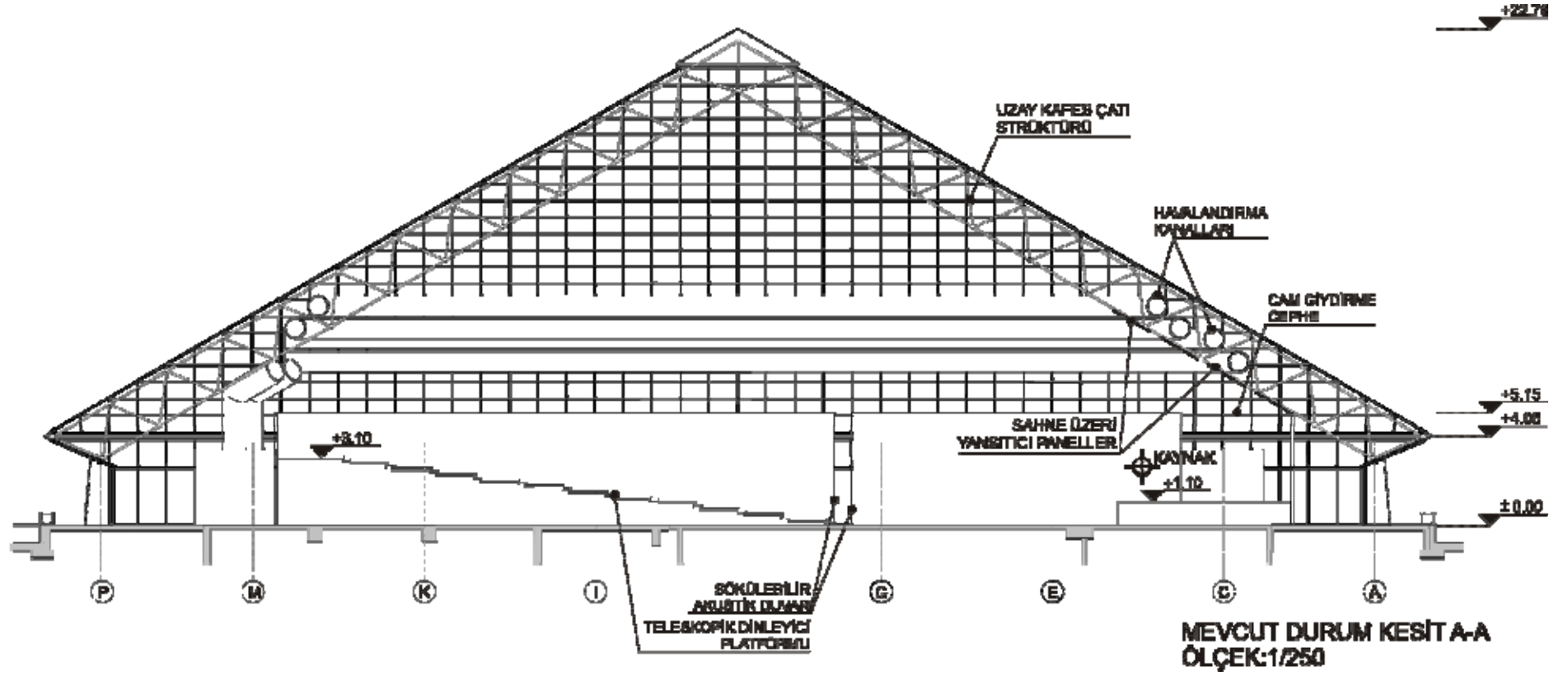
- [15] **Marshall, A.H., Baron, M.,** 1981. Spatial responsiveness in concert halls and the origins of spatial impression, *Applied Acoustics*, **62 (2)**, 91-108
- [16] **Baron, M., Marshall, A.H.,** 1981. Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: the derivation of a physical measure, *Journal of Sound and Vibration*, **77**, 211-232
- [17] **Marimoto, M., Maekawa, Z.,** 1989. Auditory spaciousness and envelopment, *Proceedings of the 13th International Congress on Acoustics*, Belgrade, February 1989, 215-218
- [18] **Bradley, J.S., Soulodre G.A.,** 1995. Objective measures of listener envelopment, *Journal of the Acoustical Society of America*, **98**, 2590-2597
- [19] **Bradley, J.S.** 1986. Predictors of Speech intelligibility in rooms, *Journal of the Acoustical Society of America*, **80 (3)**, 837-845
- [20] **Bradley, J.S., Soulodre G.A.,** 1995. The influence of late arriving energy on spatial impression, *Journal of the Acoustical Society of America*, **97**, 2263-2271
- [21] **Houtgast, T., and Steeneken H.J.M.,** 1980. Predicting Speech Intelligibility in Rooms from The Modulation Transfer, *Acoustica*, Vol. 11, 195-200.
- [22] **Houtgast, T., and Steeneken H.J.M.,** 1985. The modulation transfer function in room room acoustics, Technical Review No.3, Brüel & Kjaer Instruments, Marlborough, MA
- [23] **Baron, M.,** 2001. Late lateral energy fractions and the envelopment question in concert halls, *Applied Acoustics*, **62**, 185-202
- [24] **Doelle, L.J.,** 1972. Environmental Acoustics, MacGraw Hill, N.Y.
- [25] **ISO/ CD 3382-1.2,** 2005, Measurement of room acoustic parameters- Part 1: Performance spaces, *International Standards Organization*, Switzerland
- [26] **Christensen, C.L.,** 2003. Odeon room acoustics program user manual, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark
- [27] <http://www.ymec.com/manual/esa/appendix.htm>

- [28] **Rindel, J. H.**, 2000. The Use of Computer Modelling in room acoustics, *Journal of Vibroengineering*, **3-4**, 219-224.
- [29] **Cremer, L., Müller, H.A. and Schultz T.J.**, 1982. Principles and Applications of Room Acoustics, Vol.1, Applied Science Publishers, New York
- [30] **O'Keefe, J.**, 1999. The influence of height and width ratio and side wall boxes on room acoustics measurements, *Institute of Acoustics Papers*, Aeroustics Engineering Ltd., Toronto
- [31] **Bradley, J.S.** 1998. Acoustical Measurements in 10 Atria, *Research Report* , **IRC-IR-765**, Institute for Research in Construction, Canada
- [32] http://www.sota.ca/architectural_acoustics.htm
- [33] http://www.akutek.info/index_files/Page977.htm
- [34] http://www.rpginc.com/commercial/design_assistance/pdfs/Auditorium.pdf

EK A: ANTALYA CAM PİRAMİTİNİN MİMARİ PROJESİ



Şekil A.1: Antalya Cam Piramidi'nin mevcut durum planı

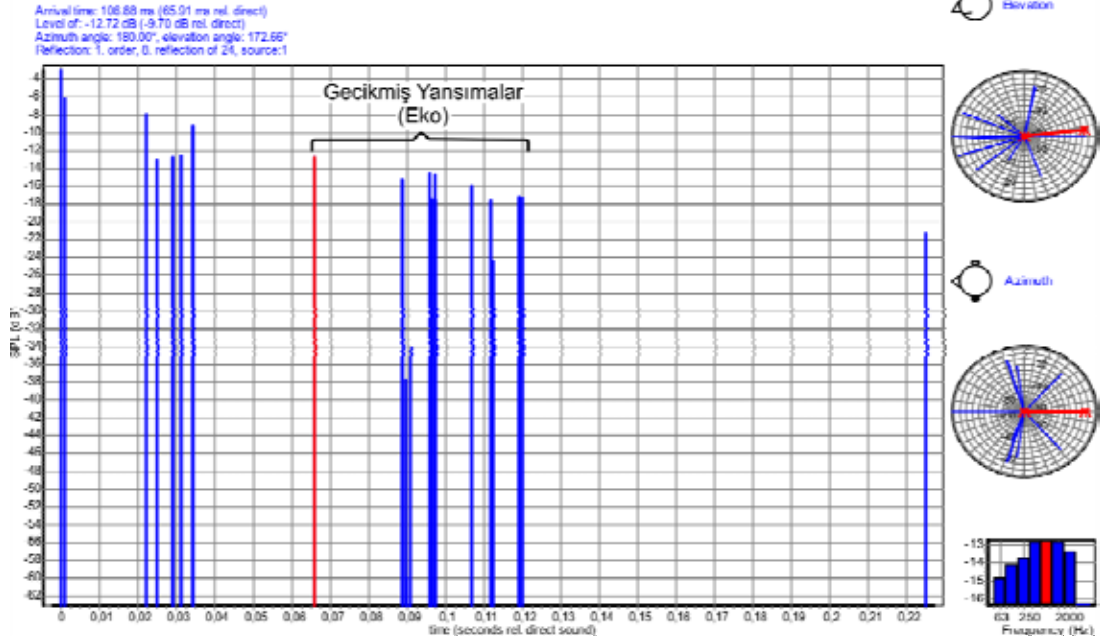


Şekil A.2: Antalya Cam Piramidinin mevcut durum kesiti

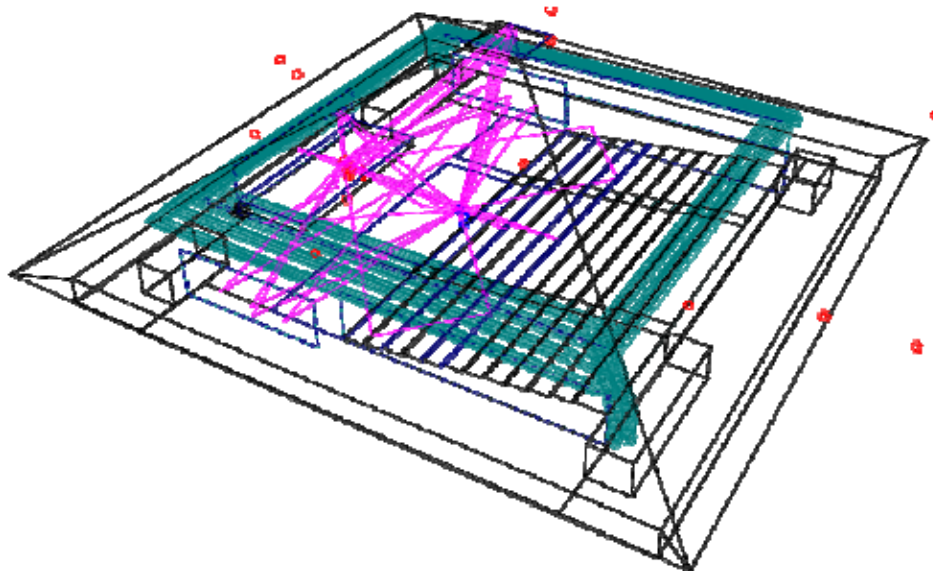
**EK B: ANTALYA CAM PİRAMİTİNİN HACİM AKUSTİĞİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ İÇİN SİMÜLASYON YÖNTEMİYLE
HESAPLANAN HACİM AKUSTİĞİ PARAMETRELERİNİN SONUÇLARI**

Tablo B.1 1-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 1-A		(x,y,z) = (67.00, -2.00, 1.10)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	3,40	2,81	2,98	2,67	2,72	1,82	0,95
T30	(s)	3,49	2,70	2,87	2,95	2,82	2,13	1,10
SPL	(dB)	5,1	4,7	4,8	5,1	5,1	4,1	1,2
C80	(dB)	-2,2	-1,4	-0,8	-0,2	0,2	1,6	5,8
D50	(%)	0,33	0,37	0,40	0,43	0,45	0,53	0,73
Ts	(s)	215	175	163	154	144	102	44
LF80		0,062	0,061	0,063	0,057	0,055	0,054	0,046
SPL(A) = 11.4 (dB)								
STI = 0.00		(T30 dayanan Teorik STI = 0.00)						



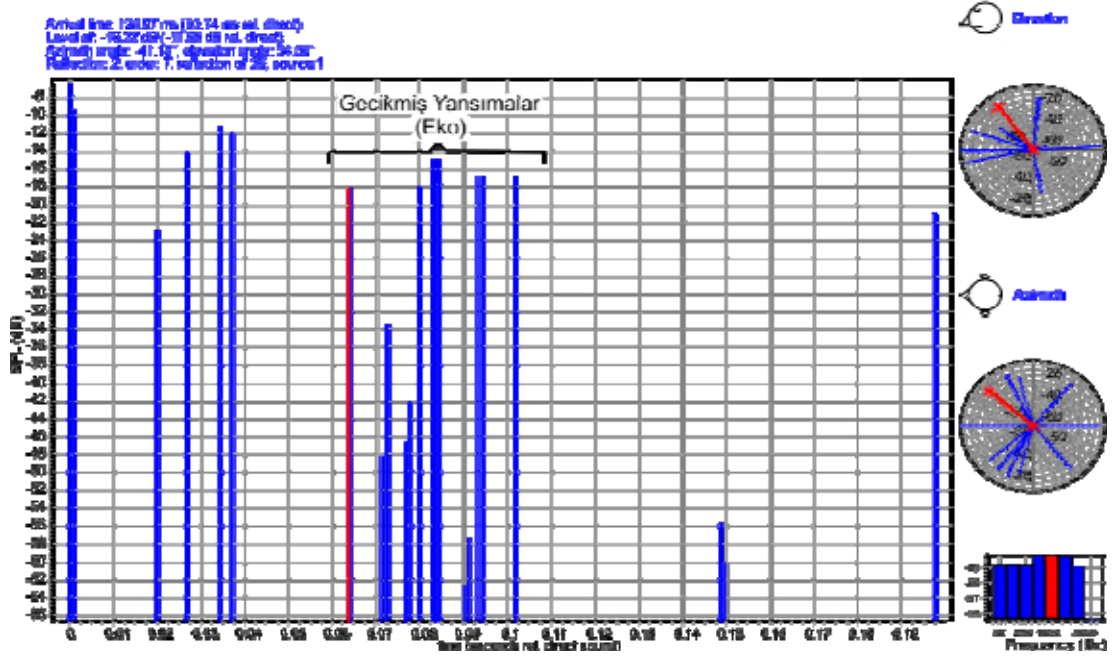
Şekil B.1 1-A Alıcısı için yansımalar grafiği



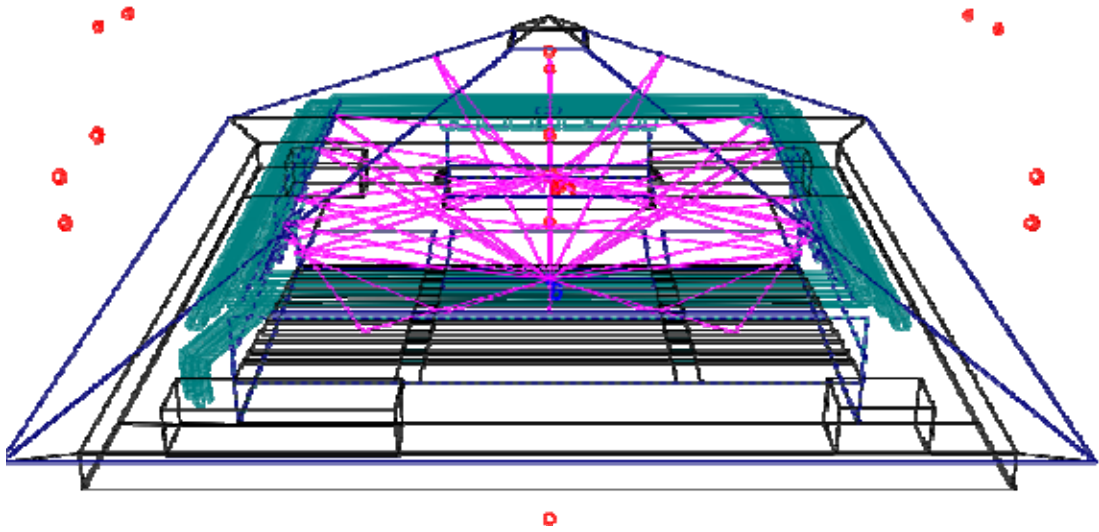
Şekil B.2 1-A Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.2 2-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 2-A		(x,y,z) = (60.00, -2.00, 1.62)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	3,46	2,88	2,78	2,94	2,77	2,00	1,04
T30	(s)	3,14	2,78	3,10	3,15	2,98	2,03	1,05
SPL	(dB)	4,5	3,9	3,9	4,0	3,9	2,8	-1,1
C80	(dB)	-4,4	-3,4	-2,8	-2,5	-2,0	-0,3	3,9
D50	(%)	0,22	0,25	0,28	0,29	0,31	0,40	0,62
Ts	(s)	249	206	196	191	180	128	59
LF80		0,100	0,112	0,114	0,110	0,106	0,100	0,087
SPL(A) = 10.2 (dB)								
STI = 0.00 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



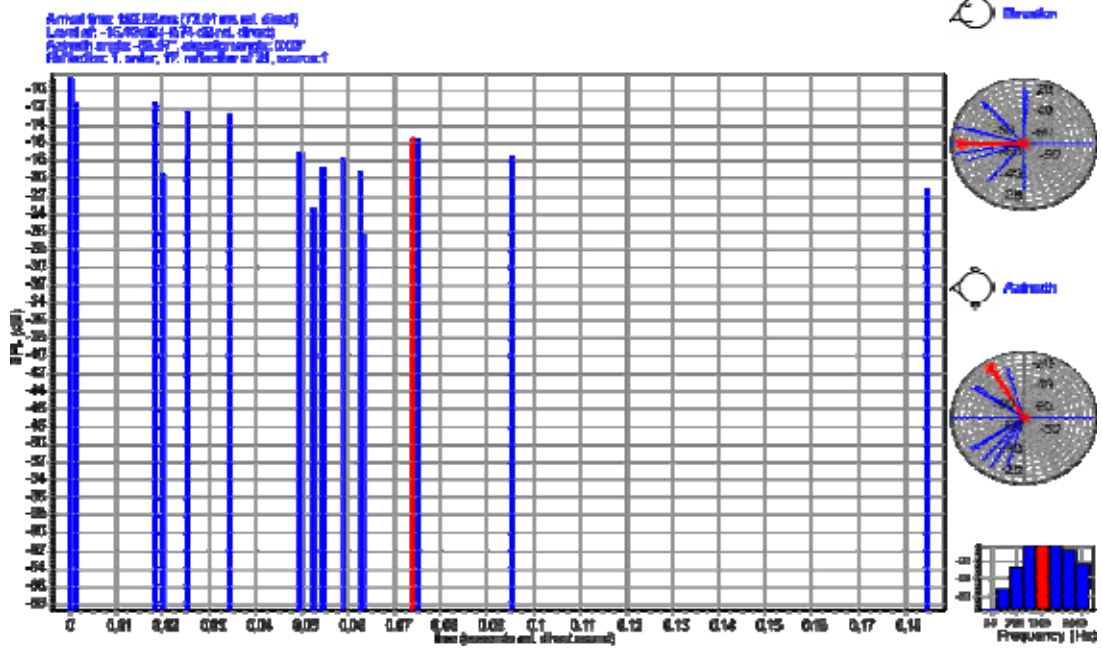
Şekil B.3 2-A Alıcısı için yansımalar grafiği



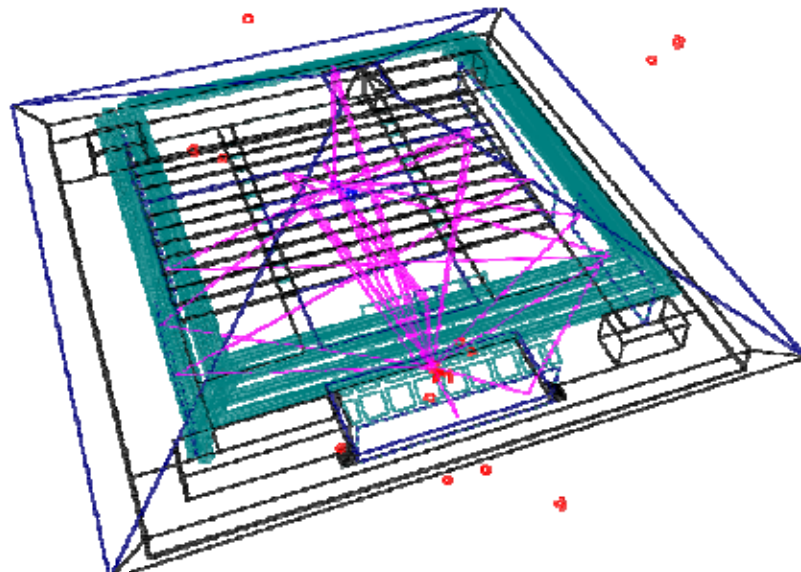
Şekil B.4 2-A Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.3 3-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 3-A		(x,y,z) = (54.00, -2.00, 2.40)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	3,37	2,80	2,76	2,63	2,61	2,03	1,10
T30	(s)	3,30	2,84	2,91	2,86	2,84	2,14	1,17
SPL	(dB)	4,2	3,5	3,5	3,7	3,6	2,2	-2,4
C80	(dB)	-3,6	-2,8	-2,1	-1,5	-1,1	0,3	4,3
D50	(%)	0,16	0,19	0,21	0,24	0,26	0,31	0,49
Ts	(s)	238	202	189	182	172	127	65
LF80		0,163	0,155	0,162	0,144	0,138	0,139	0,121
SPL(A) = 9.7 (dB)								
STI = 0.00 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



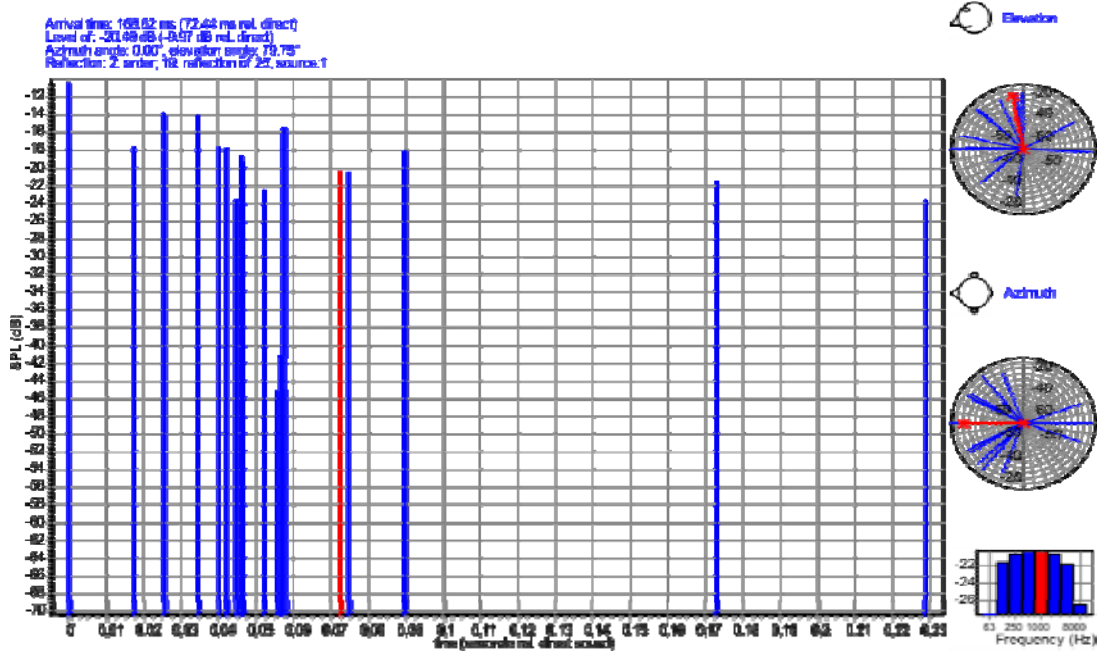
Şekil B.5 3-A Alıcısı için yansımalar grafiği



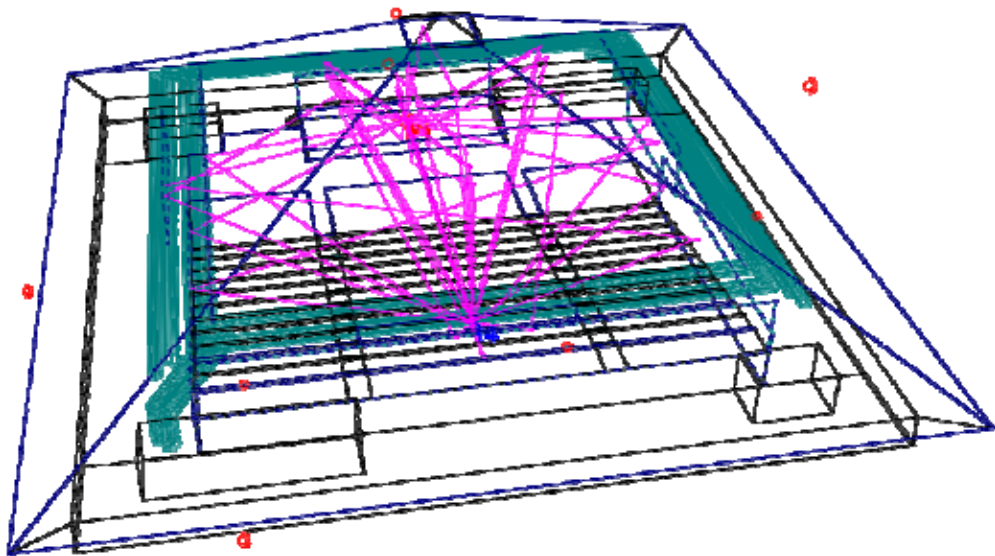
Şekil B.6 3-A Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.4 4-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 4-A		(x,y,z) = (48.00, -2.00, 3.18)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	2,85	2,56	2,79	2,61	2,54	1,67	0,84
T30	(s)	3,43	2,95	3,05	2,85	2,71	2,09	1,11
SPL	(dB)	3,7	3,2	3,0	3,1	2,9	1,2	-4,4
C80	(dB)	-4,6	-3,7	-3,4	-3,3	-2,9	-1,6	2,1
D50	(%)	0,15	0,16	0,16	0,17	0,19	0,23	0,38
Ts	(s)	227	200	203	203	192	145	80
LF80		0,188	0,211	0,211	0,206	0,195	0,197	0,176
SPL(A) = 9.0 (dB)								
STI = 0.00 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



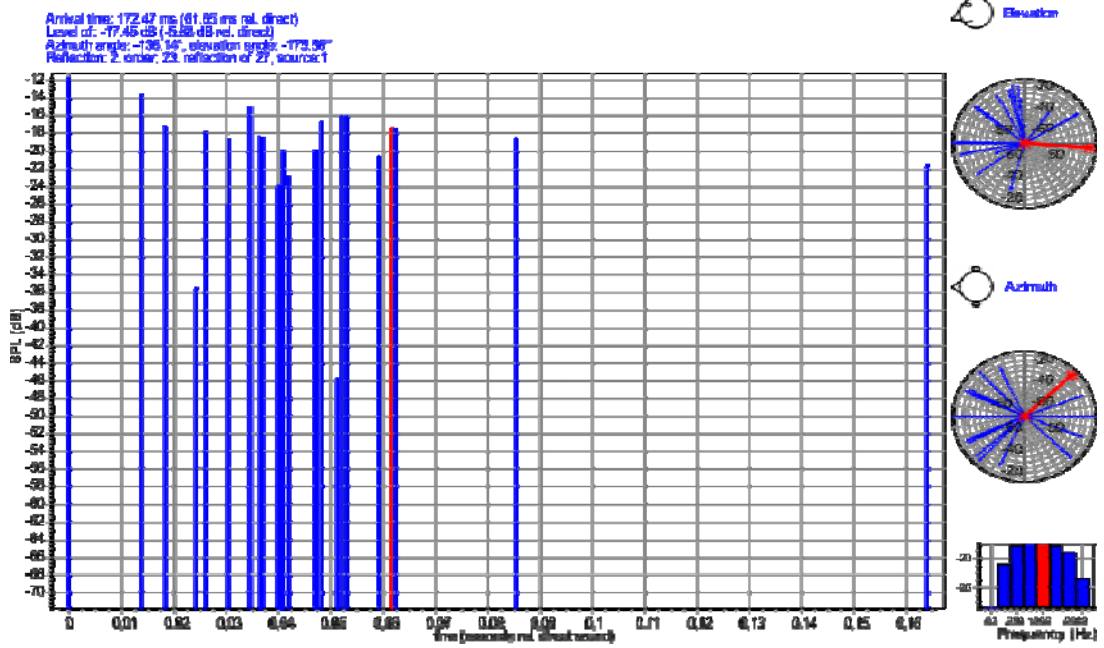
Şekil B.7 4-A Alıcısı için yansımalar grafiği



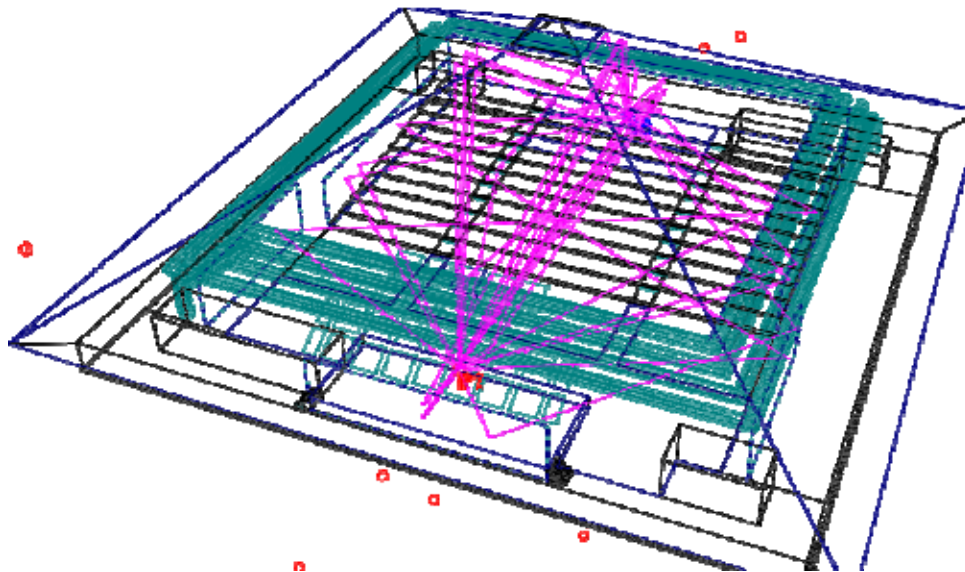
Şekil B.8 4-A Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.5 5-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 5-A		(x,y,z) = (43.00, -2.00, 3.96)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	3,35	2,69	2,61	2,54	2,59	1,66	1,21
T30	(s)	3,22	2,88	2,99	3,07	2,96	2,12	1,01
SPL	(dB)	3,2	2,8	2,7	2,8	2,5	0,9	-4,6
C80	(dB)	-1,0	-0,3	-0,3	-0,5	-0,3	1,1	4,9
D50	(%)	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,28	0,42
Ts	(s)	200	171	174	176	169	123	69
LF80		0,188	0,200	0,199	0,196	0,196	0,193	0,176
SPL(A) = 8.6 (dB)								
STI = 0.00		(T30 dayanan Teorik STI = 0.00)						



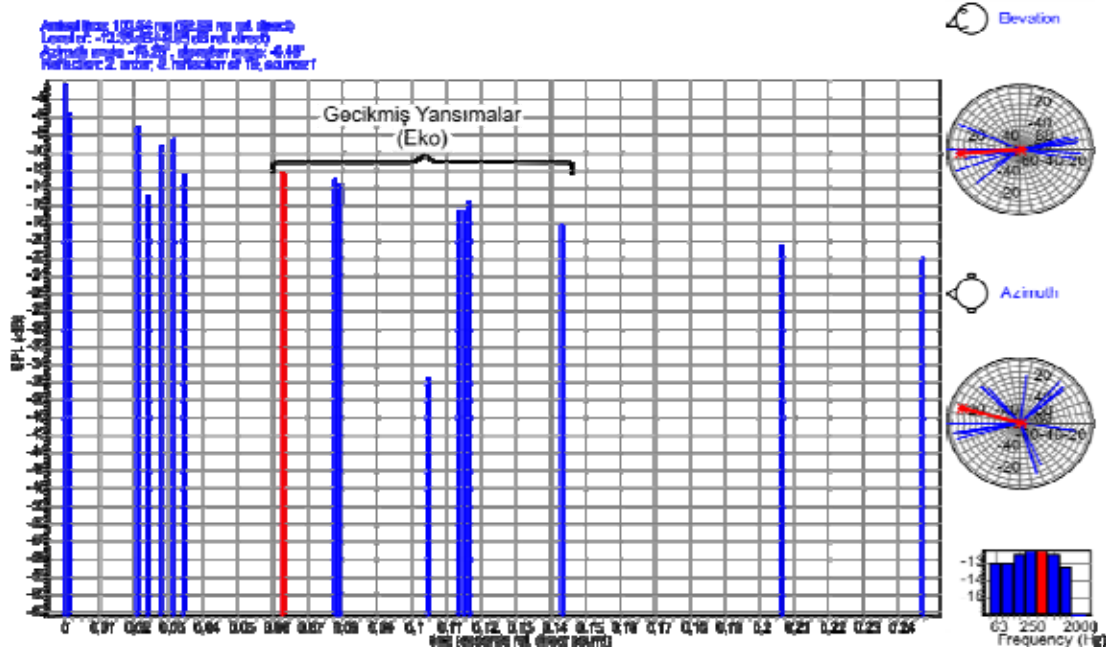
Şekil B.9 5-A Alıcısı için yansımalar grafiği



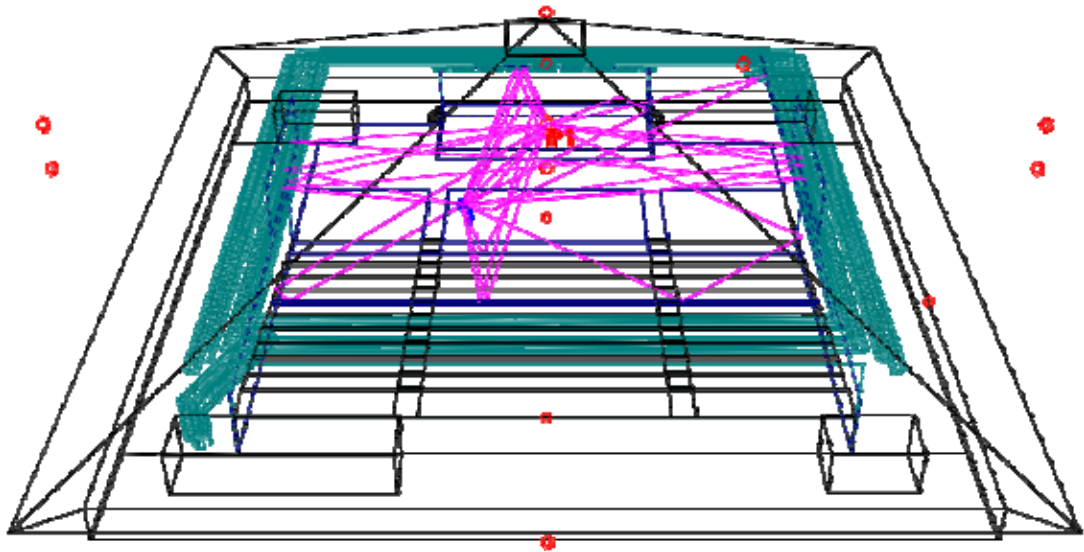
Şekil B.10 5-A Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.6 1-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 1-B		(x,y,z) = (70.00, 5.00, 1.10)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	3,56	2,99	3,15	2,96	2,80	1,94	0,60
T30	(s)	3,22	2,90	2,91	2,91	2,80	2,17	1,11
SPL	(dB)	5,2	5,0	5,2	5,6	5,4	4,4	1,6
C80	(dB)	-1,4	-0,6	-0,1	0,3	0,6	2,2	6,8
D50	(%)	0,36	0,38	0,41	0,44	0,45	0,54	0,74
Ts	(s)	209	172	162	155	147	102	41
LF80		0,108	0,119	0,117	0,111	0,113	0,111	0,091
SPL(A) = 11.7 (dB)								
STI = 0.00		(T30 dayanan Teorik STI = 0.00)						



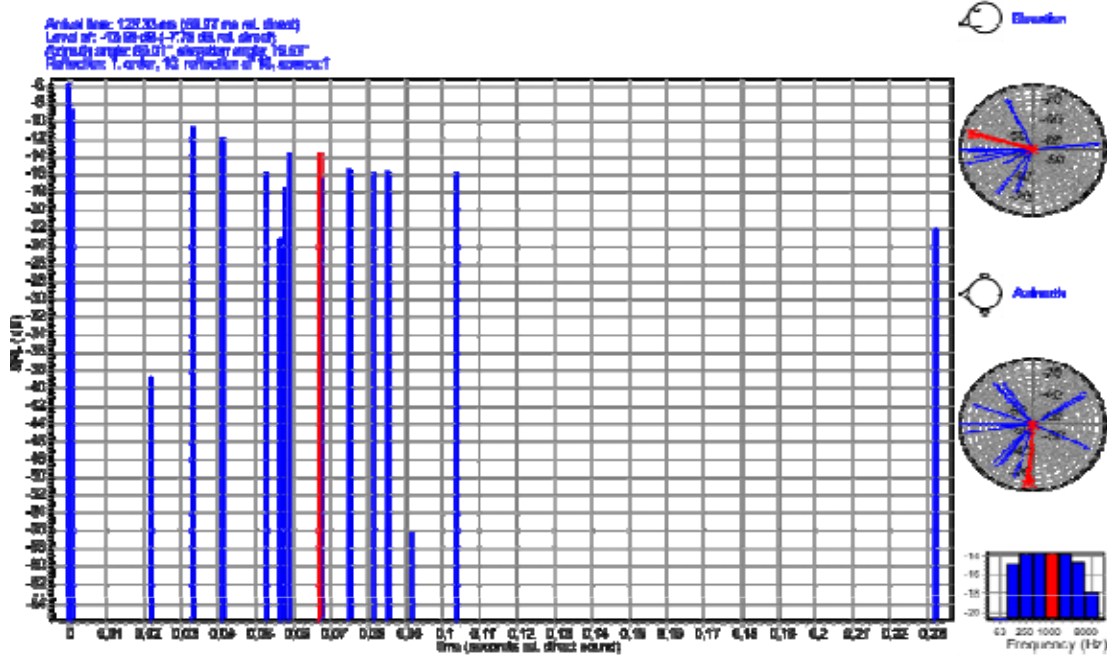
Şekil B.11 1-B Alıcısı için yansımalar grafiği



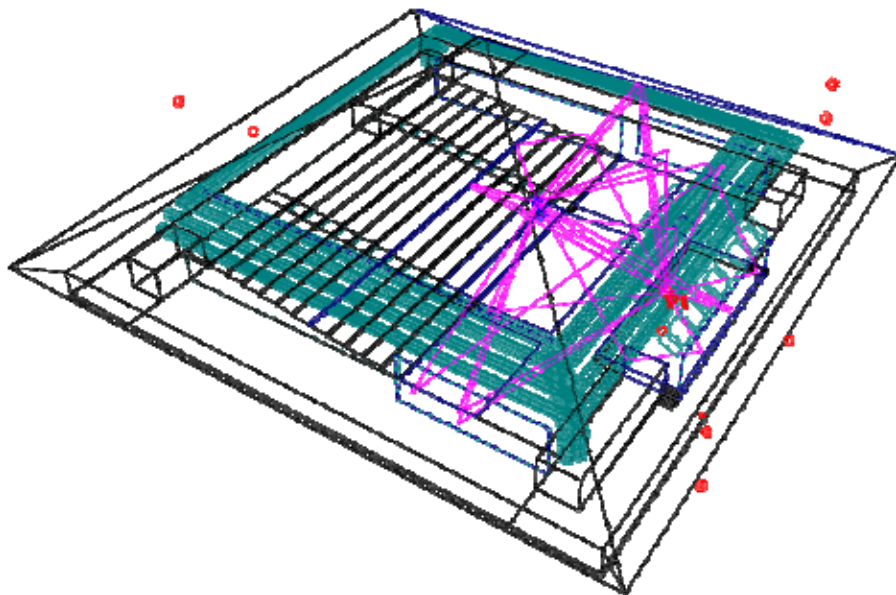
Şekil B.12 1-B Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.7 2-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 2-B		(x,y,z) = (63.00, 5.00, 1.36)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	3,49	2,80	3,05	2,93	2,89	2,12	1,10
T30	(s)	3,22	2,79	2,82	3,02	2,86	2,15	0,95
SPL	(dB)	4,2	3,8	3,8	3,9	3,7	2,3	-1,7
C80	(dB)	-3,2	-2,3	-2,0	-2,0	-1,8	-0,4	3,9
D50	(%)	0,22	0,25	0,25	0,25	0,26	0,32	0,53
Ts	(s)	240	200	192	190	182	134	62
LF80		0,154	0,183	0,189	0,189	0,190	0,184	0,148
SPL(A) = 9.9 (dB)								
STI = 0.00 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



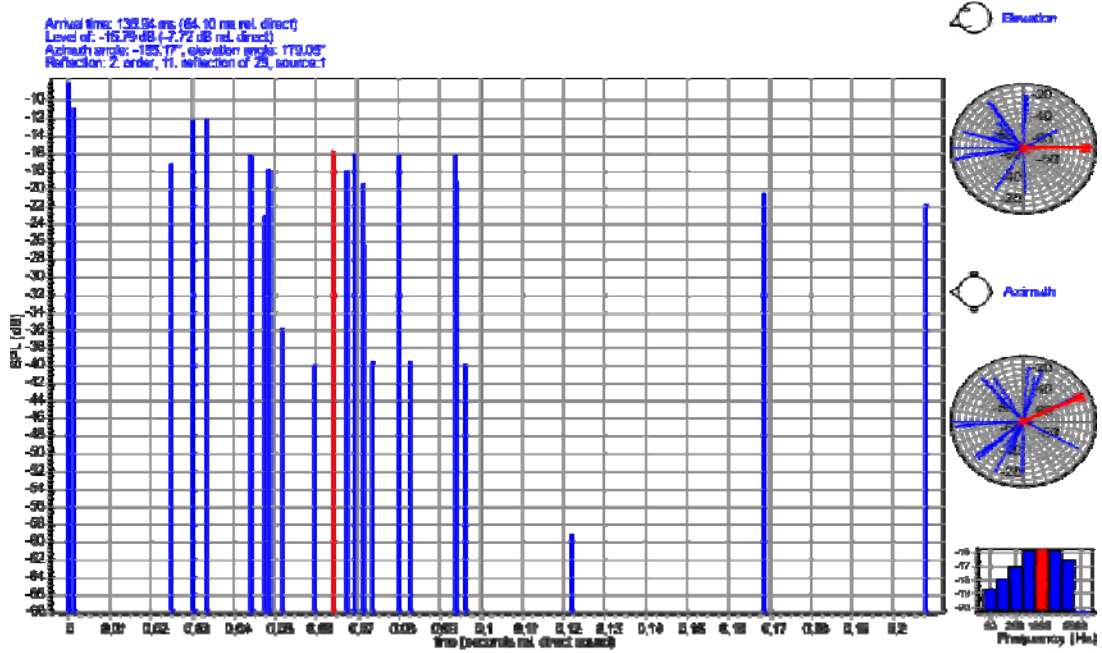
Şekil B.13 2-B Alıcısı için yansımalar grafiği



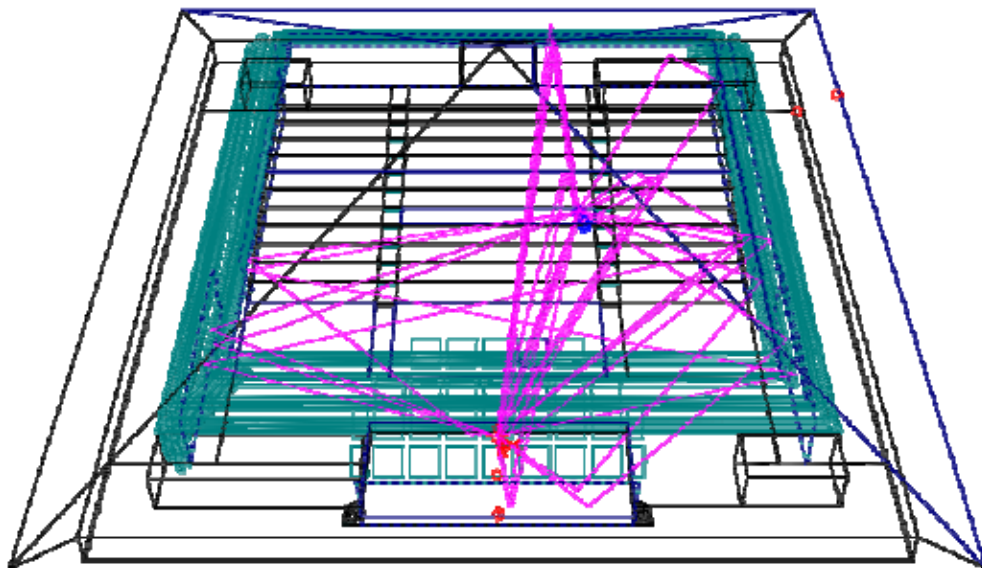
Şekil B.14 2-B Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.8 3-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 3-B		(x,y,z) = (57.00, 5.00, 2.14)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	3,60	3,01	3,19	3,05	2,94	1,99	1,16
T30	(s)	3,23	2,82	2,87	2,83	2,71	2,11	0,98
SPL	(dB)	4,1	3,5	3,4	3,5	3,3	1,8	-2,9
C80	(dB)	-5,0	-4,1	-3,6	-3,4	-3,0	-1,5	2,7
D50	(%)	0,17	0,19	0,20	0,21	0,23	0,29	0,48
Ts	(s)	255	218	214	213	202	149	72
LF80		0,140	0,144	0,147	0,144	0,138	0,140	0,136
SPL(A) = 9.4 (dB)								
STI = 0.00		(T30 dayanan Teorik STI = 0.00)						



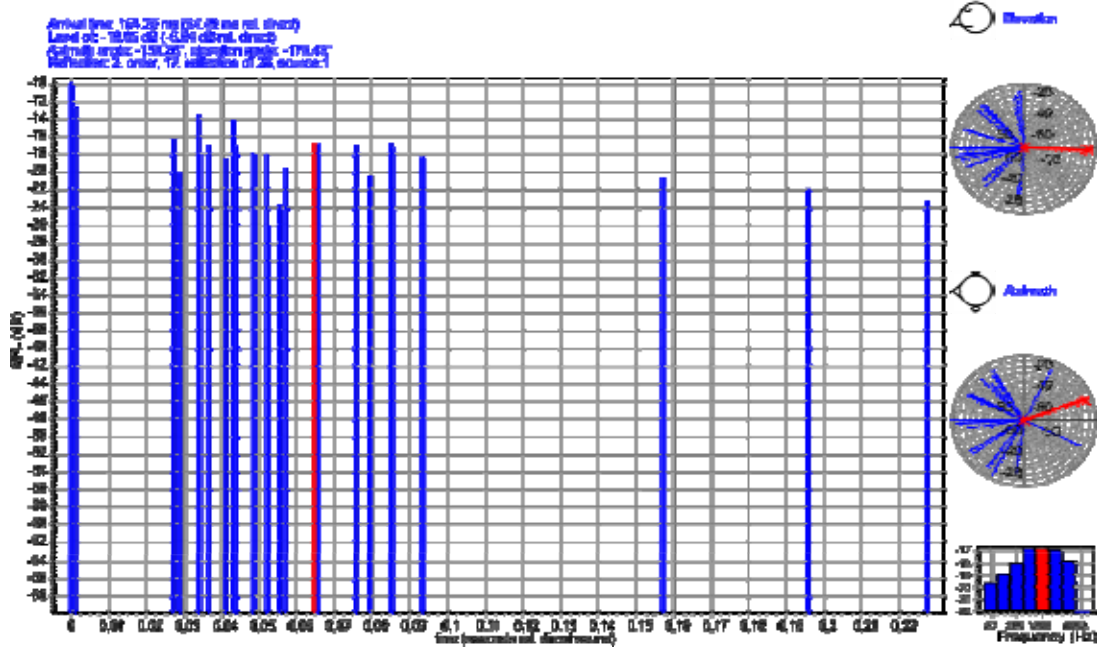
Şekil B.15 3-B Alıcısı için yansımalar grafiği



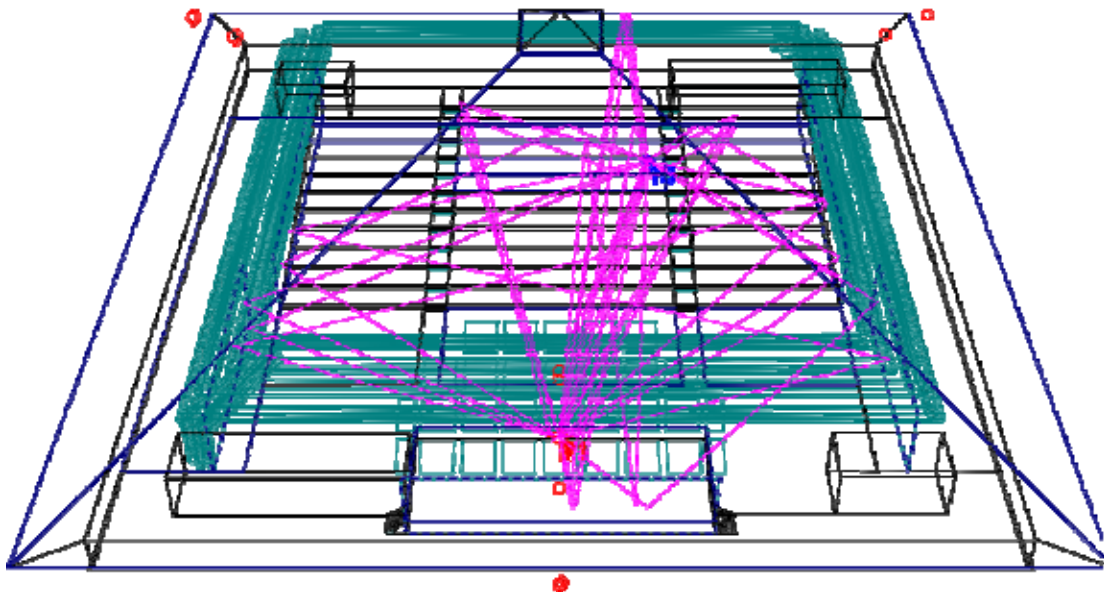
Şekil B.16 3-B Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.9 4-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 4-B		(x,y,z) = (51.00, 5.00, 2.92)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	3,07	2,73	2,80	2,96	2,92	1,82	0,68
T30	(s)	3,18	2,60	2,58	2,75	2,54	2,15	0,98
SPL	(dB)	4,1	3,5	3,4	3,3	3,1	1,4	-3,9
C80	(dB)	-4,2	-3,4	-3,1	-3,1	-2,9	-1,6	2,1
D50	(%)	0,17	0,19	0,20	0,20	0,21	0,25	0,42
Ts	(s)	228	199	201	201	194	145	77
LF80		0,201	0,210	0,212	0,212	0,213	0,210	0,187
SPL(A) = 9.2 (dB)								
STI = 0.00 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



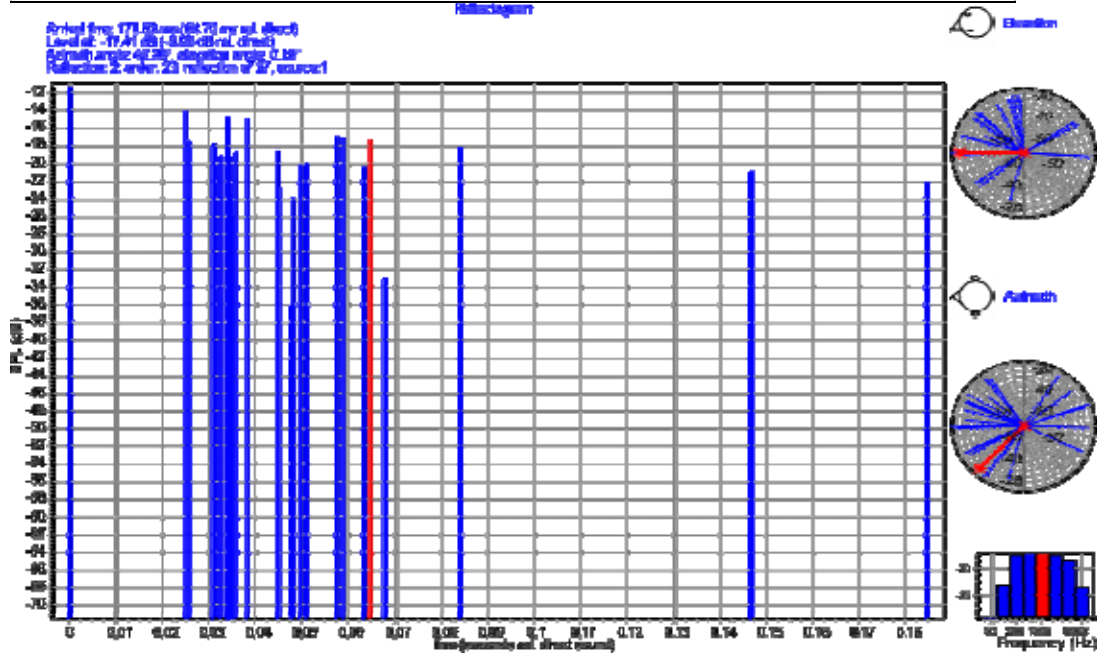
Şekil B.17 4-B Alıcısı için yansımalar grafiği



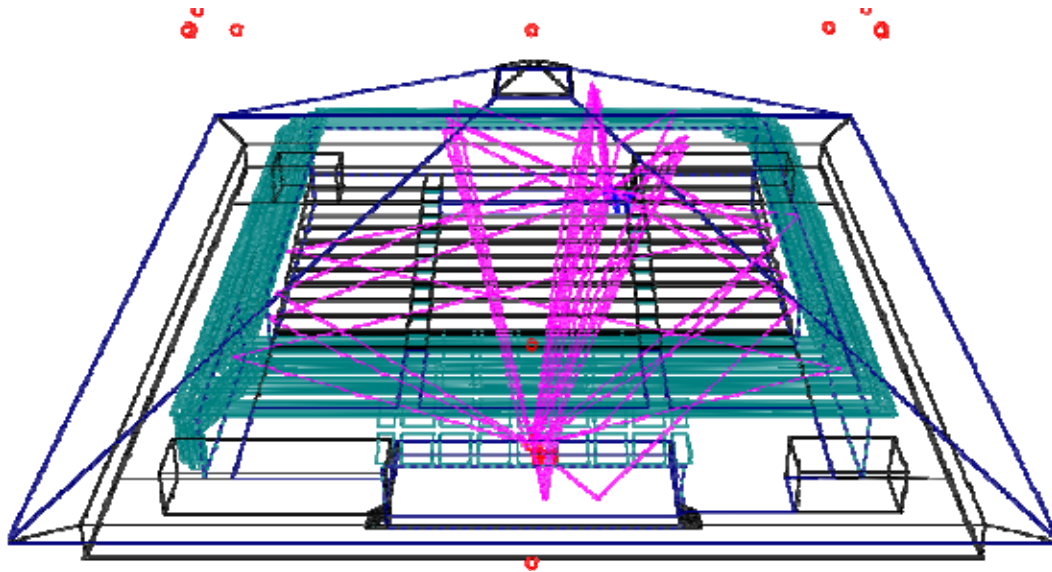
Şekil B.18 4-B Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.10 5-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 5-B		(x,y,z) = (45.00, 5.00, 3.70)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	3,05	2,65	2,67	2,62	2,35	1,53	0,43
T30	(s)	3,14	2,77	2,85	3,03	2,83	2,06	1,23
SPL	(dB)	3,7	3,2	3,2	3,1	2,9	1,3	-4,1
C80	(dB)	-1,5	-0,6	-0,5	-0,6	-0,4	0,9	4,4
D50	(%)	0,21	0,23	0,23	0,23	0,23	0,27	0,40
Ts	(s)	198	167	168	170	164	123	71
LF80		0,190	0,204	0,208	0,212	0,213	0,214	0,210
SPL(A) = 9.0 (dB)								
STI = 0.00 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



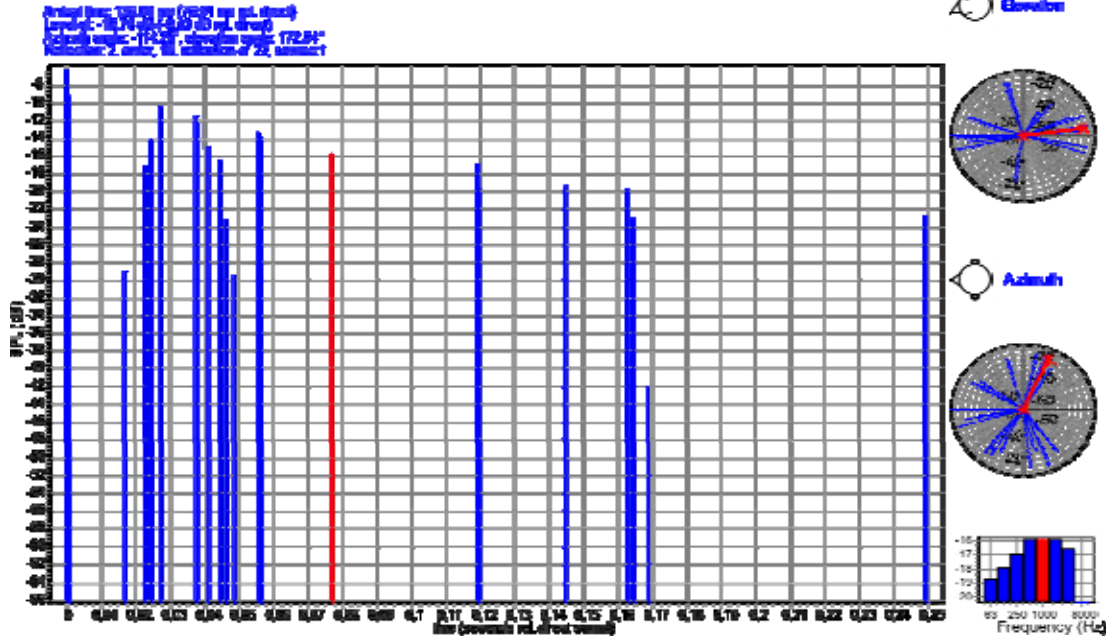
Şekil B.19 5-B Alıcısı için yansımalar grafiği



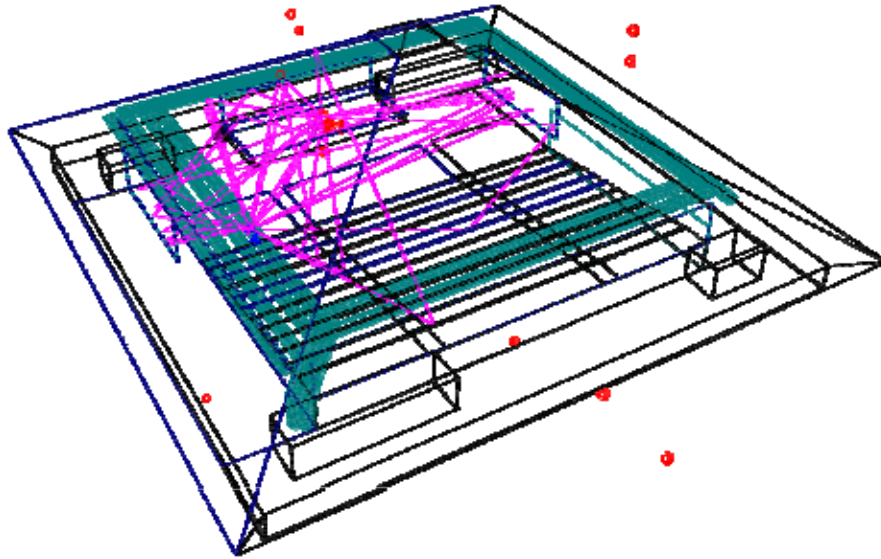
Şekil B.20 5-B Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.11 1-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 1-C		(x,y,z) = (67.00, 13.00, 1.10)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	3,37	2,68	2,67	2,90	2,75	1,78	1,00
T30	(s)	3,29	2,85	3,01	2,95	2,89	2,06	1,01
SPL	(dB)	4,0	3,8	3,9	4,1	4,0	2,9	-0,6
C80	(dB)	-1,0	-0,2	-0,1	-0,1	0,4	2,1	6,8
D50	(%)	0,30	0,34	0,34	0,33	0,36	0,44	0,64
Ts	(s)	204	171	170	169	157	110	50
LF80		0,290	0,329	0,344	0,342	0,329	0,328	0,296
SPL(A) = 10.2 (dB)								
STI = 0.00 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



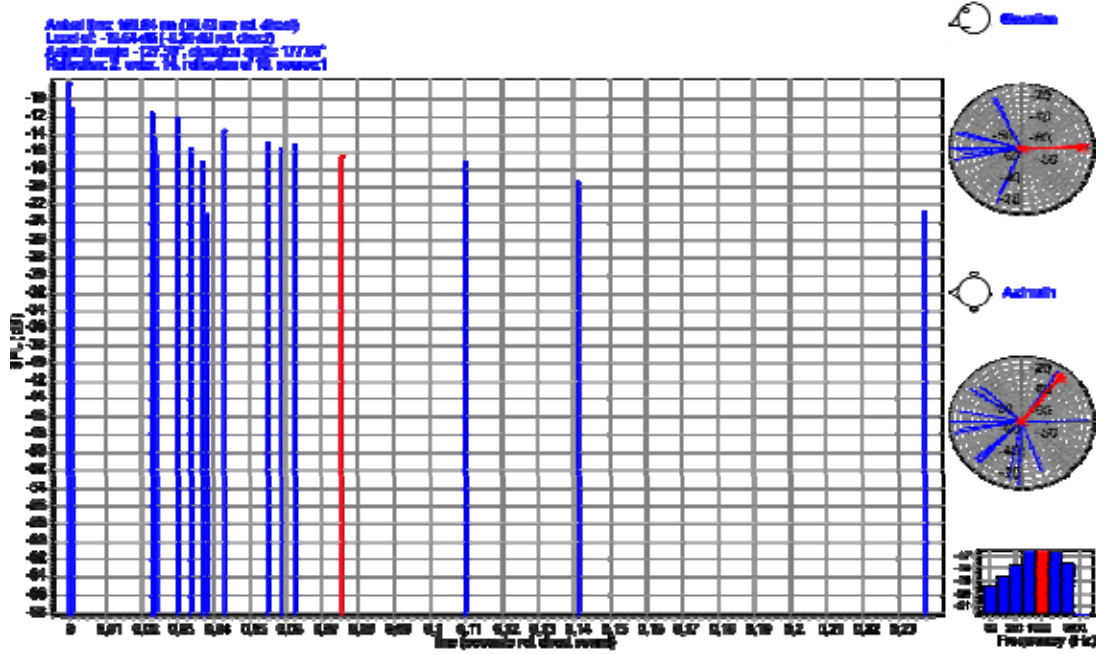
Şekil B.21 1-C Alıcısı için yansımalar grafiği



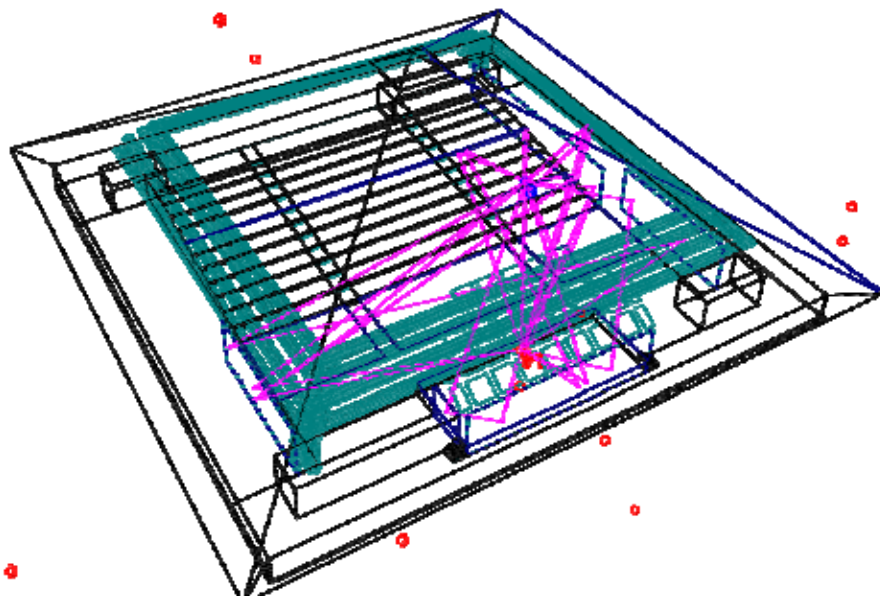
Şekil B.22 1-C Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.12 2-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 2-C		(x,y,z) = (60.00, 13.00, 1.88)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	3,59	3,16	3,00	3,10	2,89	2,15	0,89
T30	(s)	3,15	2,79	2,96	2,96	2,87	2,21	1,11
SPL	(dB)	3,5	3,1	3,2	3,3	3,2	1,8	-2,5
C80	(dB)	-2,1	-1,1	-0,9	-0,9	-0,5	1,1	5,4
D50	(%)	0,29	0,31	0,31	0,32	0,34	0,41	0,60
Ts	(s)	224	186	182	182	172	123	58
LF80		0,269	0,293	0,300	0,297	0,288	0,286	0,270
SPL(A) = 9.4 (dB)								
STI = 0.00 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



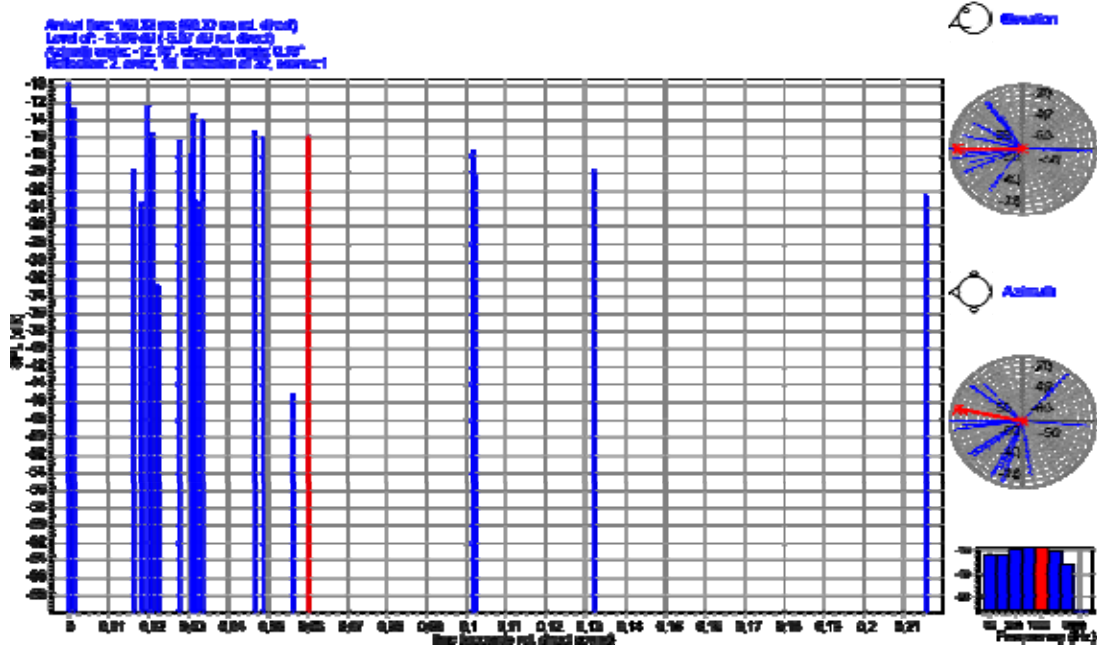
Şekil B.23 2-C Alıcısı için yansımalar grafiği



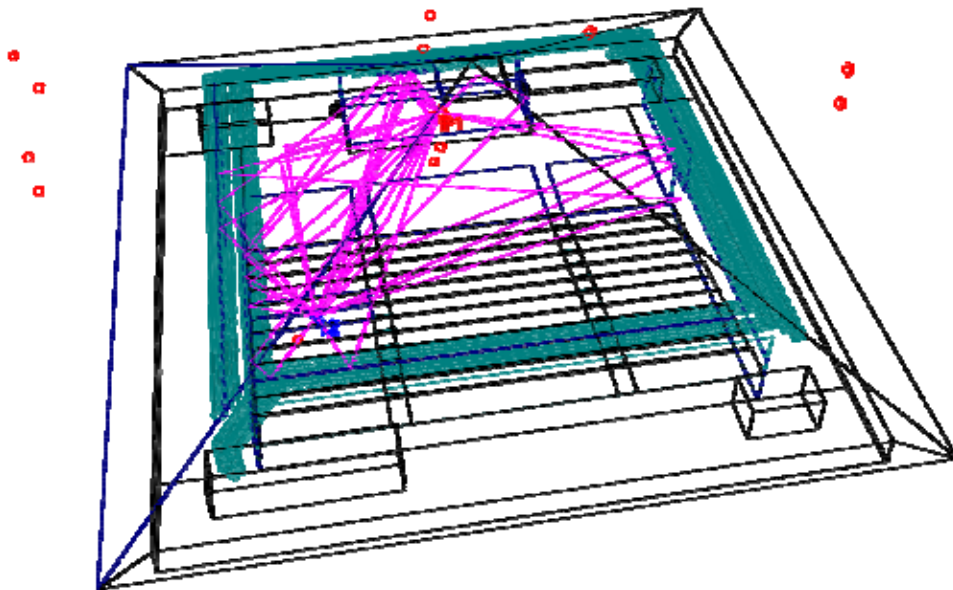
Şekil B.24 2-C Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.13 3-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 3-C		(x,y,z) = (54.00, 13.00, 2.66)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	3,20	2,79	2,77	3,02	2,86	1,60	1,15
T30	(s)	3,32	2,89	3,02	2,89	2,88	2,19	0,99
SPL	(dB)	3,1	2,7	2,7	2,8	2,8	1,4	-3,1
C80	(dB)	-2,6	-1,9	-1,8	-1,7	-1,1	0,7	4,9
D50	(%)	0,27	0,30	0,30	0,31	0,34	0,43	0,64
Ts	(s)	216	184	183	181	168	119	58
LF80		0,274	0,287	0,295	0,296	0,290	0,291	0,281
SPL(A) = 8.9 (dB)								
STI = 0.00		(T30 dayanan Teorik STI = 0.00)						



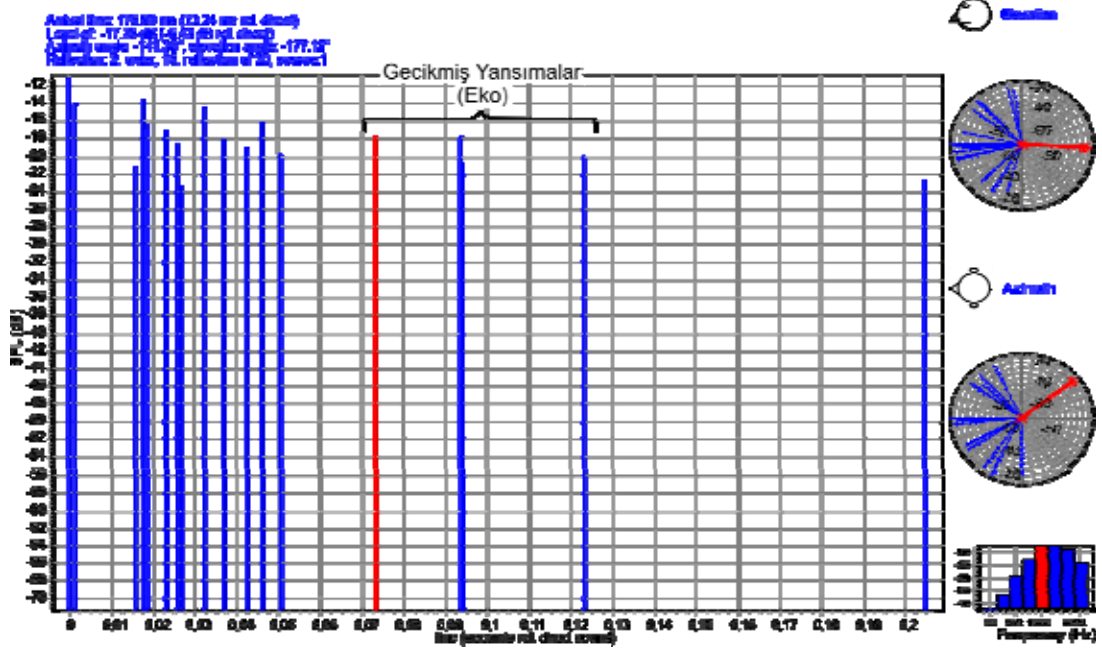
Şekil B.25 3-C Alıcısı için yansımalar grafiği



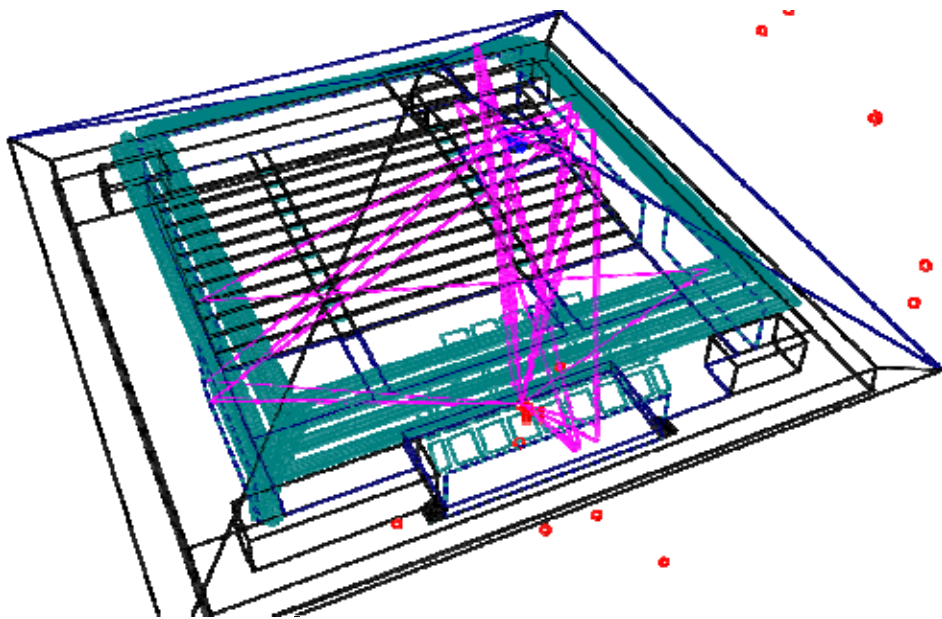
Şekil B.26 3-C Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.14 4-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 4-C		(x,y,z) = (48.00, 13.00, 3.44)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	3,13	2,64	2,65	2,88	2,61	2,15	0,45
T30	(s)	3,29	2,86	2,96	2,91	2,91	1,98	1,09
SPL	(dB)	3,2	2,8	2,8	3,0	2,8	1,2	-4,3
C80	(dB)	-2,9	-2,1	-2,1	-2,0	-1,7	-0,2	3,5
D50	(%)	0,20	0,22	0,23	0,23	0,25	0,31	0,48
Ts	(s)	212	183	183	182	174	128	67
LF80		0,232	0,242	0,250	0,247	0,240	0,235	0,225
SPL(A) = 8.9 (dB)								
STI = 0.00 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



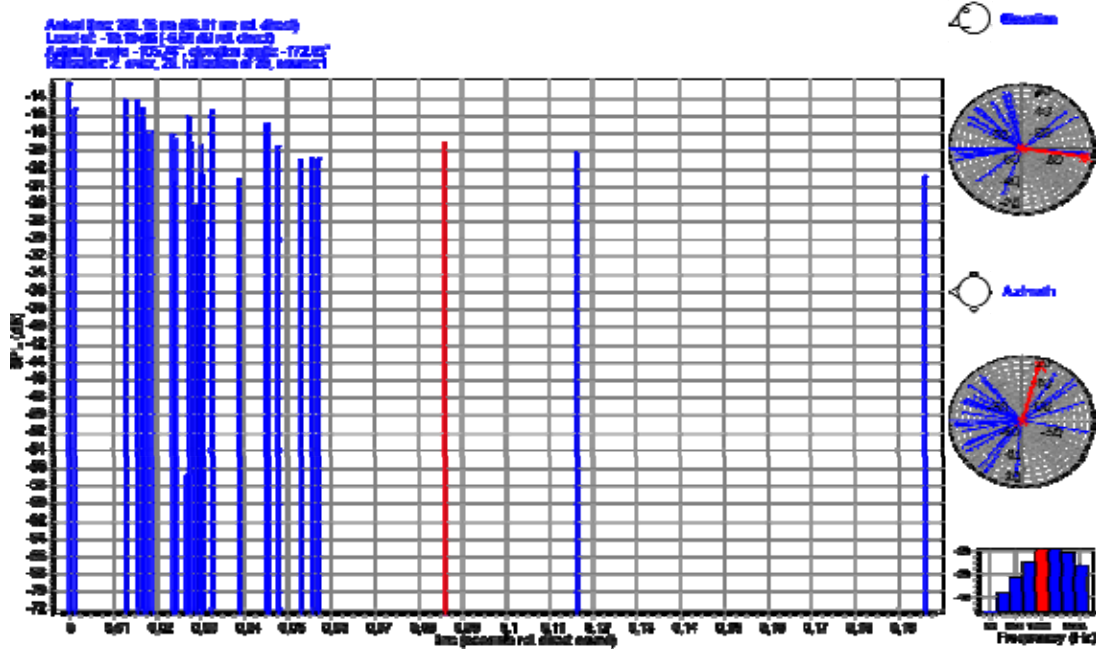
Şekil B.27 4-C Alıcısı için yansımalar grafiği



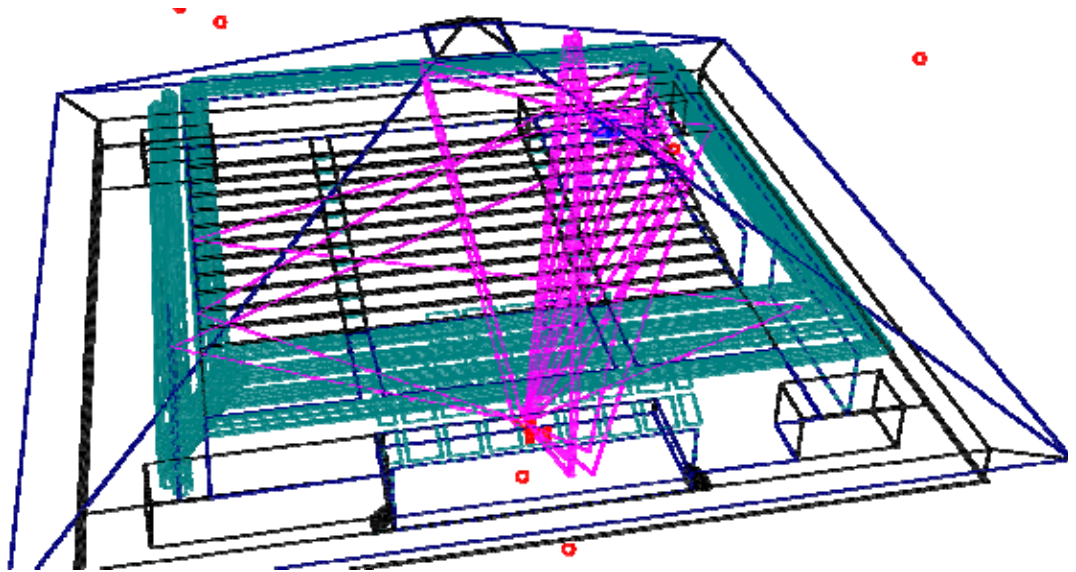
Şekil B.28 4-C Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.15 5-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 5-C		(x,y,z) = (43.00, 13.00, 4.22)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	2,91	2,25	2,64	2,72	2,22	1,52	0,81
T30	(s)	3,41	2,85	3,05	2,96	2,85	2,13	1,16
SPL	(dB)	2,9	2,6	2,6	2,7	2,4	0,8	-4,6
C80	(dB)	0,0	0,6	0,7	0,5	0,7	2,1	5,9
D50	(%)	0,31	0,34	0,35	0,34	0,35	0,40	0,56
Ts	(s)	166	146	150	153	147	108	58
LF80		0,251	0,271	0,276	0,277	0,276	0,273	0,266
SPL(A) = 8.5 (dB)								
STI = 0.00		(T30 dayanan Teorik STI = 0.00)						



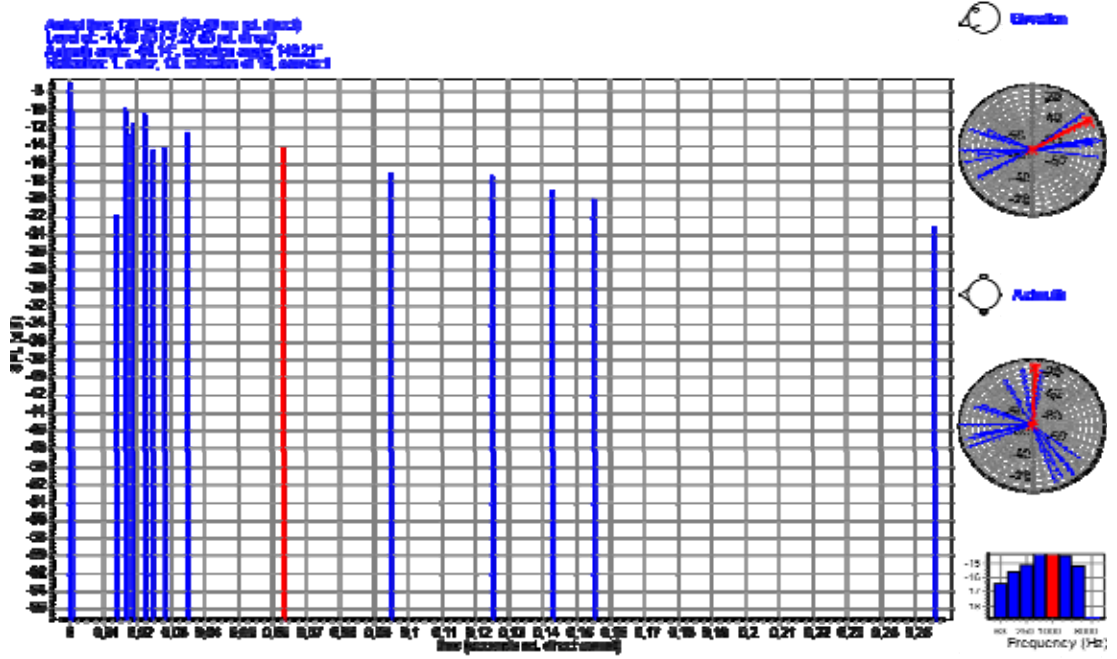
Şekil B.29 5-C Alıcısı için yansımalar grafiği



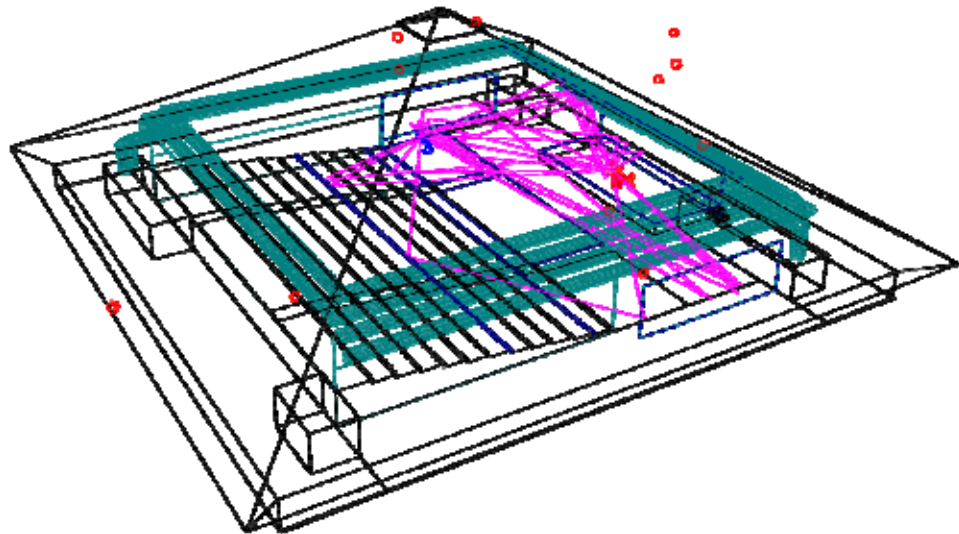
Şekil B.30 5-C Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.16 1-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 1-D		(x,y,z) = (70.00, 17.50, 1.10)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	3,32	3,19	3,18	3,13	2,90	2,02	0,46
T30	(s)	3,17	2,81	2,92	2,85	2,90	2,15	1,14
SPL	(dB)	3,4	3,4	3,7	4,1	4,1	3,0	-0,6
C80	(dB)	-0,8	-0,3	-0,4	-0,1	0,5	2,6	7,6
D50	(%)	0,36	0,38	0,38	0,40	0,43	0,55	0,75
Ts	(s)	204	177	178	172	159	105	44
LF80		0,312	0,328	0,338	0,329	0,329	0,306	0,285
SPL(A) = 10.3 (dB)								
STI = 0.00 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



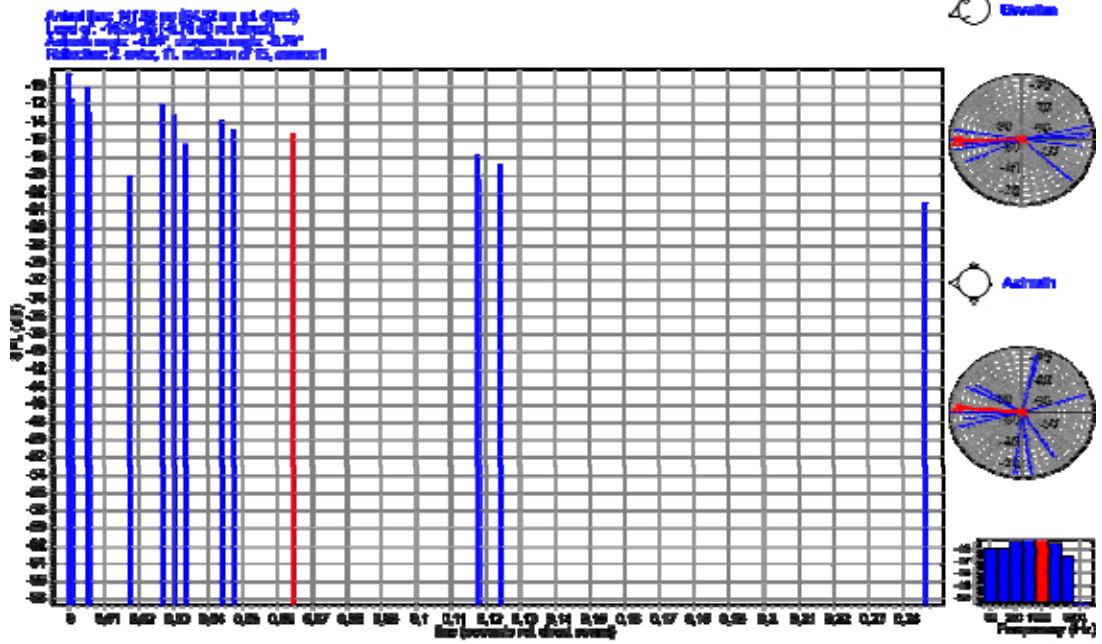
Şekil B.31 1-D Alıcısı için yansımalar grafiği



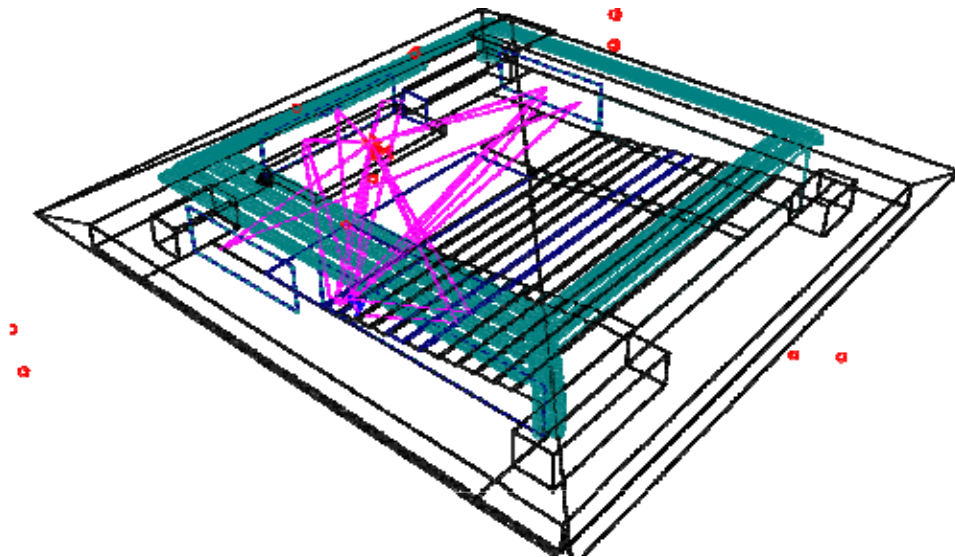
Şekil B.32 1-D Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.17 2-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 2-D		(x,y,z) = (63.00, 17.50, 1.62)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	3,57	2,84	2,69	2,98	2,51	2,19	0,62
T30	(s)	3,23	2,87	3,01	3,12	3,09	2,16	1,05
SPL	(dB)	2,7	2,7	2,9	3,1	2,9	1,6	-2,7
C80	(dB)	-1,3	-0,7	-0,7	-0,6	-0,2	1,4	6,2
D50	(%)	0,34	0,36	0,36	0,36	0,38	0,46	0,67
Ts	(s)	210	178	175	174	163	116	52
LF80		0,384	0,403	0,415	0,412	0,407	0,414	0,412
SPL(A) = 9.1 (dB)								
LG80* = 2.0 (dB)								
STI = 0.00 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



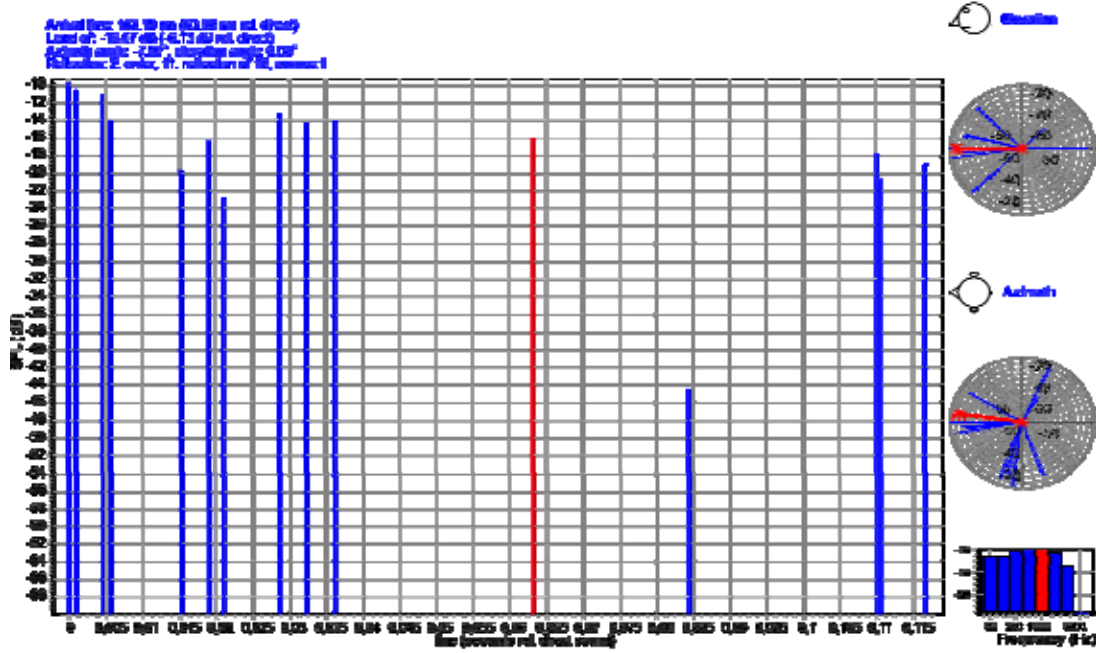
Şekil B.33 2-D Alıcısı için yansımalar grafiği



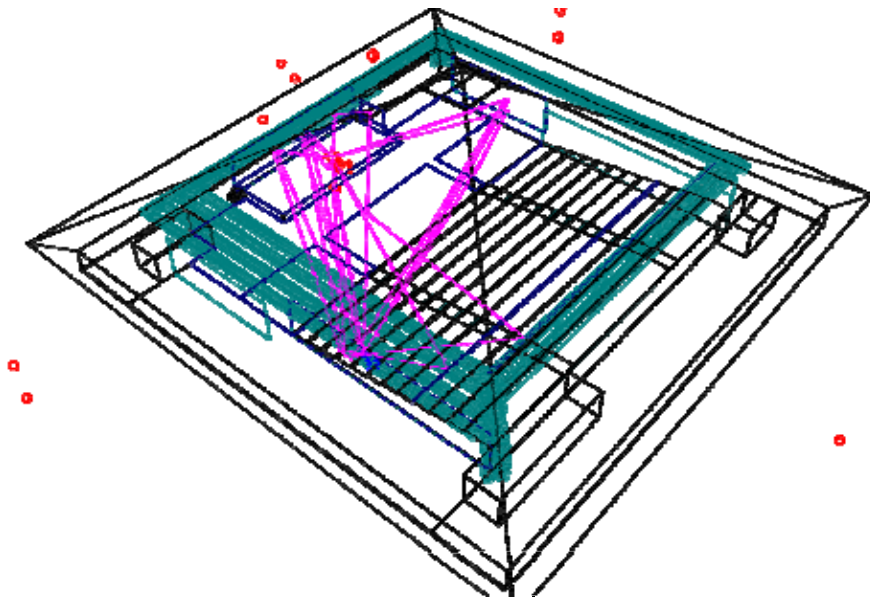
Şekil B.34 2-D Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.18 3-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 3-D		(x,y,z) = (57.00, 17.50, 2.40)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	3,43	2,90	2,93	2,88	2,56	2,10	0,93
T30	(s)	3,23	2,64	2,91	2,97	2,86	2,06	1,04
SPL	(dB)	2,4	2,3	2,5	2,8	2,7	1,4	-3,2
C80	(dB)	-2,3	-1,5	-1,3	-1,2	-0,6	1,2	5,5
D50	(%)	0,29	0,33	0,33	0,34	0,37	0,47	0,67
Ts	(s)	223	183	176	175	162	112	51
LF80		0,237	0,250	0,266	0,282	0,287	0,279	0,272
SPL(A) = 8.8 (dB)								
STI = 0.00		(T30 dayanan Teorik STI = 0.00)						



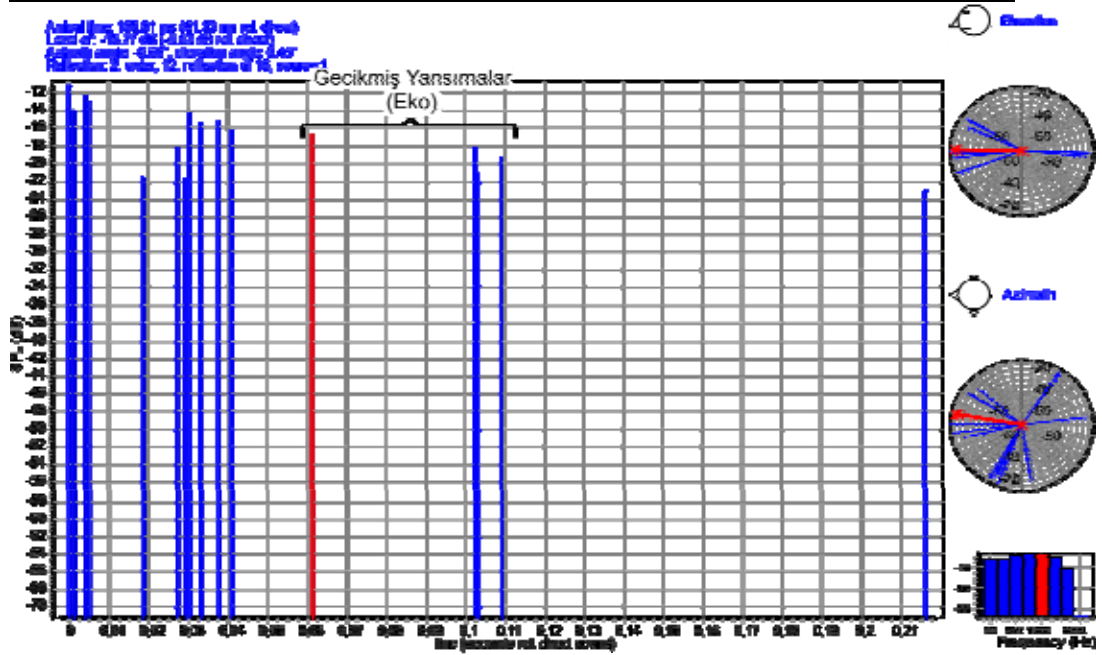
Şekil B.35 3-D Alıcısı için yansımalar grafiği



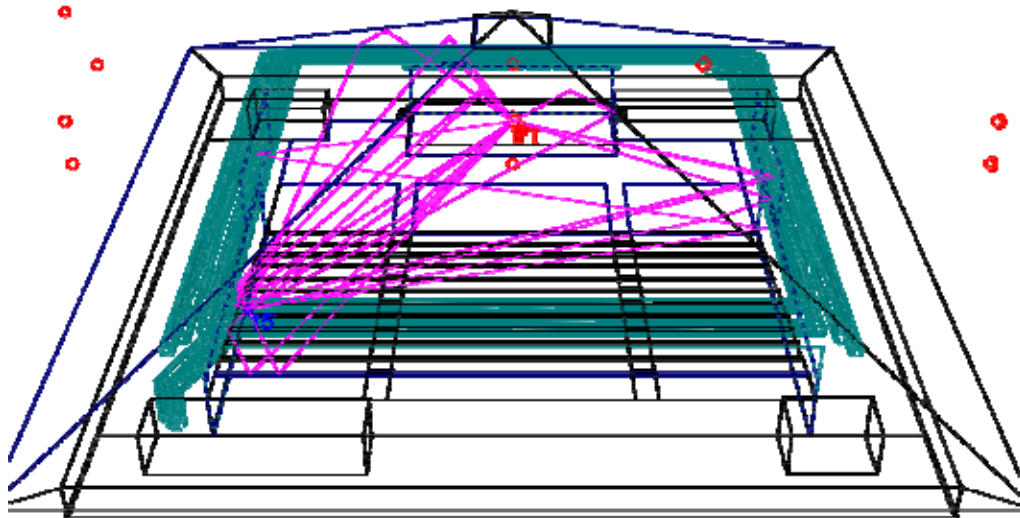
Şekil B.36 3-D Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.19 4-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 4-D		(x,y,z) = (51.00, 17.50, 3.18)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	3,05	2,43	2,74	2,73	2,72	1,87	1,17
T30	(s)	3,24	2,79	2,76	2,82	2,59	2,07	1,10
SPL	(dB)	2,8	2,8	3,0	3,2	3,0	1,4	-3,9
C80	(dB)	-2,3	-1,9	-1,7	-1,8	-1,5	0,0	3,7
D50	(%)	0,27	0,29	0,29	0,29	0,30	0,37	0,56
Ts	(s)	199	173	174	177	168	122	63
LF80		0,309	0,330	0,342	0,346	0,354	0,355	0,343
SPL(A) = 9.0 (dB)								
STI = 0.00 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



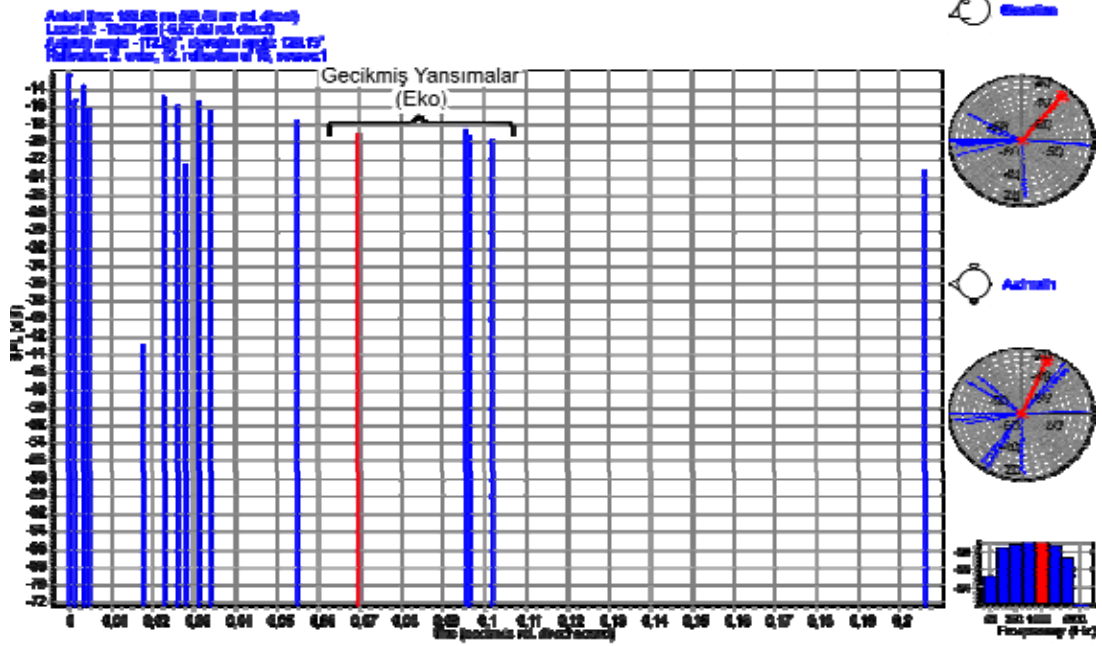
Şekil B.37 4-D Alıcısı için yansımalar grafiği



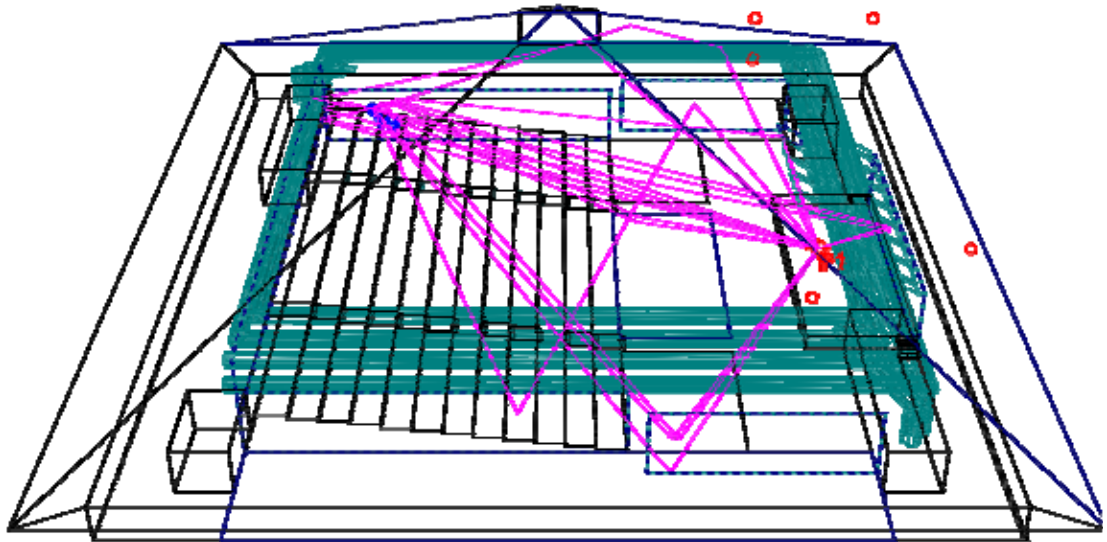
Şekil B.38 4-D Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo B.20 5-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 5-D		(x,y,z) = (45.00, 17.50, 3.96)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	2,90	2,51	3,05	2,86	2,64	2,22	0,29
T30	(s)	3,36	2,71	2,77	2,98	2,80	1,99	1,23
SPL	(dB)	1,7	1,7	1,9	2,0	1,8	0,0	-5,7
C80	(dB)	-0,7	-0,5	-0,7	-0,9	-0,7	0,8	5,0
D50	(%)	0,30	0,30	0,29	0,28	0,29	0,36	0,54
Ts	(s)	181	167	174	178	171	126	61
LF80		0,245	0,246	0,245	0,244	0,243	0,239	0,222
SPL(A) = 7.8 (dB)								
LG80* = 0.6 (dB)								
STI = 0.00		(T30 dayanan Teorik STI = 0.00)						

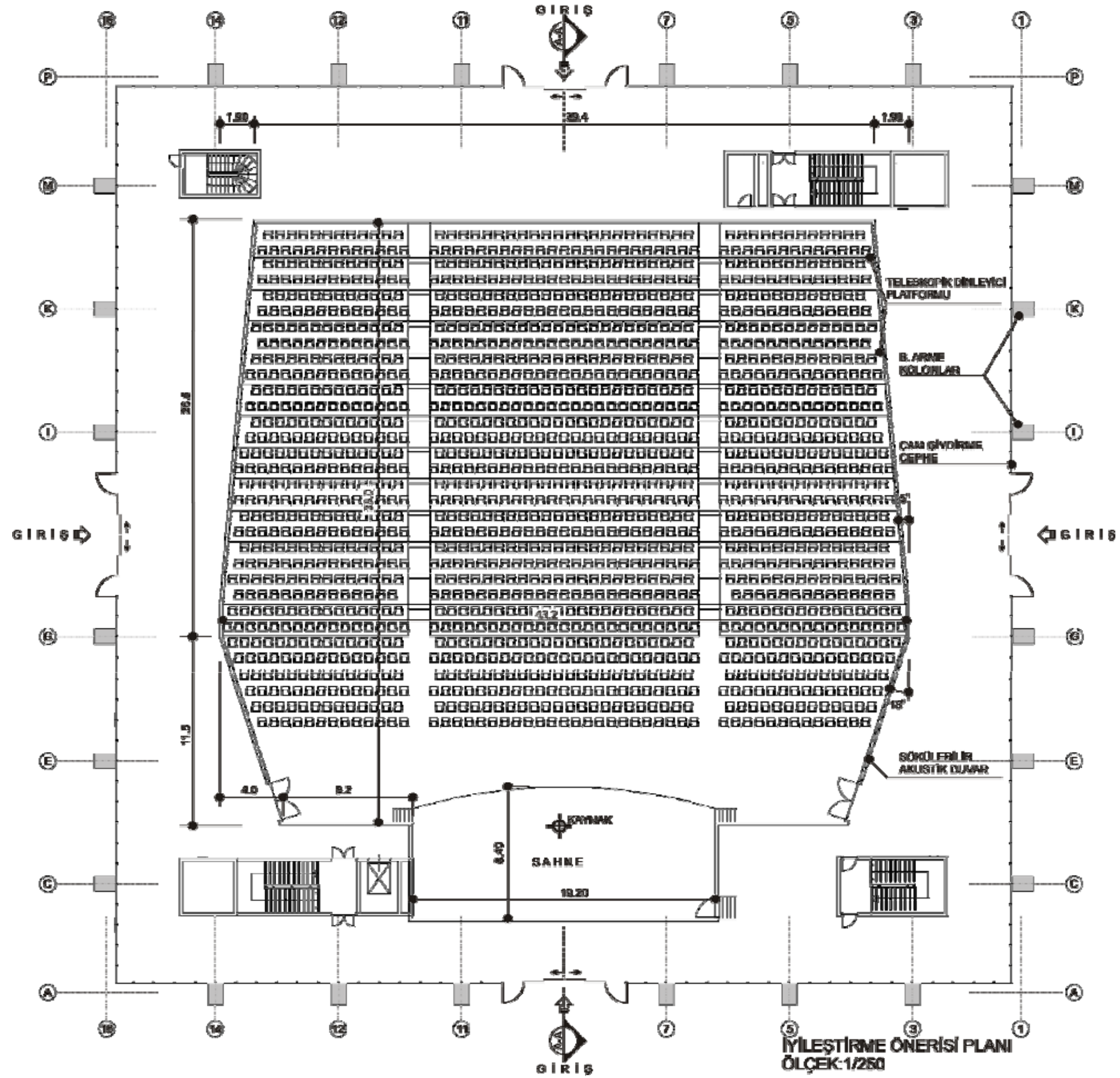


Şekil B.39 5-D Alıcısı için yansımalar grafiği

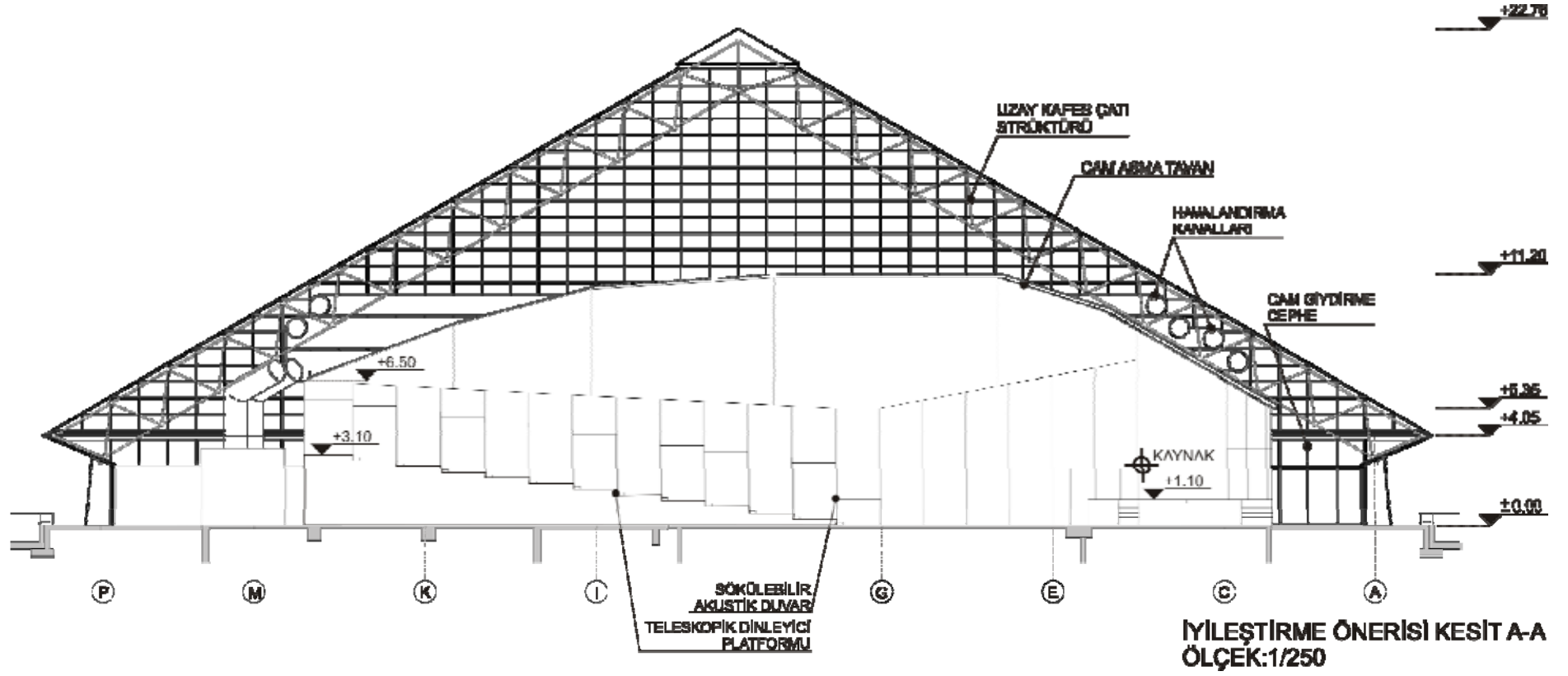


Şekil B.40 5-D Alıcısı için ışın diyagramı

**EK C: ANTALYA CAM PİRAMİTİNİN AKUSTİK KOŞULLARININ
İYİLEŞTİRİLMESİNE YÖNELİK GELİŞTİRİLEN ÖNERİNİN MİMARİ
PROJESİ**



Şekil C.1: Antalya Cam Piramidinin akustik koşullarının iyileştirilmesine yönelik geliştirilen önerinin planı

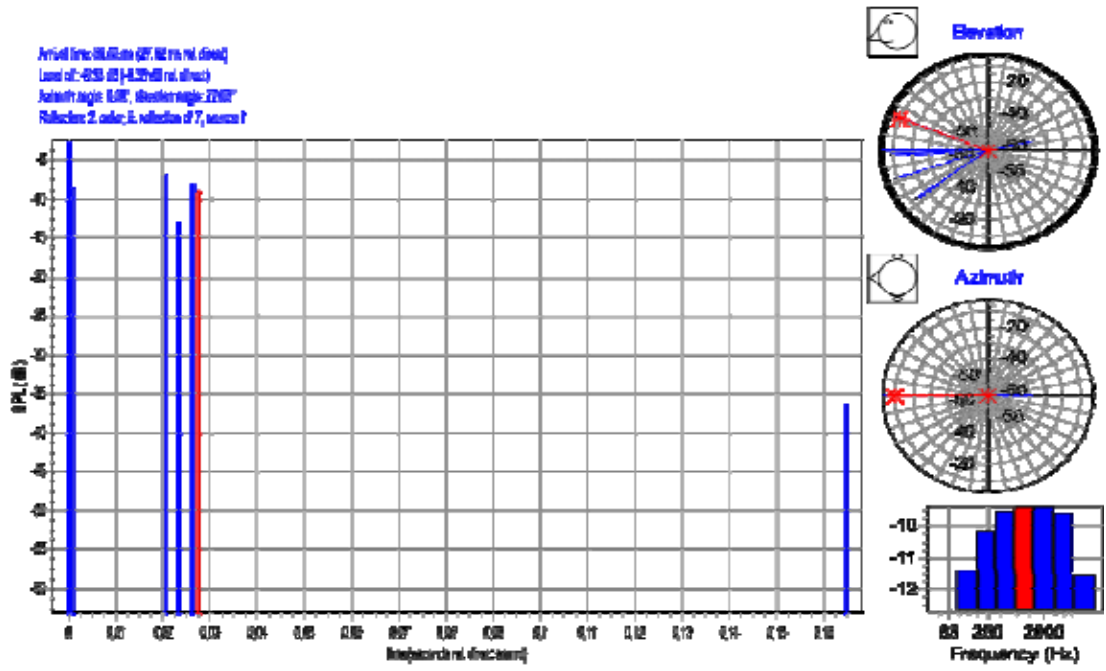


Şekil C.2: Antalya Cam Piramidinin akustik koşullarının iyileştirilmesine yönelik geliştirilen önerinin kesiti

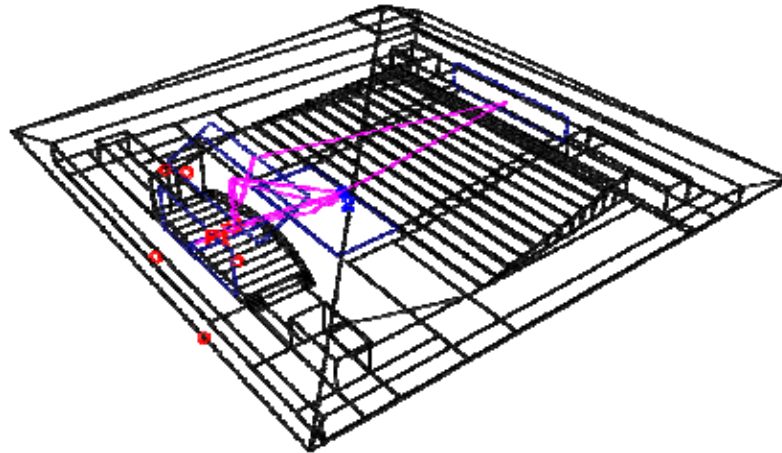
**EK D: ANTALYA CAM PİRAMİTİNİN HACİM AKUSTİĞİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİNE YÖNELİK GELİŞTİRİLEN ÖNERİ İÇİN
HESAPLANAN HACİM AKUSTİĞİ PARAMETRELERİNİN SONUÇLARI**

Tablo D.1 1-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 1-A		(x,y,z) = (-2.00, -67.00, 1.10)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	2,16	1,70	1,67	1,47	1,65	1,72	1,07
T30	(s)	1,75	1,59	1,42	1,37	1,32	1,35	0,94
SPL	(dB)	4,5	4,5	4,2	4,3	4,4	4,0	1,2
C80	(dB)	1,3	1,9	2,4	2,0	1,8	2,3	5,9
D50	(%)	0,50	0,51	0,53	0,50	0,49	0,51	0,68
Ts	(s)	113	99	88	91	96	88	49
LF80		0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,06
SPL(A) = 10,9 (dB)								
STI = 0.08 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



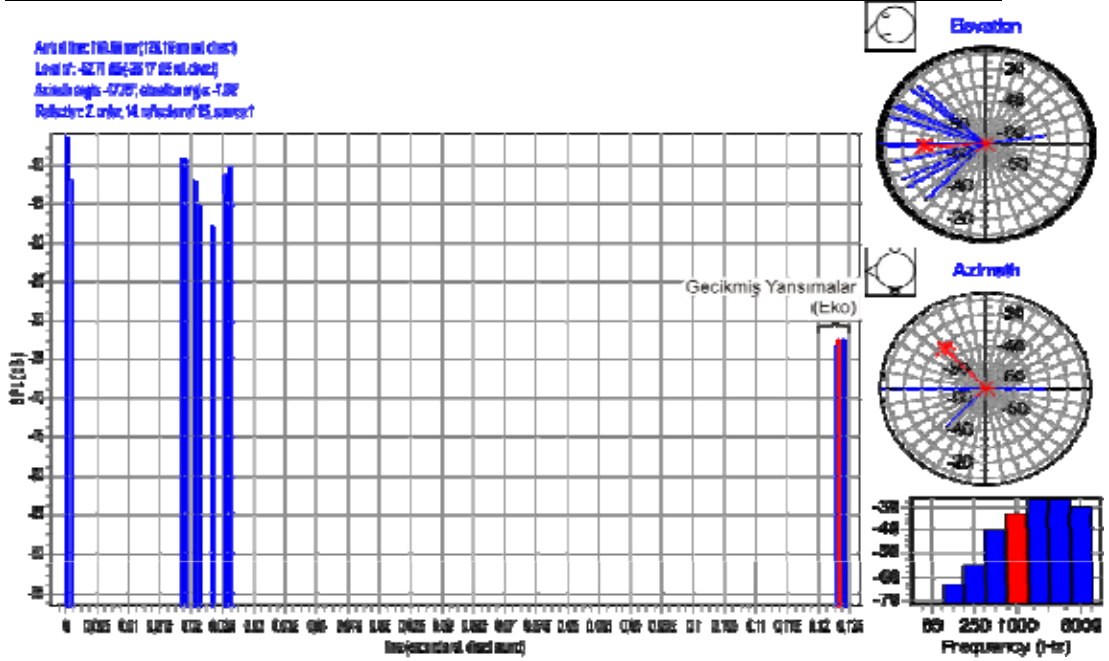
Şekil D.1 1-A Alıcısı için yansımalar grafiği



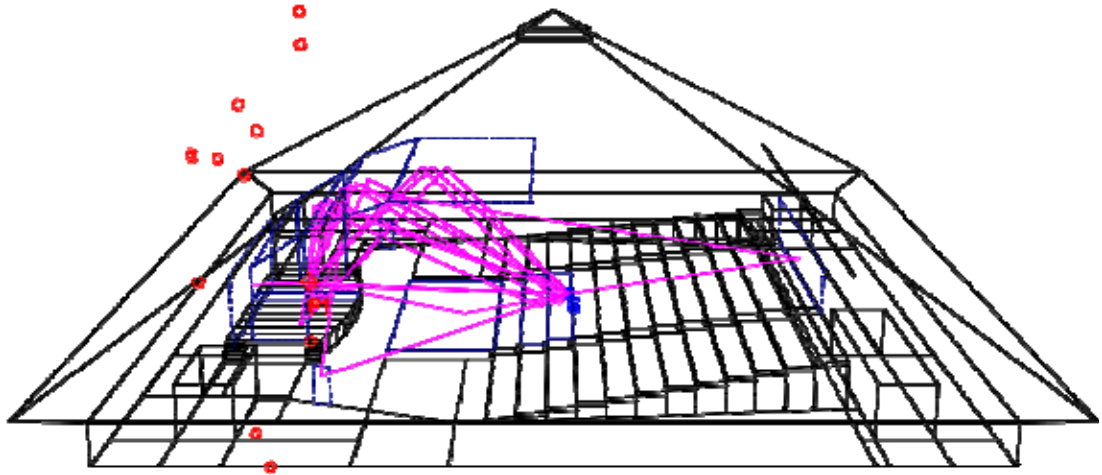
Şekil D.2 1-A Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo D.2 2-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 2-A		(x,y,z) = (-2.00, -60.00, 1.62)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	1,86	1,61	1,23	1,50	1,44	1,37	1,19
T30	(s)	1,62	1,60	1,27	1,41	1,29	1,33	0,83
SPL	(dB)	4,2	4,4	4,1	4,2	4,4	3,8	0,4
C80	(dB)	0,4	1,6	2,2	1,9	1,7	2,1	5,2
D50	(%)	0,42	0,48	0,50	0,49	0,48	0,50	0,64
Ts	(s)	119	98	88	91	94	89	56
LF80		0,11	0,11	0,10	0,09	0,09	0,10	0,09
SPL(A) = 10.7 (dB)								
STI = 0.08		(T30 dayanan Teorik STI = 0.00)						



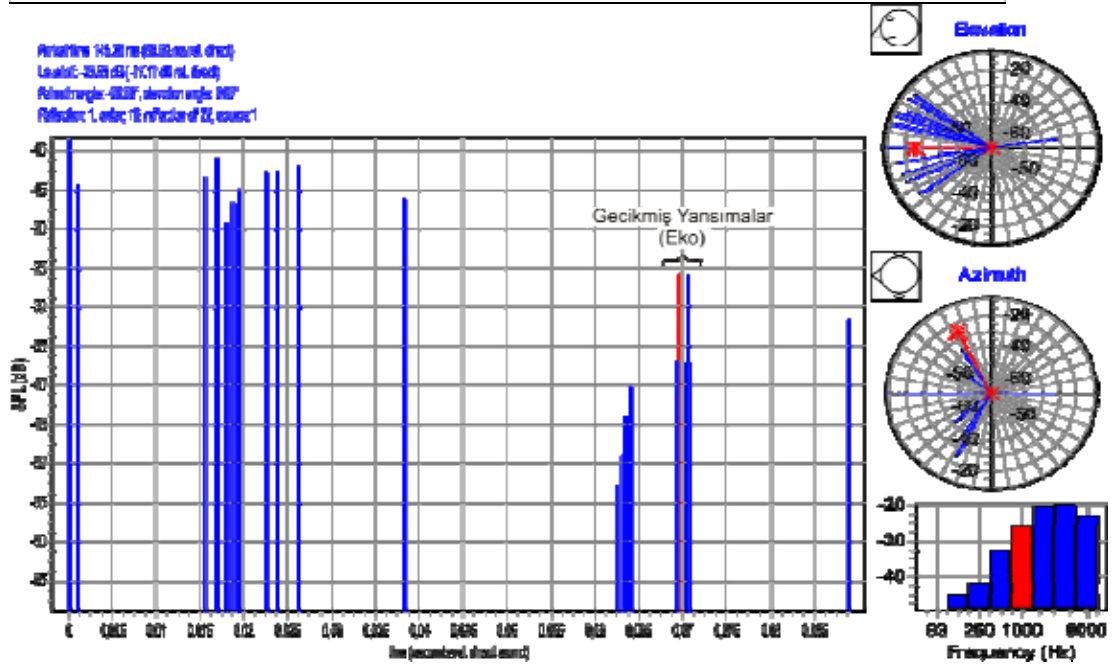
Şekil D.3 2-A Alıcısı için yansımalar grafiği



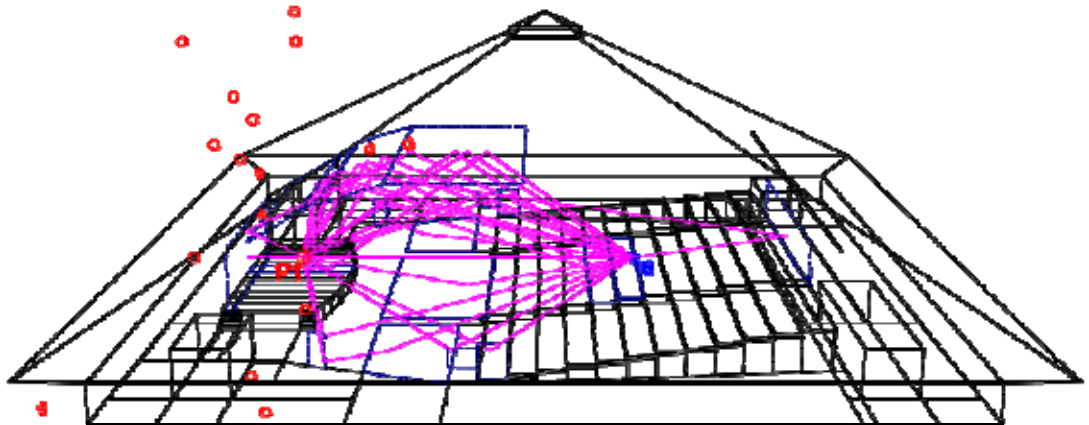
Şekil D.4 2-A Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo D.3 3-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 3-A		(x,y,z) = (-2.00, -54.00, 2.40)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	1,72	1,18	1,52	1,22	1,62	1,51	0,66
T30	(s)	1,50	1,51	1,32	1,31	1,25	1,20	0,93
SPL	(dB)	3,7	3,6	3,3	3,5	3,7	3,2	-0,6
C80	(dB)	-1,1	0,4	1,0	0,9	0,7	0,9	3,5
D50	(%)	0,32	0,39	0,42	0,42	0,39	0,40	0,51
Ts	(s)	123	103	93	94	99	94	66
LF80		0,14	0,14	0,14	0,16	0,19	0,21	0,19
SPL(A) = 10,3 (dB)								
STI = 0.07		(T30 dayanan Teorik STI = 0.00)						



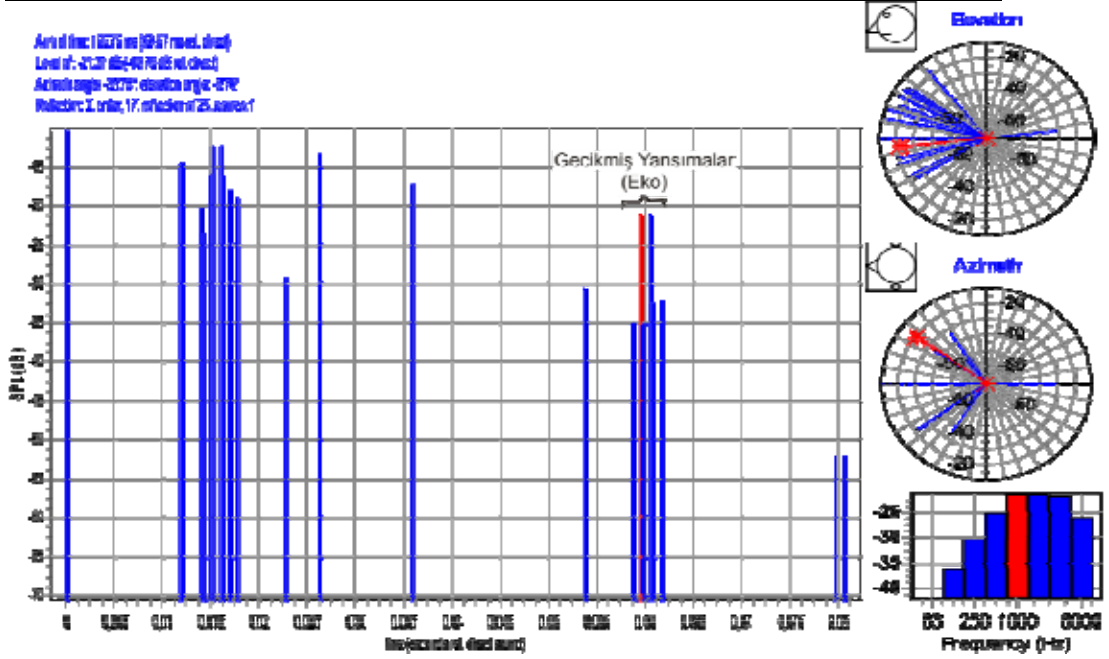
Şekil D.5 3-A Alıcısı için yansımalar grafiği



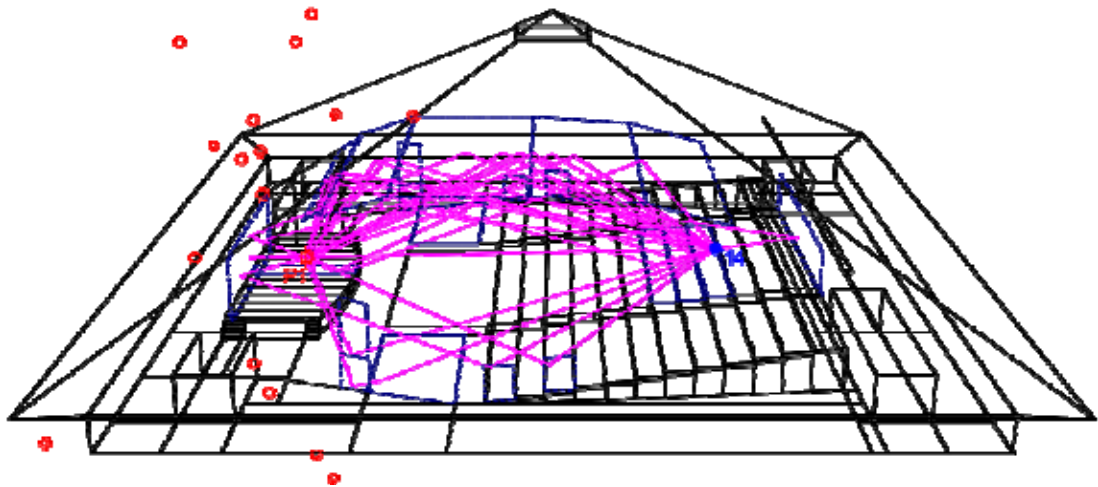
Şekil D.6 3-A Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo D.4 4-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 4-A		(x,y,z) = (-2.00, -48.00, 3.18)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	1,49	1,49	1,32	1,35	1,18	1,19	0,96
T30	(s)	1,53	1,38	1,26	1,22	1,29	1,41	0,87
SPL	(dB)	2,8	2,3	2,3	2,5	2,8	2,3	-1,6
C80	(dB)	-1,3	1,1	1,4	1,1	0,7	0,9	3,2
D50	(%)	0,27	0,41	0,43	0,41	0,38	0,38	0,46
Ts	(s)	115	89	83	87	92	89	66
LF80		0,18	0,15	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15
SPL(A) = 9.1 (dB)								
STI = 0.05 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



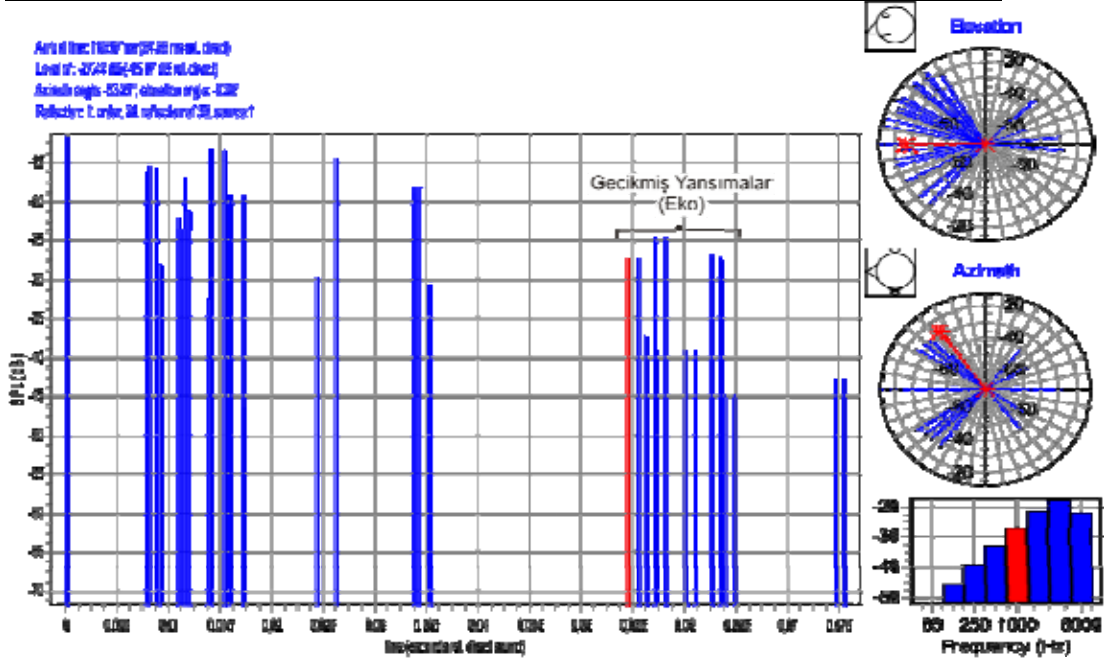
Şekil D.7 4-A Alıcısı için yansımalar grafiği



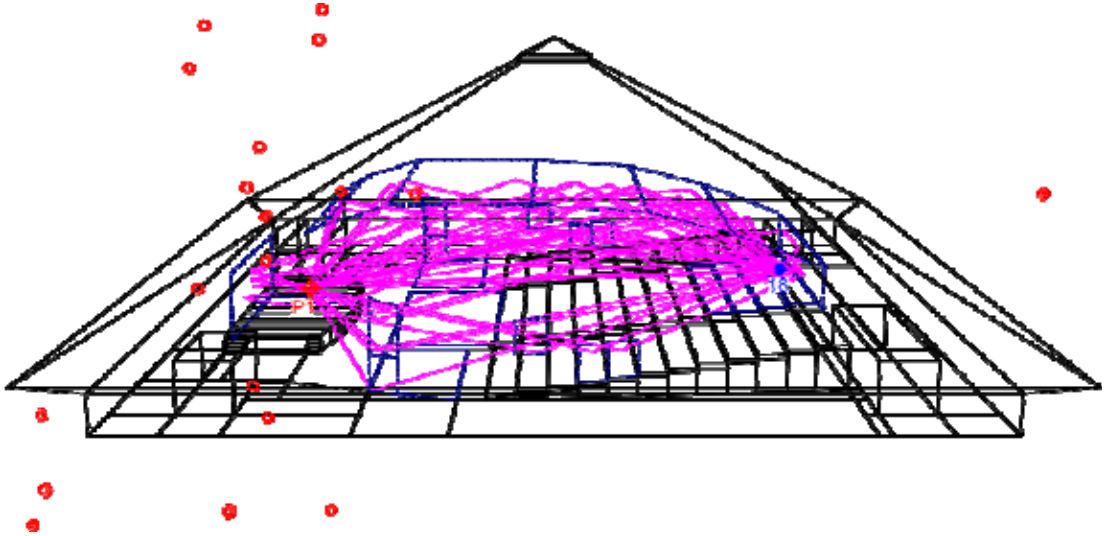
Şekil D.8 4-A Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo D.5 5-A Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 5-A		(x,y,z) = (-2.00, -43.00, 3.96)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	0,84	0,91	0,98	0,82	1,06	0,77	1,23
T30	(s)	1,39	1,37	1,33	1,21	1,33	1,14	0,81
SPL	(dB)	2,5	0,6	0,8	1,4	2,1	1,9	-1,2
C80	(dB)	2,4	3,8	4,0	3,7	3,5	3,9	6,2
D50	(%)	0,45	0,55	0,55	0,53	0,50	0,49	0,56
Ts	(s)	85	71	67	70	73	70	54
LF80		0,23	0,18	0,16	0,16	0,18	0,20	0,21
SPL(A) = 8.4 (dB)								
STI = 0.06		(T30 dayanan Teorik STI = 0.00)						



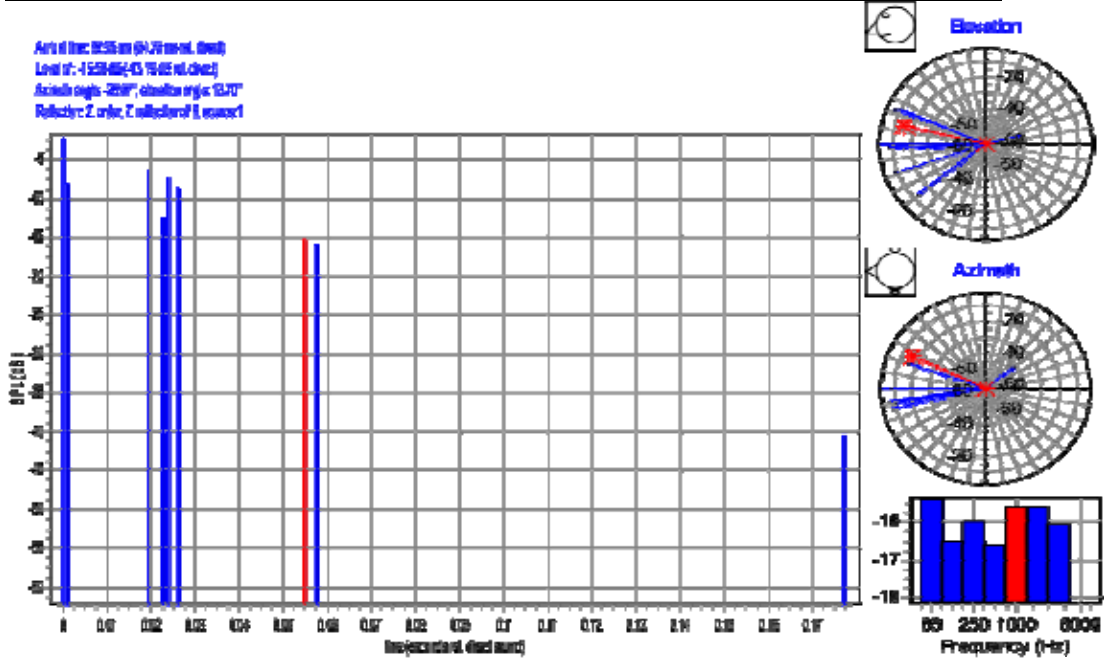
Şekil D.9 5-A Alıcısı için yansımalar grafiği



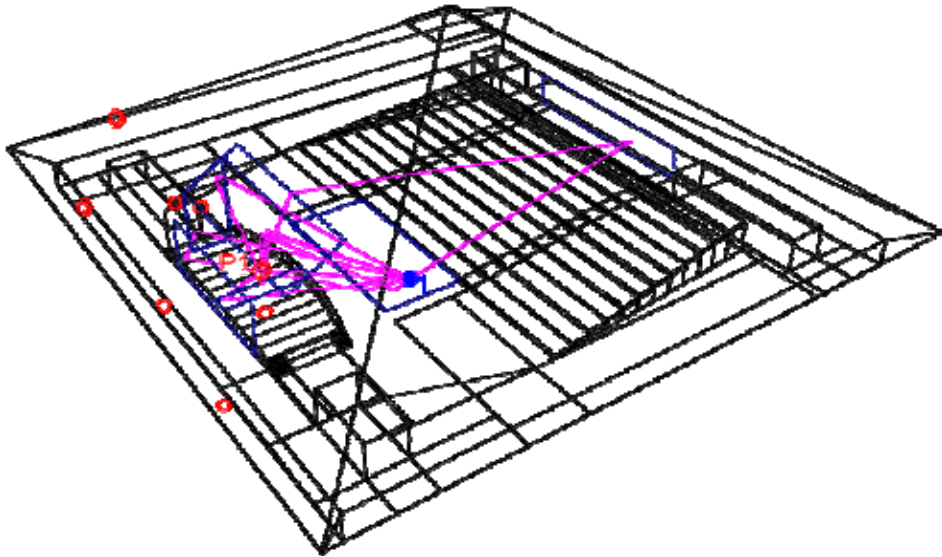
Şekil D.10 5-A Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo D.6 1-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 1-B		(x,y,z) = (5.00, -70.00, 1.10)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	2,33	1,74	1,51	1,66	1,46	1,53	1,06
T30	(s)	1,69	1,61	1,41	1,37	1,41	1,34	1,03
SPL	(dB)	4,9	4,9	4,7	4,9	5,0	4,5	2,0
C80	(dB)	2,1	2,6	3,0	2,6	2,4	2,9	6,4
D50	(%)	0,51	0,51	0,53	0,50	0,49	0,51	0,66
Ts	(s)	105	91	82	85	89	83	47
LF80		0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07
SPL(A) = 11.4 (dB)								
STI = 0.10		(T30 dayanan Teorik STI = 0.00)						



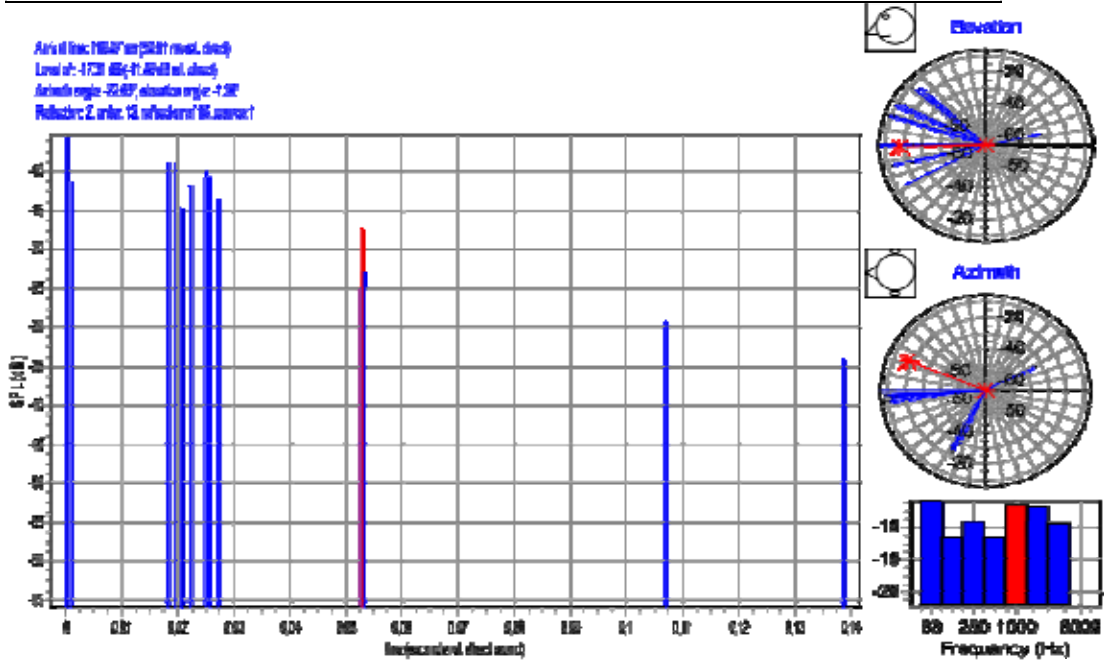
Şekil D.11 1-B Alıcısı için yansımalar grafiği



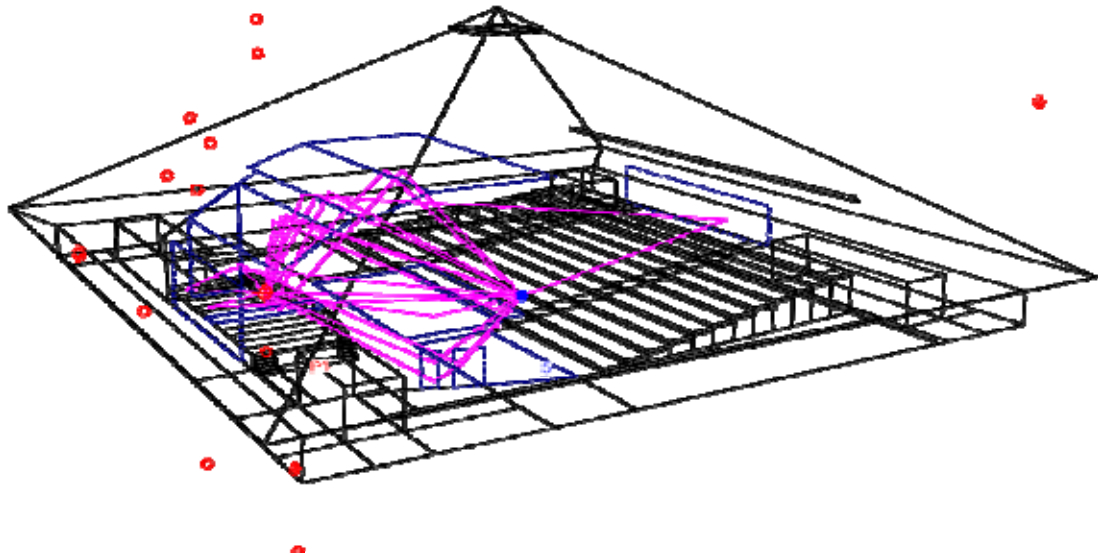
Şekil D.12 1-B Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo D.7 2-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 2-B		(x,y,z) = (5.00, -63.00, 1.36)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	1,91	1,59	1,22	1,44	1,51	1,23	1,03
T30	(s)	1,70	1,54	1,27	1,42	1,35	1,24	0,87
SPL	(dB)	4,2	4,6	4,5	4,6	4,8	4,3	1,1
C80	(dB)	0,6	1,9	2,7	2,4	2,2	2,6	5,7
D50	(%)	0,42	0,47	0,51	0,49	0,48	0,49	0,63
Ts	(s)	118	97	85	88	92	86	55
LF80		0,12	0,11	0,11	0,11	0,12	0,14	0,13
SPL(A) = 11.2 (dB)								
STI = 0.09 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



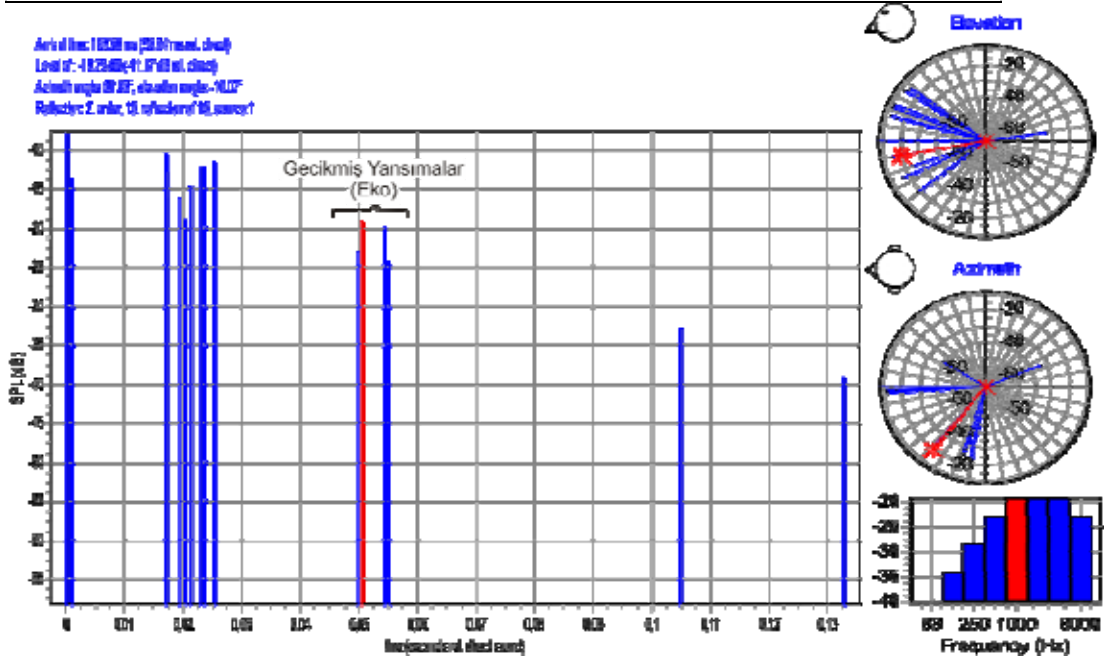
Şekil D.13 2-B Alıcısı için yansımalar grafiği



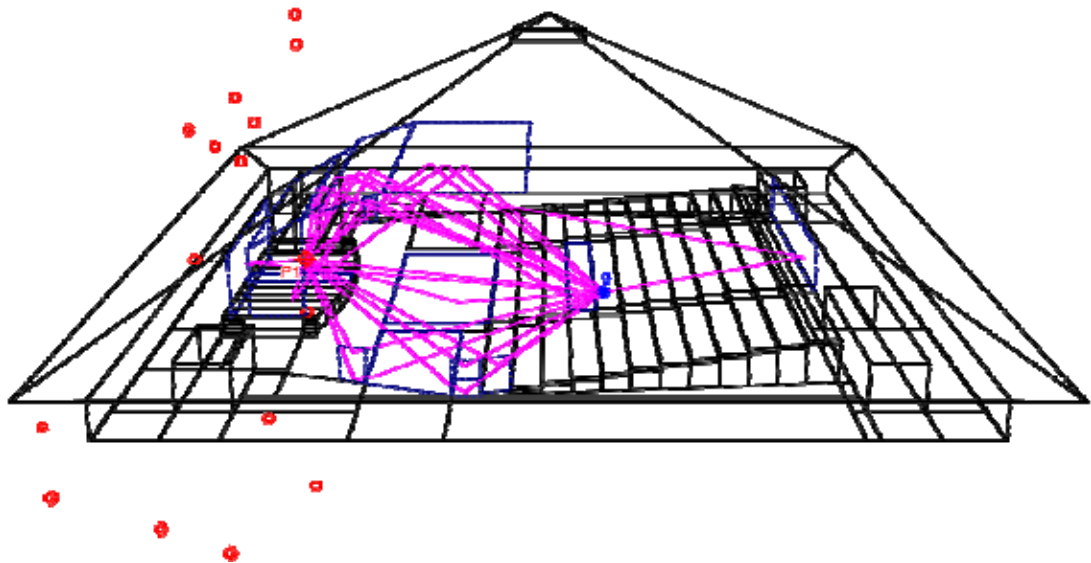
Şekil D.14 2-B Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo D.8 3-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 3-B		(x,y,z) = (5.00, -57.00, 2.14)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	1,87	1,55	1,18	1,37	1,61	1,44	0,91
T30	(s)	1,69	1,58	1,32	1,27	1,49	1,3	0,88
SPL	(dB)	3,7	3,7	3,5	3,7	4,1	3,6	-0,2
C80	(dB)	-0,7	0,4	1,1	1,0	1,1	1,5	4,1
D50	(%)	0,33	0,37	0,40	0,39	0,39	0,40	0,53
Ts	(s)	125	106	95	97	98	93	64
LF80		0,14	0,14	0,14	0,16	0,19	0,21	0,19
SPL(A) = 10.3 (dB)								
STI = 0.00		(T30 dayanan Teorik STI = 0.00)						



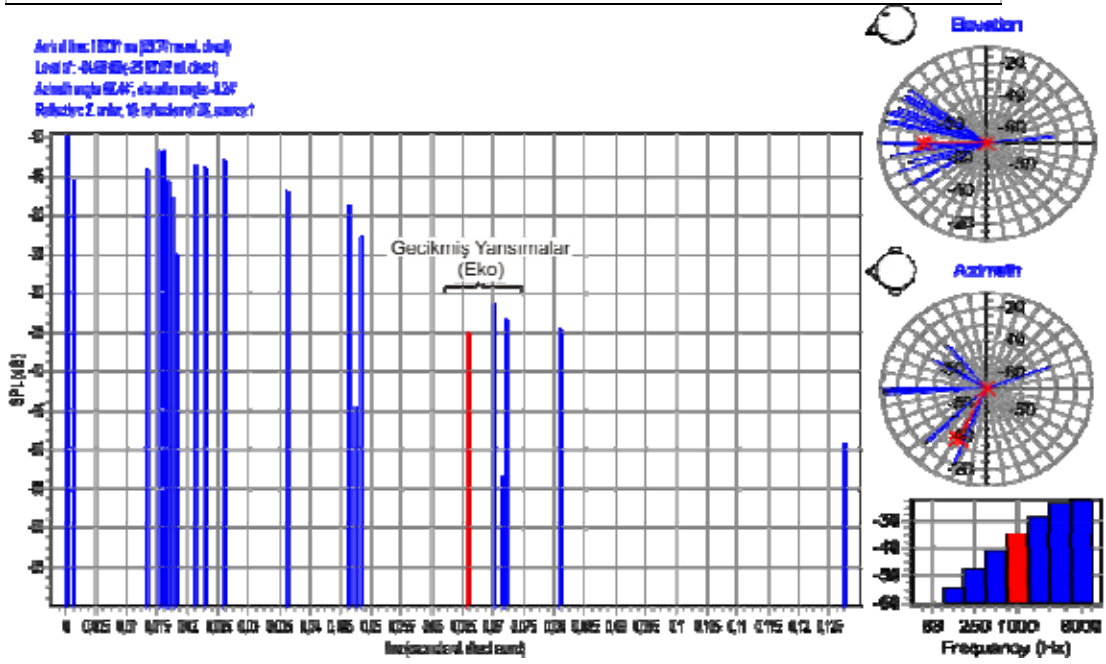
Şekil D.15 3-B Alıcısı için yansımalar grafiği



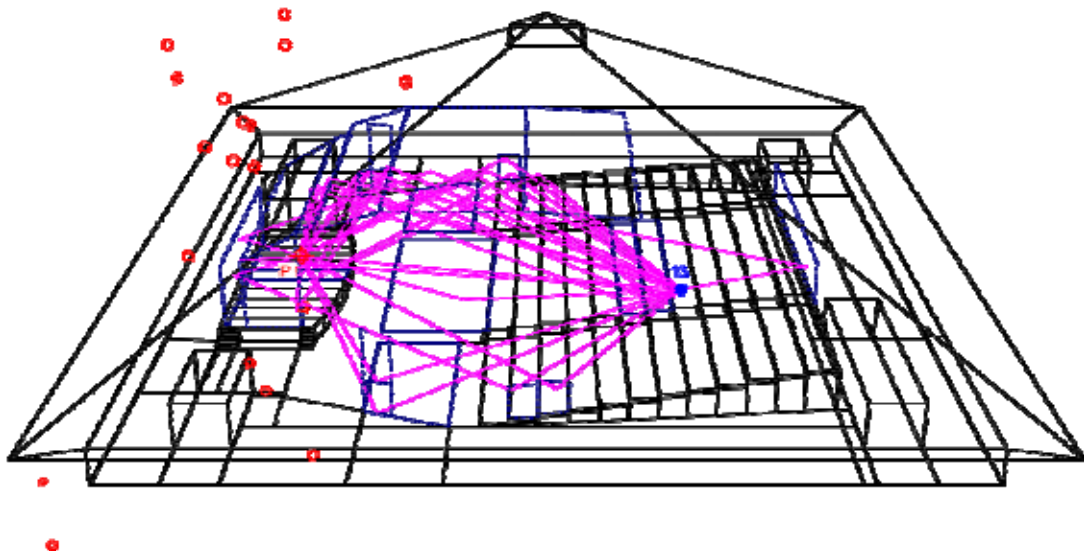
Şekil D.16 3-B Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo D.9 4-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 4-B		(x,y,z) = (5.00, -51.00, 2.92)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	1,32	1,32	0,96	1,41	1,21	1,19	0,70
T30	(s)	1,62	1,39	1,34	1,40	1,39	1,31	0,94
SPL	(dB)	3,2	2,9	2,9	3,1	3,4	2,8	-1,2
C80	(dB)	-0,9	0,8	1,5	1,3	1,0	1,1	3,2
D50	(%)	0,29	0,37	0,41	0,41	0,39	0,39	0,49
Ts	(s)	115	95	86	89	93	90	66
LF80		0,17	0,16	0,15	0,16	0,17	0,18	0,17
SPL(A) = 9.6 (dB)								
STI = 0.06		(T30 dayanan Teorik STI = 0.00)						



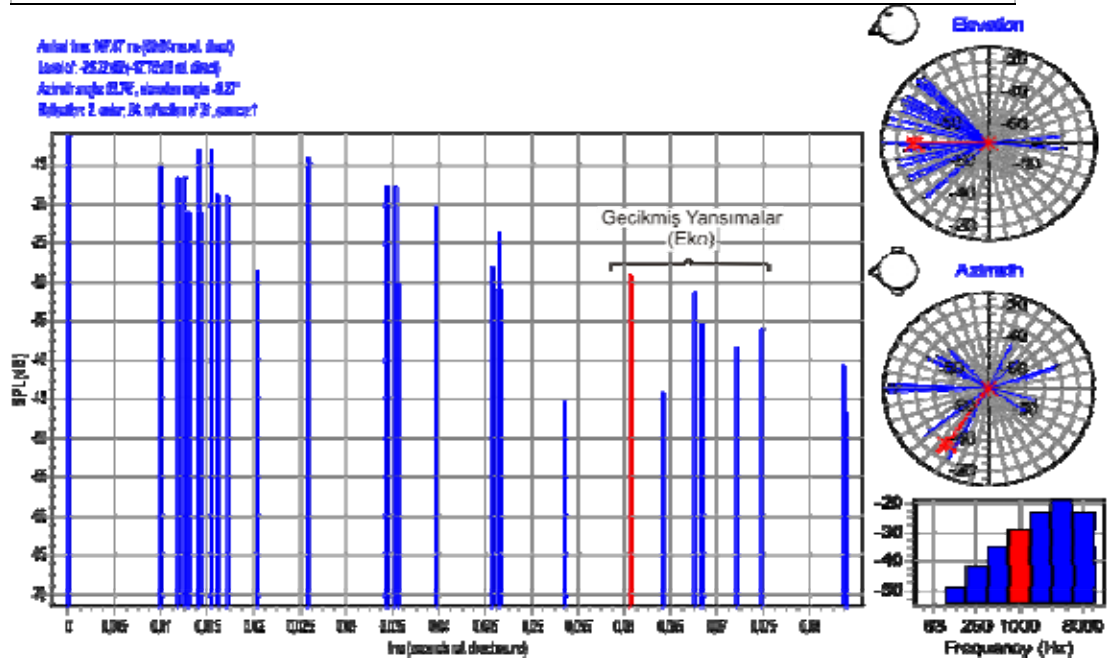
Şekil D.17 4-B Alıcısı için yansımalar grafiği



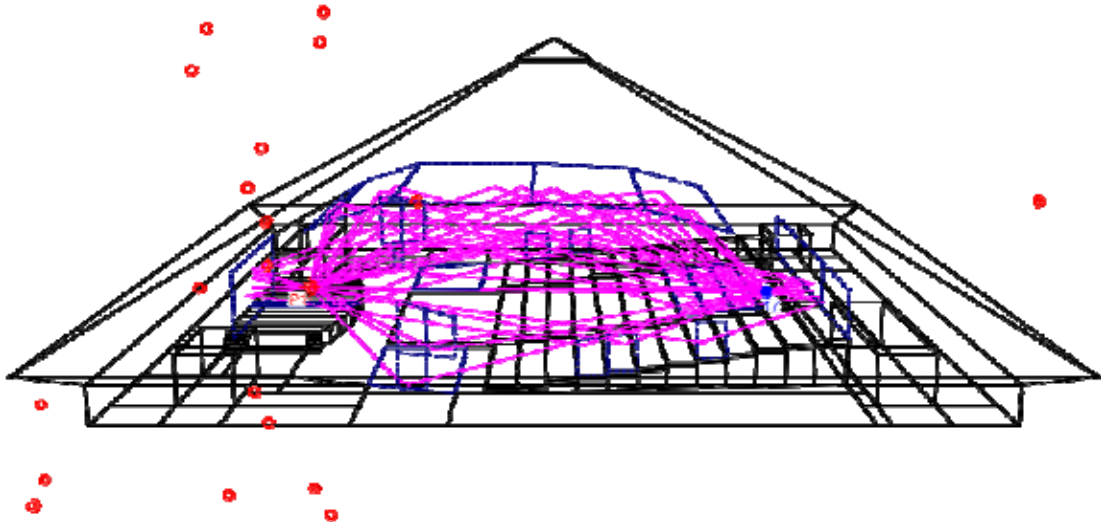
Şekil D.18 4-B Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo D.10 5-B Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 5-B		(x,y,z) = (5.00, -45.00, 3.70)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	1,21	1,42	0,86	0,99	1,25	1,03	1,21
T30	(s)	1,58	1,40	1,16	1,26	1,37	1,38	0,64
SPL	(dB)	2,8	1,5	1,8	12,2	2,7	2,4	-1,3
C80	(dB)	0,9	2,8	3,1	2,5	2,3	2,6	4,5
D50	(%)	0,35	0,47	0,49	0,46	0,43	0,42	0,49
Ts	(s)	97	77	73	78	82	79	62
LF80		0,22	0,18	0,17	0,18	0,21	0,22	0,22
SPL(A) = 8.9 (dB)								
STI = 0.06 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



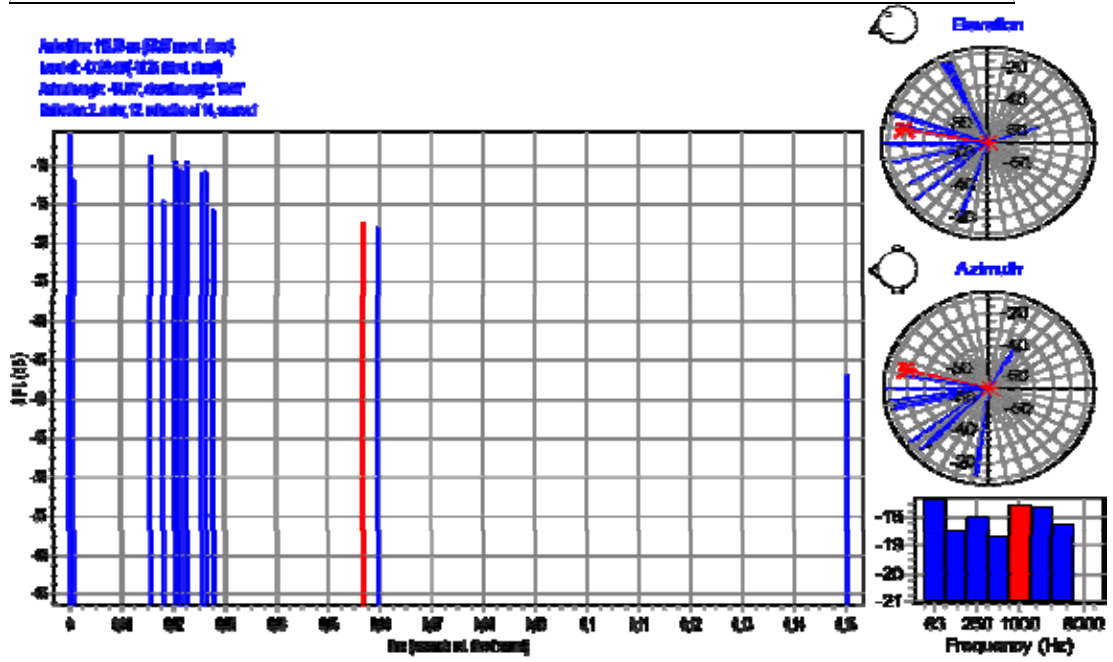
Şekil D.19 5-B Alıcısı için yansımalar grafiği



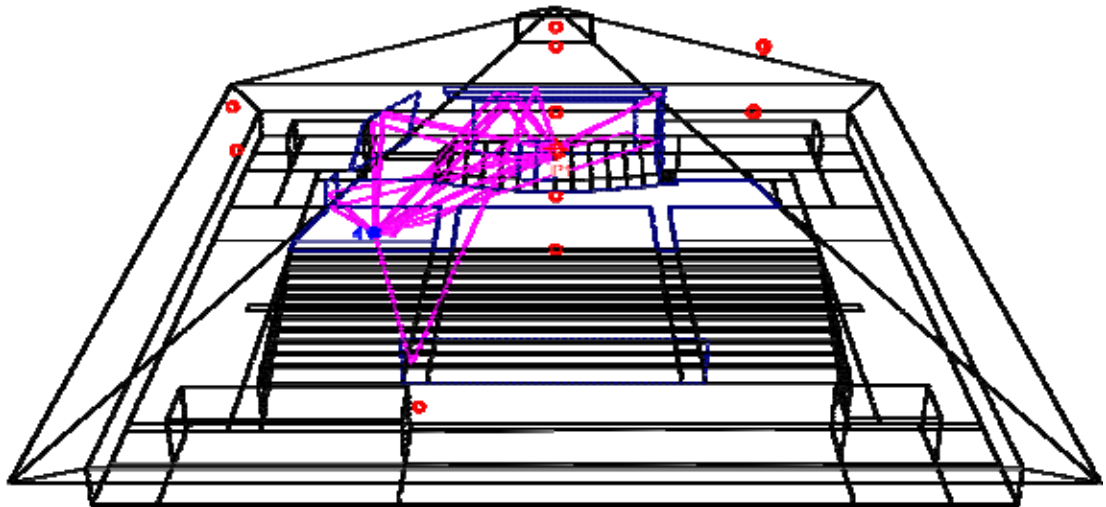
Şekil D.20 5-B Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo D.11 1-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 1-C		(x,y,z) = (13.00, -67.00, 1.10)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	1,69	1,33	1,29	1,09	1,43	1,37	1,05
T30	(s)	1,71	1,55	1,38	1,48	1,49	1,23	0,84
SPL	(dB)	3,8	4,0	3,9	4,4	4,5	4,0	0,8
C80	(dB)	1,5	2,6	3,1	2,6	2,5	2,8	5,5
D50	(%)	0,43	0,47	0,50	0,48	0,48	0,49	0,61
Ts	(s)	103	85	78	82	84	80	54
LF80		0,15	0,14	0,16	0,20	0,22	0,22	0,21
SPL(A) = 10.8 (dB)								
STI = 0.09 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



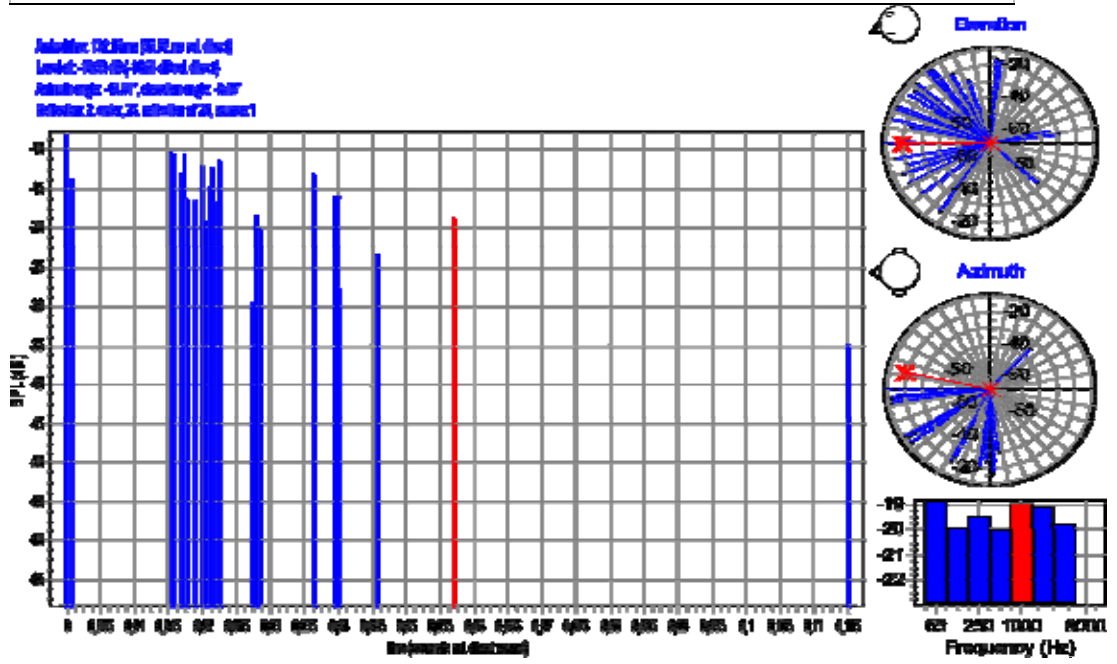
Şekil D.21 1-C Alıcısı için yansımalar grafiği



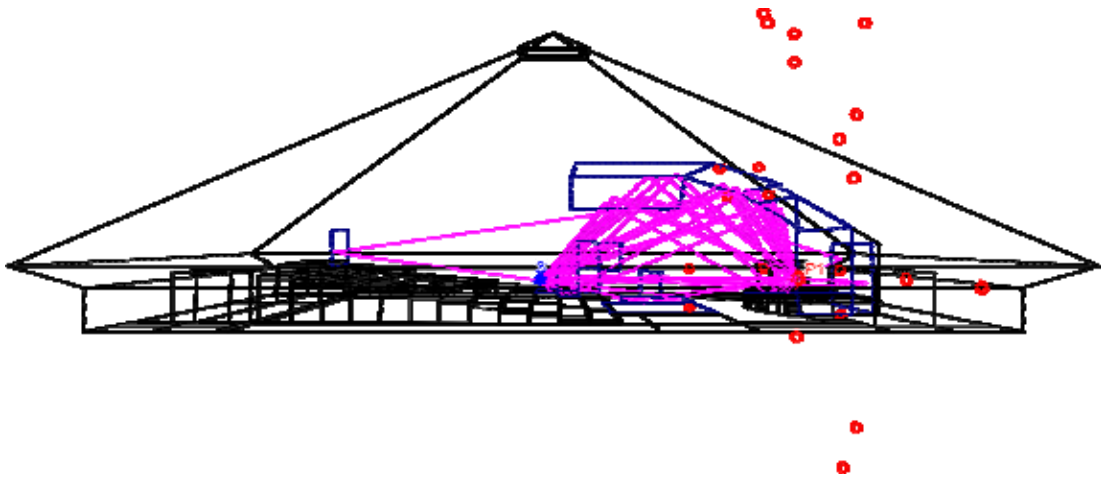
Şekil D.22 1-C Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo D.12 2-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 2-C		(x,y,z) = (13.00, -60.00, 1.88)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	1,47	1,48	1,14	1,38	1,05	1,04	0,82
T30	(s)	1,57	1,56	1,31	1,33	1,39	1,13	0,93
SPL	(dB)	3,9	4,2	4,2	4,6	4,9	4,3	1,0
C80	(dB)	1,6	2,9	3,5	3,4	3,3	3,7	6,3
D50	(%)	0,44	0,50	0,53	0,54	0,54	0,55	0,67
Ts	(s)	99	81	74	76	78	74	52
LF80		0,18	0,17	0,19	0,24	0,28	0,29	0,32
SPL(A) = 11.2 (dB)								
STI = 0.10		(T30 dayanan Teorik STI = 0.00)						



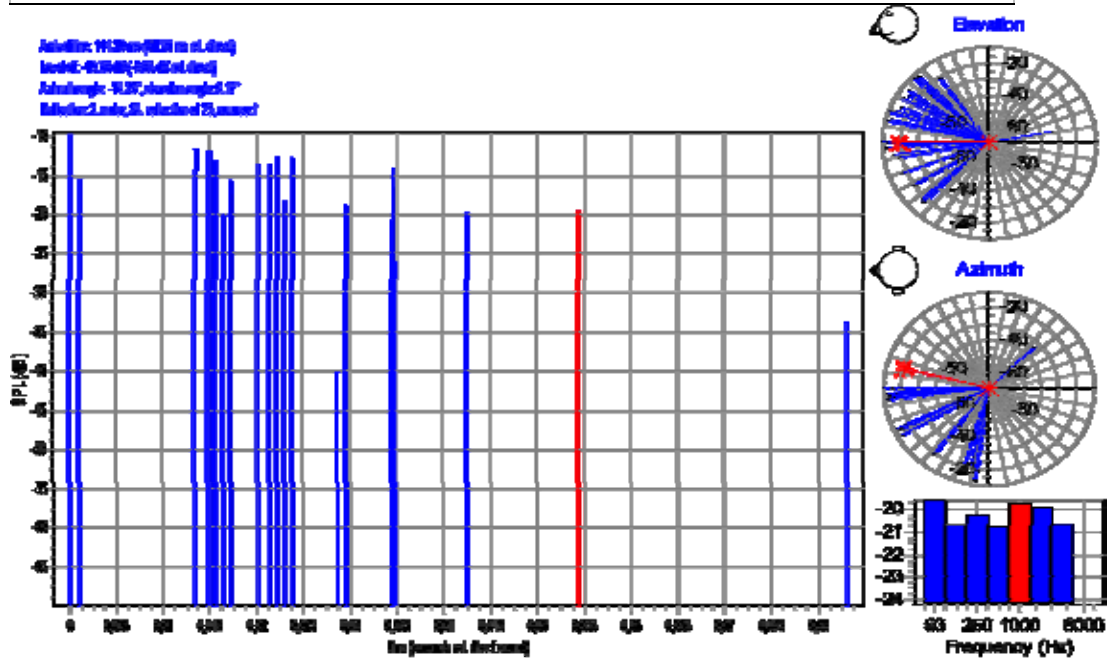
Şekil D.23 2-C Alıcısı için yansımalar grafiği



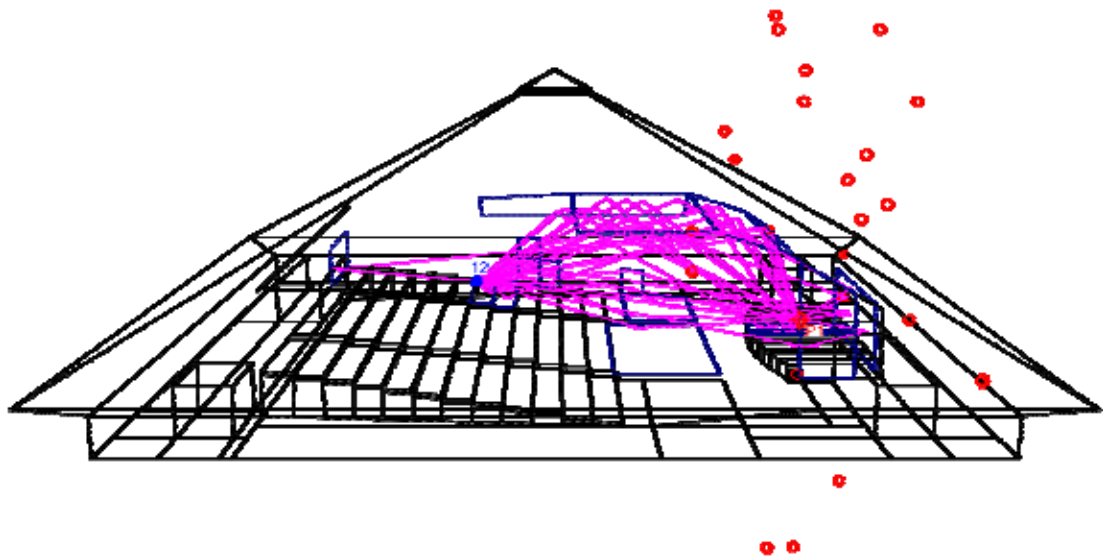
Şekil D.24 2-C Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo D.13 3-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 3-C		(x,y,z) = (13.00, -54.00, 2.66)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	1,48	0,93	1,10	0,94	1,34	1,36	1,01
T30	(s)	1,47	1,35	1,27	1,30	1,44	1,37	0,81
SPL	(dB)	3,1	3,3	3,4	3,8	4,0	3,4	-0,5
C80	(dB)	0,9	2,7	3,5	3,3	3,1	3,2	5,4
D50	(%)	0,39	0,47	0,53	0,54	0,53	0,53	0,64
Ts	(s)	103	83	74	75	78	75	55
LF80		0,20	0,19	0,20	0,23	0,26	0,26	0,26
SPL(A) = 10.2 (dB)								
STI = 0.08		(T30 dayanan Teorik STI = 0.00)						



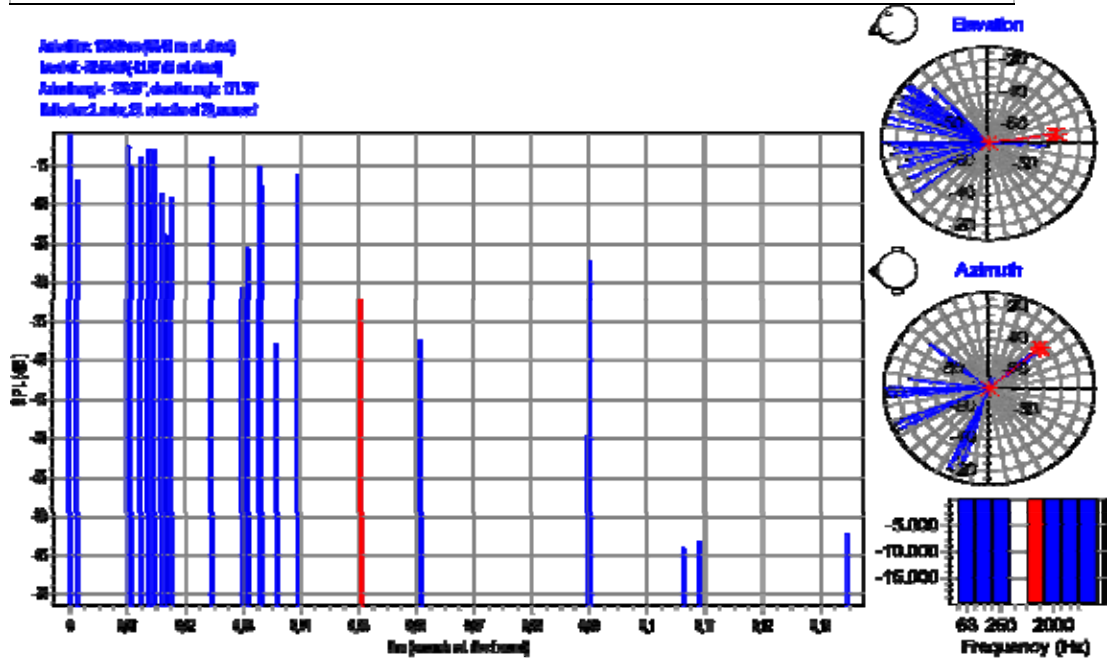
Şekil D.25 3-C Alıcısı için yansımalar grafiği



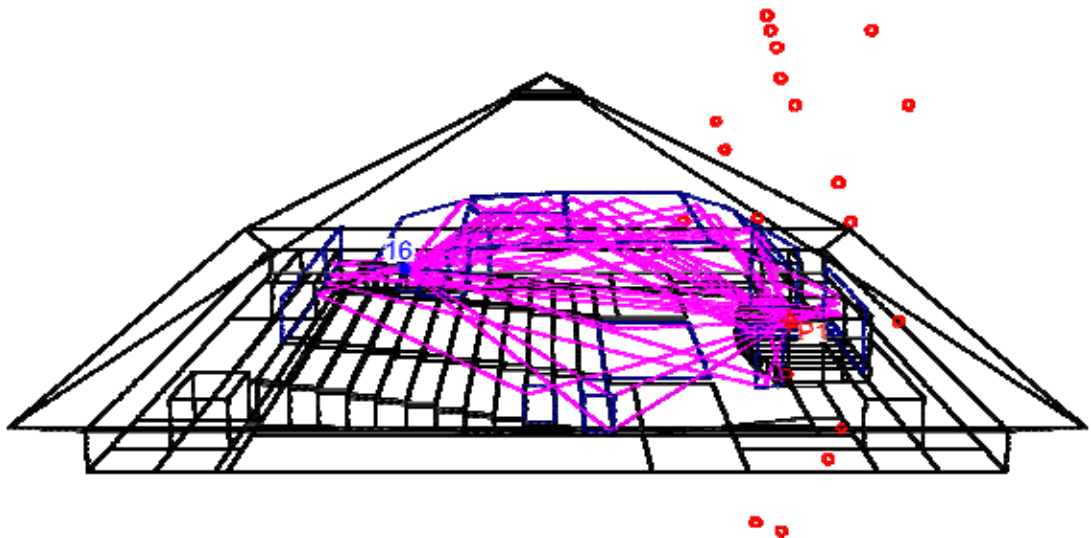
Şekil D.26 3-C Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo D.14 4-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 4-C		(x,y,z) = (13.00, -48.00, 3.44)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	0,92	0,87	1,07	1,19	1,46	0,59	0,91
T30	(s)	1,42	1,45	1,31	1,27	1,36	1,33	0,73
SPL	(dB)	2,7	2,2	2,4	2,6	3,1	2,6	-1,2
C80	(dB)	1,4	3,7	4,1	3,5	3,3	3,6	5,5
D50	(%)	0,37	0,52	0,55	0,53	0,51	0,51	0,58
Ts	(s)	95	72	68	72	75	72	55
LF80		0,23	0,20	0,19	0,21	0,24	0,25	0,26
SPL(A) = 9.3 (dB)								
STI = 0.06 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



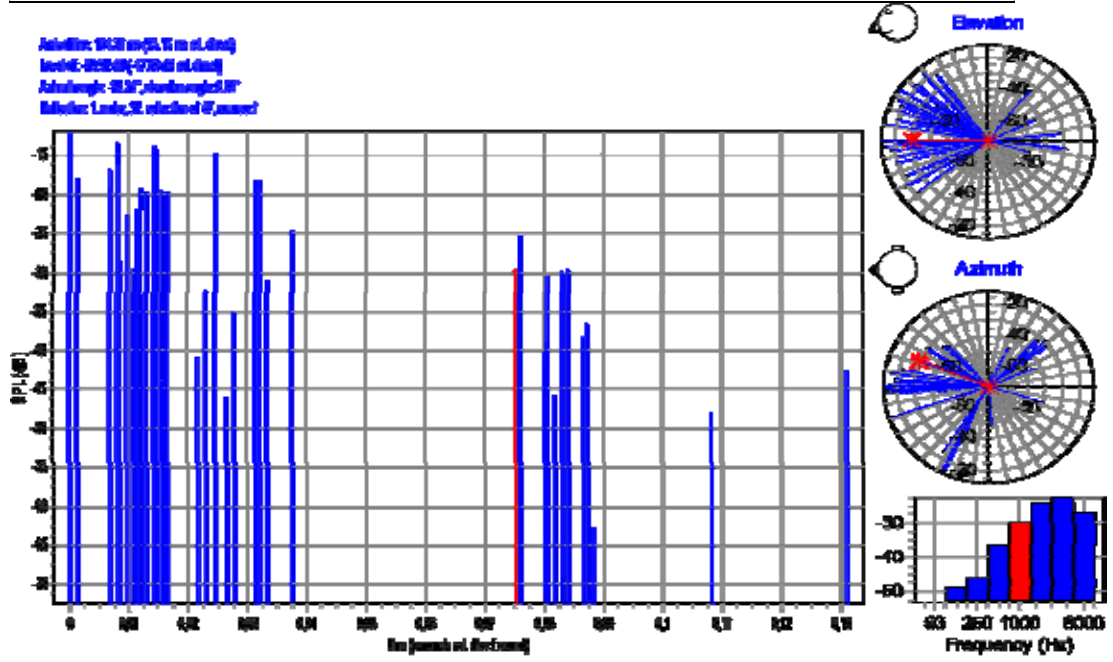
Şekil D.27 4-C Alıcısı için yansımalar grafiği



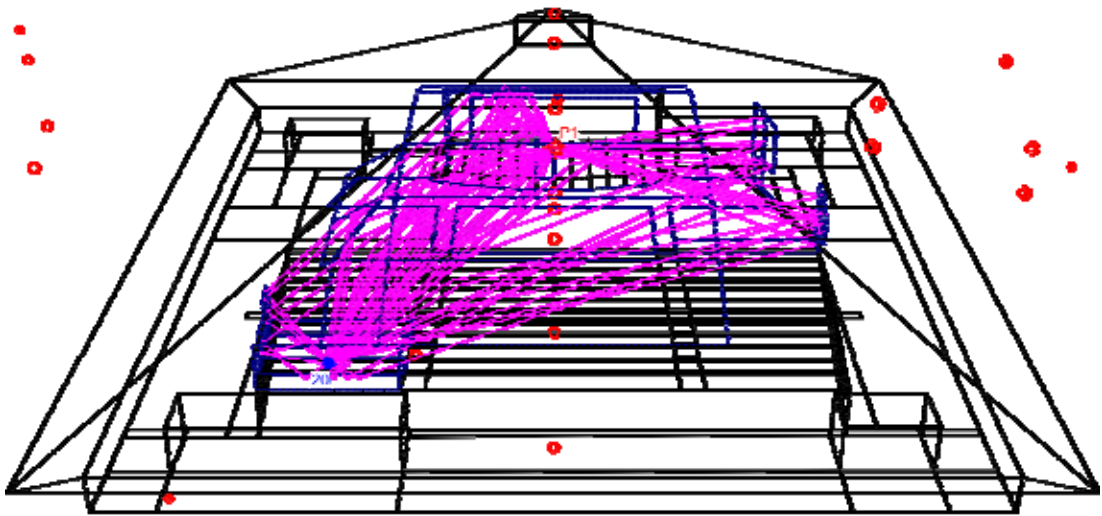
Şekil D.28 4-C Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo D.15 5-C Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 5-C		(x,y,z) = (13.00, -43.00, 4.22)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	0,67	1,00	0,75	1,18	1,16	1,21	1,14
T30	(s)	1,44	1,35	1,24	1,29	1,36	1,29	0,72
SPL	(dB)	2,3	0,2	0,3	1,3	2,3	2,1	-0,8
C80	(dB)	3,5	5,1	5,1	4,9	4,8	5,1	7,2
D50	(%)	0,53	0,61	0,62	0,62	0,60	0,61	0,69
Ts	(s)	77	63	61	61	63	60	48
LF80		0,26	0,20	0,17	0,18	0,20	0,22	0,26
SPL(A) = 8.4 (dB)								
STI = 0.07		(T30 dayanan Teorik STI = 0.00)						

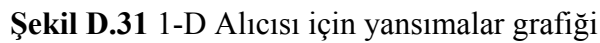


Şekil D.29 5-C Alıcısı için yansımalar grafiği



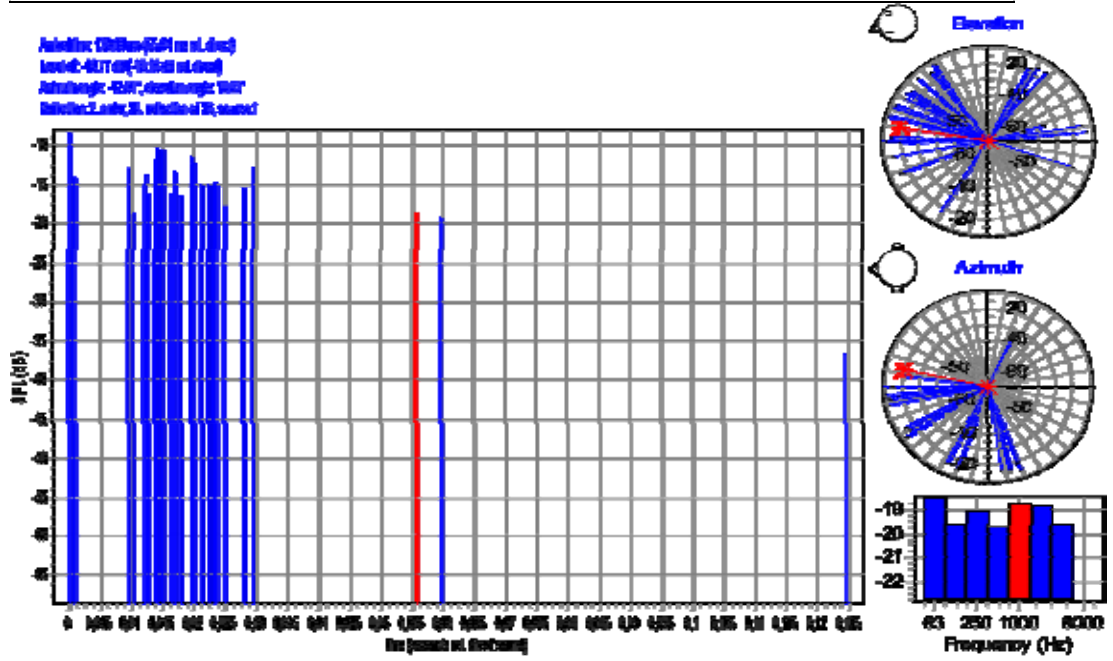
Şekil D.30 5-C Alıcısı için ışın diyagramı

ALICI # 1-D		(x,y,z) = (70.00, 17.50, 1.10)						
Octav Bant	(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	1,72	1,35	1,16	1,50	1,48	1,46	0,78
T30	(s)	1,58	1,53	1,38	1,37	1,37	1,23	0,82
SPL	(dB)	2,9	2,7	3,4	4,0	4,0	3,4	0,6
C80	(dB)	1,4	2,4	3,4	2,8	2,5	2,8	5,5
D50	(%)	0,45	0,49	0,55	0,52	0,50	0,52	0,65
Ts	(s)	100	83	72	77	80	76	49
LF80		0,19	0,19	0,30	0,31	0,31	0,30	0,32
SPL(A) = 10.9 (dB)								
STI = 0.08 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								

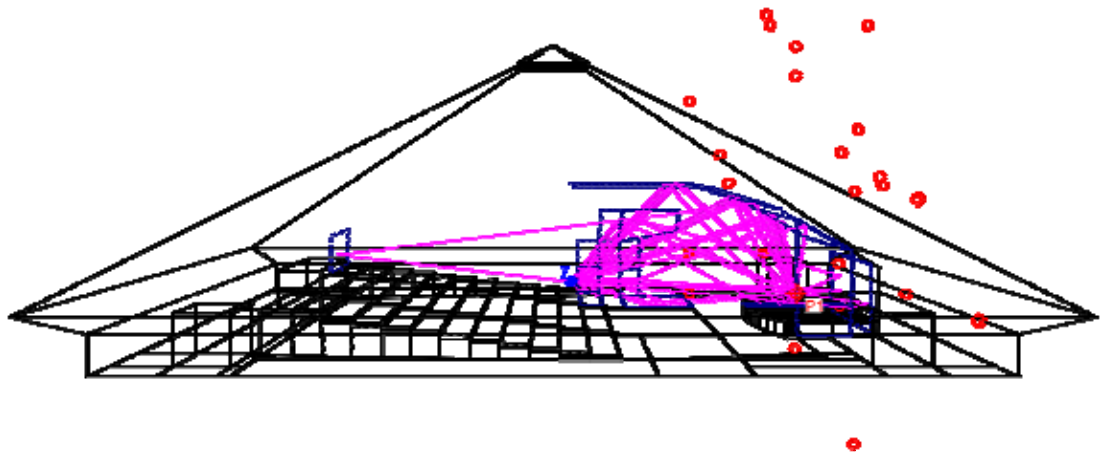


Tablo D.17 2-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 2-D		(x,y,z) = (17.50, -63.00, 1.62)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	1,35	1,16	0,85	0,77	1,06	0,92	0,82
T30	(s)	1,64	1,41	1,18	1,34	1,32	1,32	0,93
SPL	(dB)	3,4	3,9	4,6	5,3	5,5	4,9	1,7
C80	(dB)	2,2	3,7	4,8	4,5	4,4	4,7	7,2
D50	(%)	0,49	0,56	0,64	0,62	0,63	0,64	0,74
Ts	(s)	92	72	62	64	65	62	44
LF80		0,23	0,20	0,28	0,32	0,33	0,33	0,34
SPL(A) = 11.7 (dB)								
LG80* = 2.0 (dB)								
STI = 0.12 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



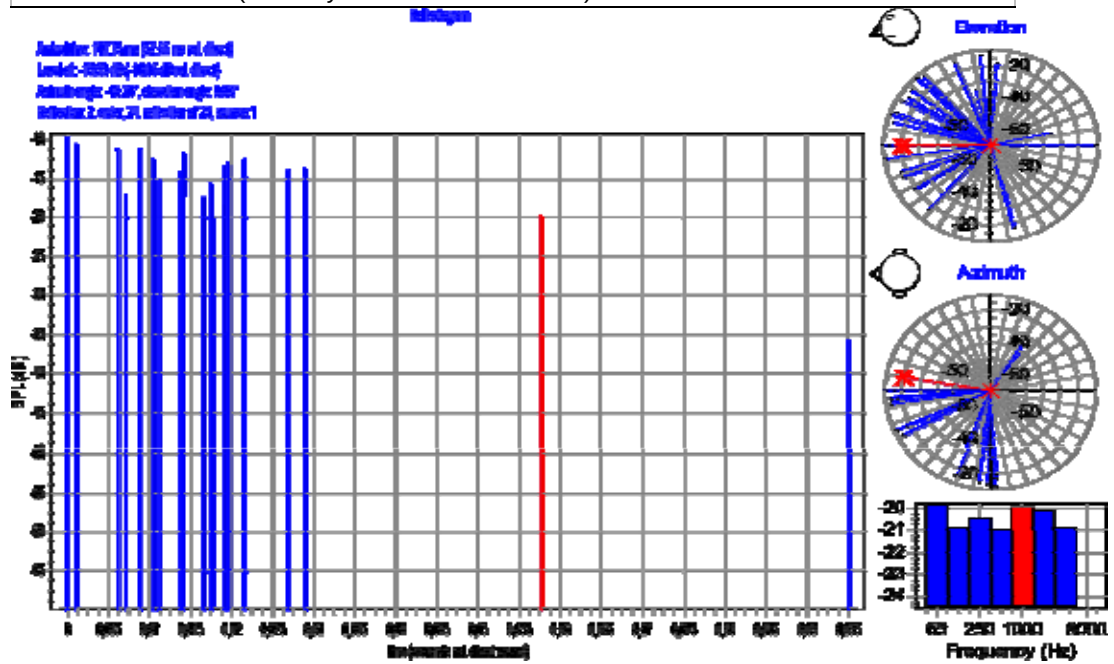
Şekil D.33 2-D Alıcısı için yansımalar grafiği



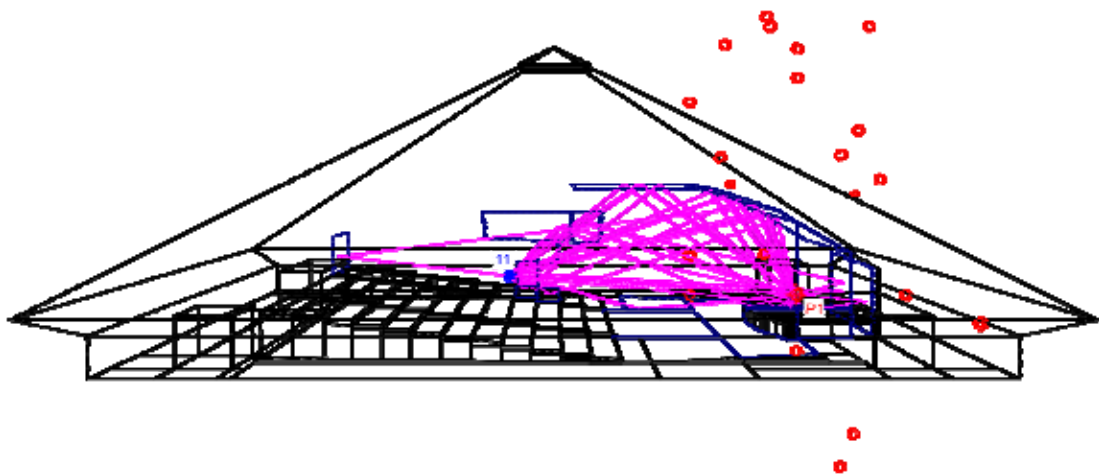
Şekil D.34 2-D Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo D.18 3-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 3-D		(x,y,z) = (17.50, -57.00, 2.40)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	1,52	1,23	1,03	1,28	0,99	1,02	0,74
T30	(s)	1,66	1,31	1,17	1,30	1,30	1,19	0,82
SPL	(dB)	3,1	3,7	4,1	4,3	4,4	3,8	0,1
C80	(dB)	2,7	4,3	5,2	4,6	4,3	4,5	6,9
D50	(%)	0,52	0,59	0,64	0,61	0,60	0,61	0,71
Ts	(s)	85	67	60	65	67	64	45
LF80		0,23	0,26	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30
SPL(A) = 10.7 (dB)								
STI = 0.09 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



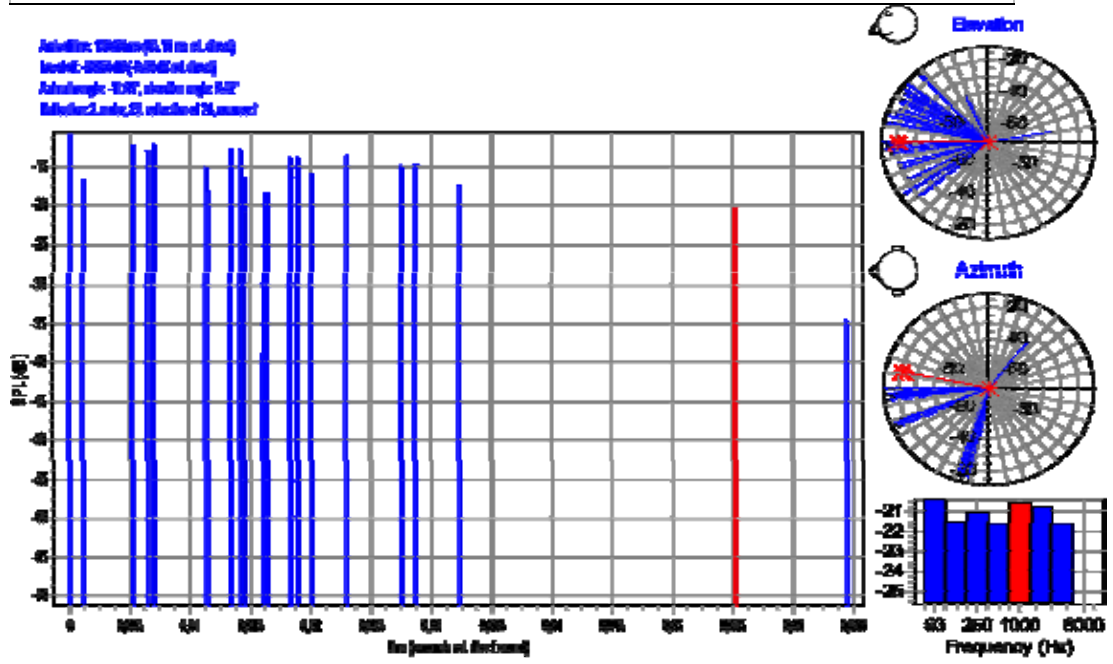
Şekil D.35 3-D Alıcısı için yansımalar grafiği



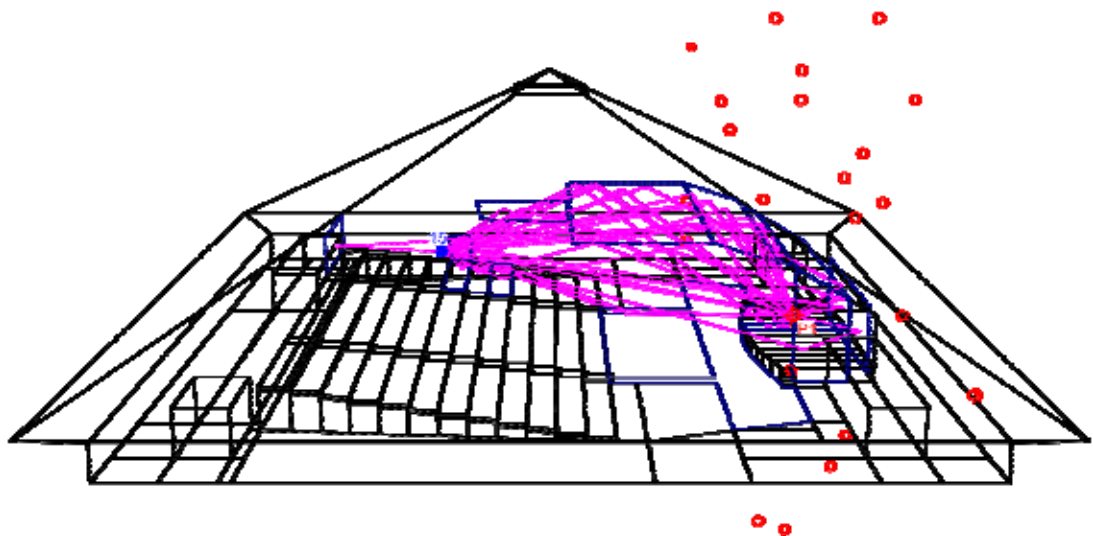
Şekil D.36 3-D Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo D.19 4-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 4-D		(x,y,z) = (17.50, -51.00, 3.18)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	1,20	1,37	0,61	0,94	1,31	1,38	0,43
T30	(s)	1,58	1,42	1,28	1,22	1,38	1,25	0,80
SPL	(dB)	2,2	2,6	2,9	3,2	3,3	2,6	-1,3
C80	(dB)	2,2	4,6	5,2	4,6	4,3	4,5	6,5
D50	(%)	0,47	0,59	0,63	0,60	0,59	0,59	0,67
Ts	(s)	89	66	61	65	68	66	48
LF80		0,24	0,27	0,31	0,30	0,30	0,30	0,31
SPL(A) = 9.5 (dB)								
STI = 0.07 (T30 dayanan Teorik STI = 0.00)								



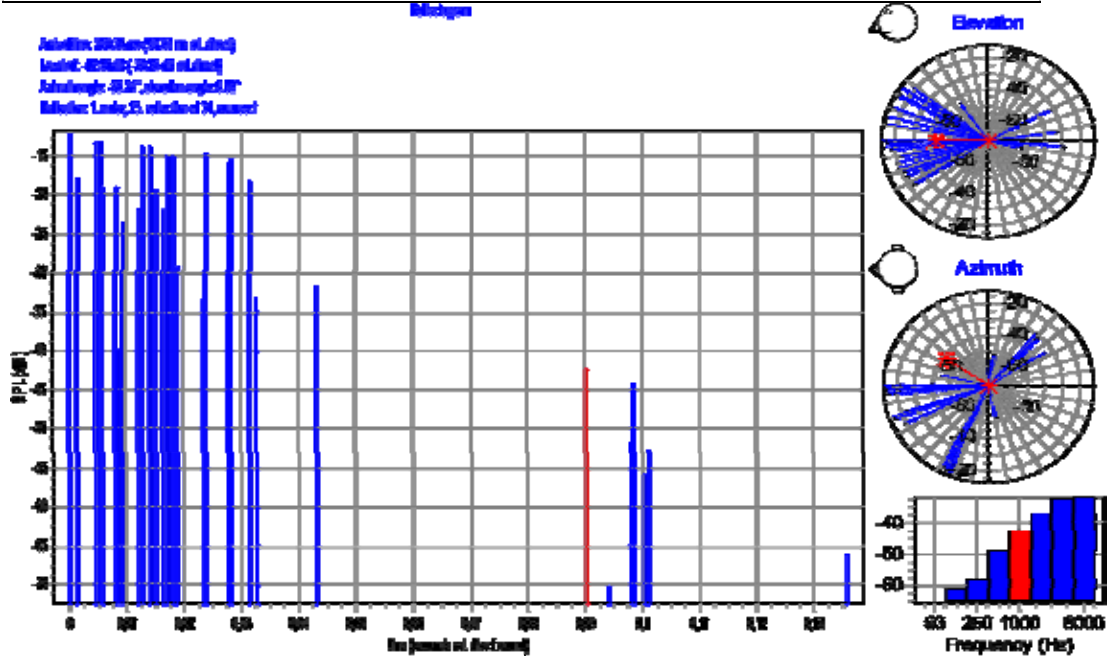
Şekil D.37 4-D Alıcısı için yansımalar grafiği



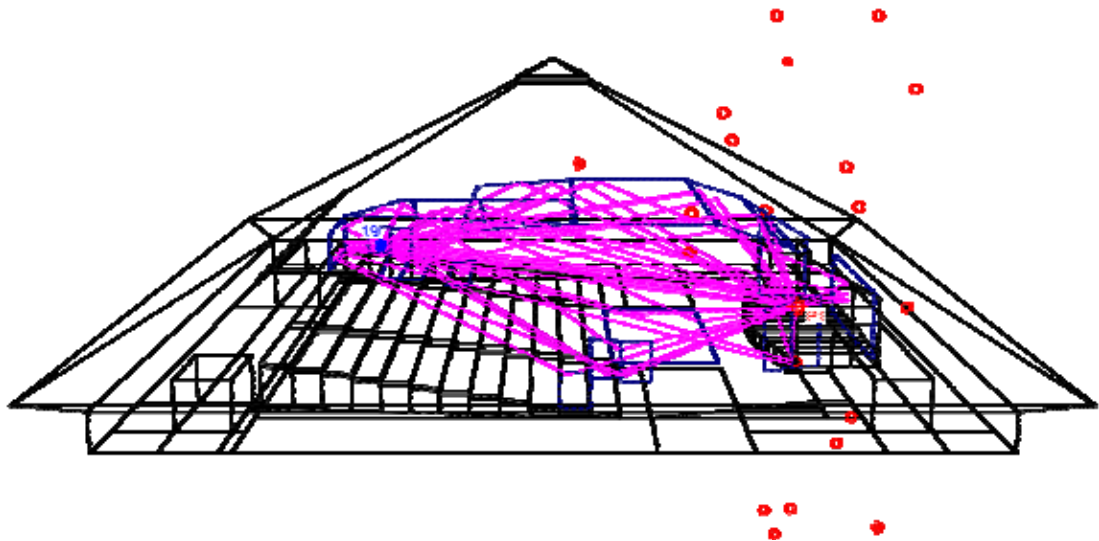
Şekil D.38 4-D Alıcısı için ışın diyagramı

Tablo D.20 5-D Alıcısı için hesaplanan nesnel akustik parametreler

ALICI # 5-D		(x,y,z) = (16.50, -45.00, 3.96)						
Octav Bant (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT	(s)	1,50	0,75	1,16	1,41	0,92	0,97	0,35
T30	(s)	1,36	1,31	1,31	1,20	1,24	1,22	0,92
SPL	(dB)	1,4	0,0	0,4	1,2	1,7	1,2	-2,1
C80	(dB)	2,8	5,1	5,5	4,8	4,3	4,6	6,3
D50	(%)	0,49	0,63	0,66	0,63	0,60	0,60	0,66
Ts	(s)	84	62	58	63	67	64	51
LF80		0,27	0,22	0,21	0,25	0,27	0,28	0,30
SPL(A) = 7.8 (dB)								
LG80* = 0.6 (dB)								
STI = 0.05		(T30 dayanan Teorik STI = 0.00)						



Şekil D.39 5-D Alıcısı için yansımalar grafiği



Şekil D.40 5-D Alıcısı için ışın diyagramı

ÖZGEÇMİŞ

Hicran Balcı 25 Nisan 1975 tarihinde Tolbuhin, Bulgaristan’da doğdu. İlköğrenimini Bulgaristan’da, lise öğrenimini ise 1989 yılında zorunlu göç ile geldiği Kuzey Kıbrıs’ta Türk Maarif Koleji’nde tamamladı. 1999 yılında Doğu Akdeniz Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümünden fakülte birincisi olarak mezun oldu. Kısa bir süre İTÜ Proje Yönetim Merkezinde çalıştıktan sonra halen uluslararası alanda mühendislik ve müşavirlik danışmanlık hizmeti veren çok uluslu bir şirkette mimar olarak çalışmaktadır. Evli olup, çok iyi derecede İngilizce ve Bulgarca ve tatminkâr derecede Rusça bilmektedir.