

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIK ANABİLİM DALI

KONSER SALONLARINDAKİ BİRLEŞTİRİLMİŞ HACİM
UYGULAMALARININ AKUSTİK PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ:
BİR KONSER SALONU ÖRNEĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ezgi BİRCAN

TEMMUZ 2025

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIK ANABİLİM DALI

**KONSER SALONLARINDAKİ BİRLEŞTİRİLMİŞ HACİM
UYGULAMALARININ AKUSTİK PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ:
BİR KONSER SALONU ÖRNEĞİ**

Ezgi BİRCAN

ORCID :

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"YÜKSEK MİMAR"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 02 / 07 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 22 / 07 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mustafa KAVRAZ

ORCID :

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Konser Salonlarındaki Birleştirilmiş Hacim Uygulamalarının Akustik Performans Üzerindeki Etkileri: Bir Konser Salonu Örneği” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam süresince, akademik yolculuğumda bana değerli rehberliği ve desteğiyle eşlik eden, engin bilgi ve tecrübeleriyle katkıda bulunan çok kıymetli danışmanım Sayın Prof. Dr. Mustafa KAVRAZ'a en içten şükranlarımı sunarım. Bu çalışmanın yürütülmesindeki rehberliği ve yapıcı yönlendirmeleri, sürecin verimli ve anlamlı olmasını sağlamıştır. Kendisine duyduğum derin minnettarlığı ifade etmekten onur duyarım.

Hayatımın her anında yanımda olan, koşulsuz sevgileri, sonsuz sabırları ve bitmek bilmeyen destekleriyle yalnızca bu tez sürecinde değil, yaşamım boyunca attığım her adımda arkamda duran kıymetli aileme en derin teşekkürlerimi sunarım. Doğduğum günden bu yana elimi hiç bırakmayan, tüm kararlarımda bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili babam İbrahim BİRCAN’a ve annem Kader BİRCAN’a; varlığıyla her zaman güç aldığım, desteğini her daim hissettiğim canım kardeşim Hüseyin BİRCAN’a şükranlarımı ve minnettarlığımı sunuyorum. Bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan aileme, bu süreçte gösterdikleri sabır ve inanç için sonsuz teşekkür ederim.

Aileme...

Ezgi BİRCAN

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Konser Salonlarındaki Birleştirilmiş Hacim Uygulamalarının Akustik Performans Üzerindeki Etkileri: Bir Konser Salonu Örneği” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Mustafa KAVRAZ’ ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 22/07/2025

Ezgi BİRCAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
1.2. Literatür Çalışması	3
1.3. Akustik Bilimi	10
1.4. Sesin Fiziksel Özellikleri.....	12
1.5. Sesin Ortamdaki Davranışları	16
1.6. Sesin Nesnel Parametreleri.....	19
1.6.1. Reverberasyon Süresi - Reverberation Time (T30)	19
1.6.2. Erken Düşme Süresi-Early Decay Time (EDT).....	22
1.6.3. Ayırt Edilebilirlik- Distinctness (D50)	24
1.6.4. Sesin Açıklığı Netliği - Clarity (C80)	25
1.6.5. Erken Yanal Yansıma - Lateral Energy Fraction (LF80)	25
1.6.6. Ses İletim İndeksi - Speech Transmission Index (STI).....	26
1.6.7. Ses Basıncı Düzeyi - Sound Pressure Level (SPL).....	27
1.6.8. Bas Oranı - Bass Ratio (BR)	27
1.6.9. Tiz Oranı – Treble Ratio (TR)	27
1.7. Konser Salonlarının Mimari Tasarımı.....	28
1.7.1. Salonların Biçim, Hacim ve Tavan Tasarımları.....	28
1.7.2. Salonların Sahne Tasarımları	31
1.7.3. Dinleyici Yerleşim Alan Tasarımları	32
1.7.4. Balkonların Tasarımları	33
1.7.5. Yüzey Malzemeleri	34

1.8. Konser Salonlarının Akustik Tasarımı	35
1.8.1. Değiştirilebilir Doğal Akustik Tasarım.....	36
1.8.2. Değiştirilebilir Ses Yutma Katsayısı.....	36
1.8.3. Orkestra Kabuğu ve Kanopi.....	41
1.8.4. Değiştirilebilir Salon Hacmi	42
1.8.5. Birleştirilmiş Hacim	44
1.8.6. Birleştirilmiş Hacimli Konser Salonu rnekleri.....	47
2. YAPILAN ALIşMALAR.....	60
2.1. Isarphilarmonie Konser Salonu	62
2.1. Konser Salonuna Ait Kabuller ve Kalibrasyon İşlemi	64
2.2. Doluluk Oranına Göre Oluşturulan Senaryolar	70
2.3. Birleştirilmiş Hacim Oranlarına Göre Oluşturulan Senaryolar	72
2.4. Programın alıştırılması.....	74
2.5. Sesin Nesnel Parametrelerine Yönelik Kabuller	76
3. BULGULAR VE TARTIşMA	83
3.1. Konser Salonun Mevcut Durumu ve Doluluk Oranlarının Sesin Nesnel Parametreleri Açısından Değerlendirilmesi	83
3.2. Birleştirilmiş Hacimli Senaryoların Sesin Nesnel Parametreleri Açısından Değerlendirilmesi	105
3.2.1. %20 Birleştirilmiş Hacimli Senaryoların Değerlendirilmesi	105
3.2.2. %35 Birleştirilmiş Hacimli Senaryoların Değerlendirilmesi	125
3.2.3. %50 Birleştirilmiş Hacimli Senaryoların Değerlendirilmesi	145
3.2.4. Birleştirilmiş Hacimli Senaryolara Ait Genel Değerlendirme	165
4. SONUÇLAR.....	186
5. ÖNERİLER.....	189
6. KAYNAKLAR	190
ZGEMİş	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KONSER SALONLARINDAKİ BİRLEŞTİRİLMİŞ HACİM UYGULAMALARININ AKUSTİK PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ: BİR KONSER SALONU ÖRNEĞİ

Ezgi BİRCAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mimarlık Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Mustafa KAVRAZ
2025, 197 Sayfa

Müzik türlerine bağlı olarak ihtiyaç duyulan akustik ortam koşulları değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, bu türlerin icra edildiği konser salonlarının değiştirilebilir akustik özelliklerle donatılması gerekmektedir. Bu çalışmada, farklı doluluk oranları ile birleştirilmiş hacim uygulamalarının salon akustiği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırmada, boş, %50, %75 ve %100 doluluk oranlarından oluşan 4 senaryoya ek olarak %20, %35 ve %50 oranlarında hacim artırımı uygulanmış; farklı açıklık oranları (%25, %50, %75, %100) ve malzeme türleri (ahşap, alçıpan, beton) dikkate alınarak 36 ek senaryo tasarlanmıştır. Böylece toplam 40 senaryo, ODEON V.10 simülasyon yazılımı aracılığıyla değerlendirilmiştir. Bu senaryolardan elde edilen T30, EDT, C80, D50, LF80, BR, TR ve STI parametreleri, optimum değerlerle karşılaştırılmıştır. Son aşamada, T30 ve EDT parametreleri mevcut durumla frekans bazında JND ölçütü üzerinden değerlendirilmiştir. Bulgular, doluluk oranının artmasıyla reverberasyon süresinin azaldığını; buna karşılık C80, D50 ve STI değerlerinin yükseldiğini göstermiştir. Ayrıca, frekans bazlı değerlendirme yaklaşımı, senaryolarda kullanılan değişkenlerin akustik ortamda oluşturduğu algısal farklılıkları daha hassas biçimde yansıtmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mimari akustik, Birleştirilmiş hacim, Isarphilarmonie Concert Hall, Sesin nesnel parametreleri, JND (Just Noticeable Difference)

Master's Thesis

SUMMARY

THE EFFECTS OF COUPLED VOLUME APPLICATIONS ON ACOUSTIC PERFORMANCE IN CONCERT HALLS: A CASE STUDY

Ezgi BİRCAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Architecture Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Mustafa KAVRAZ
2025, 197 Pages

The acoustic conditions required for different types of music vary. Concert halls where these types of music are performed must therefore be equipped with adjustable acoustic properties. This study examined the effects of volume applications combined with different occupancy rates on hall acoustics. Four scenarios were considered: empty, 50% occupancy, 75% occupancy and 100% occupancy. Volume increases of 20%, 35% and 50% were applied, and 36 additional scenarios were designed considering different openness ratios (25%, 50%, 75% and 100%) and material types (wood, plasterboard and concrete). Thus, a total of 40 scenarios were evaluated using ODEON V.10 simulation software. The T30, EDT, C80, D50, LF80, BR, TR and STI parameters obtained from these scenarios were compared with the optimal values. Finally, the T30 and EDT parameters were evaluated based on the JND criterion at the frequency level compared to the current situation. The findings showed that, as occupancy rates increased, reverberation time decreased, while C80, D50 and STI values increased. Additionally, the frequency-based evaluation approach more accurately reflected the perceptual differences created by the variables used in the scenarios within the acoustic environment.

Key Words: Architectural acoustics, Coupled volume, Isarphilharmonie Concert Hall, Objective acoustic parameters, JND (Just Noticeable Difference)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Lindsay’ın akustik çarkı (Lindsay, 1968).....	11
Şekil 2. Basınç-zaman grafiğinde dalga boyu	14
Şekil 3. Farklı frekanslardaki seslerin periyotları.....	15
Şekil 4. Basınç-zaman grafiğinde genlik	15
Şekil 5. Ses dalgasının yansıması (Everest & Pohlmann, 2022)	17
Şekil 6. Sesin yansıması, yutulması ve geçişi (Maekawa, Rindel, & Lord, 2011).....	17
Şekil 7. Farklı frekanslara sahip seslerin aynı engel karşısında davranışları	18
Şekil 8. Sesin saçılması (Cowan, 2000)	19
Şekil 9. Ses düzeyinde oluşan 60 dB’lik azalmanın zamanla ilişkisi (Barron, 2010)	20
Şekil 10. Farklı müzik türlerinin hacim-RT ilişkisi (Studio, n.d.)	21
Şekil 11. Egan’a göre farklı faaliyetler için optimum reverberasyon süreleri (Egan, 2007).....	22
Şekil 12. Erken ve geç yansımalara ait bir grafik (Egan, 2007).....	23
Şekil 13. Konuşmanın anlaşılabilirliği ve D50 ilişkisi (Kuttruff H. , 2001; İlban, 2022).....	24
Şekil 14. Konser salonlarında karşılaşılan en yaygın plan tipleri (Long, 2006)	29
Şekil 15. Konser salonlarında; (a) kötü ve (b) iyi tavan uygulamaları.....	31
Şekil 16. Dinleyici alanı zemin kesiti (Maekawa, Rindel, & Lord, 2011)	33
Şekil 17. Balkon ve balkon altı bölümlerinin uygun boyut ve formu (Abdülrahimov, 2005).....	34
Şekil 18. Yüzeyler üzerine perde uygulaması (Everest & Pohlmann, 2022)	37
Şekil 19. Panel çeşitleri; (a) menteşeli paneller, (b) jaluzili paneller (Everest & Pohlmann, 2022).....	38
Şekil 20. Emici/dağıtıcı ayarlanabilir paneller (Dükkan Hifi, n.d.)	39
Şekil 21. Panellerin frekanslara göre yutuculuk katsayılarındaki değişim; (a) Abffusor, (b) Değişken rezonanslı panel.....	40
Şekil 22. Dönen elemanlar; (a) silindirik yapılı (Atelier Crescendo, 2021), (b) üçgenler prizması yapılı	40
Şekil 23. Tüp Kapanı.....	41
Şekil 24. Milton Keynes Tiyatrosu hareketli tavan pozisyonları (Barron M. , 2010)	43
Şekil 25. Sala São Paolo konser salonu; (a) parçalı tavan (Wikimedia Commons, 2016), (b) tavan askı sistemi (Sala São Paulo, n.d.)	43

Şekil 26. Birleştirilmiş hacim uygulamaları; (a) Sahne ve soffito kulesi (Furuto, 2011), (b) yankı odası (Beranek L. , 1996)	44
Şekil 27. Birleştirilmiş hacimlerde ses sönümlenmesi (Mehta, Johnson, & Rocafort, 1999).....	45
Şekil 28. Çift eğimli sönümleme eğrisi	46
Şekil 29. Lucerne Konser Salonu; (a) genel görünüm (b) kanopi (Kahle Acoustics, n.d.).....	48
Şekil 30. KKL Lucerne Konser Salonu'ndaki yankı odası	48
Şekil 31. Lucerne Konser salonu; (a) yankı odası, (b) kapılar (Kahle Acoustics, n.d.)	49
Şekil 32. Birmingham konser salonu (Visit Birmingham, n.d.).....	50
Şekil 33. Birmingham Konser Salonu; (a) kesit düzleminde yankı odası, (b) plan düzleminde yankı odası (Beranek L. , 1996).....	51
Şekil 34. Dallas Eugene McDermott Konser Salonu: (a) salonun iç mekanı (Dallas Symphony, n.d.), (b) salonun kesiti (Beranek L. , 1996)	52
Şekil 35. Sibelius Konser Salonu ;(a) yankı odası kapıları, (b) yankı odası iç görünümü (Beckhoff Automation, 2011).....	53
Şekil 36. Sibelius concert hall plan düzleminde yankı odası (Live Sound, n.d.)	54
Şekil 37. Harpa Concert Hall yankı odası ve salon birleşimi (Systems, Waagner-Biro Stage, n.d.).....	55
Şekil 38. Harpa Concert Hall'ün enine kesiti (Gooood, n.d.)	55
Şekil 39. Harpa Concert Hall'ün kat planları (Gooood, n.d.).....	56
Şekil 40. Hamel Müzik Salonu'nundaki yankı odası (İnşaat aşaması) (Roloff, 2021)	57
Şekil 41. Heydar Aliyev Kültür Merkezi (Aksu, 2014)	58
Şekil 42. Heydar Aliyev Oditoryumu'nda bulunan birleştirilmiş hacim uygulaması (Sü-Gül & Çalışkan, 2010).....	58
Şekil 43. McPherson Resital Salonu'nun kesit ve planı (Kucharek, 2022).....	59
Şekil 44. Isarphilarmonie konser binası (Esch, 2021).....	62
Şekil 45. Hall E (Esch, n.d.)	62
Şekil 46. Isarphilarmonie konser salonu ve Hall E ilişkisi (Gasteig, n.d.).....	63
Şekil 47. Isarphilarmonie konser salonu (Gasteig, n.d.).....	63
Şekil 48. Doluluk oranlarına ait grid görünümü.....	65
Şekil 49. Isarphilarmonie Konser Salonuna ait RT süreleri (Nagata Acoustics, 2021).....	66
Şekil 50. Koltuk malzemesinin kalibrasyon için düzenlenmiş katsayı değerleri	67
Şekil 51. Mevcut ve kalibrasyon sonucu elde edilen RT değerleri	68

Şekil 52. Isarphilarmonie Konser Salonunun doluluk oranlarına göre oluşturulan senaryolar	71
Şekil 53. Birleştirilmiş hacimlerin plan ve kesit düzlemindeki konumu.....	72
Şekil 54. Birleştirilmiş hacimlerin konser salonunun ana hacmi ile olan ilişkileri	73
Şekil 55. Birleştirilmiş hacim senaryolarında açıklık oranları	74
Şekil 56. Simülasyon aşamalarına ait görseller	75
Şekil 57. Reverberasyon süresi-hacim grafiğinden elde edilen T30 değeri	77
Şekil 58. Müzik türlerine göre, T30-V grafiğinden elde edilen T30 değerleri.....	78
Şekil 59. Doluluk oranlarına ait senaryolardan elde edilen T30 süreleri	84
Şekil 60. Isarphilarmonie Konser Salonunun farklı doluluk oranlarından elde edilen T30 değerlerinin grid dağılımı (500 Hz)	88
Şekil 61. Doluluk oranlarına ait senaryoların simülasyonlarından elde edilen EDT süreleri	90
Şekil 62. Isarphilarmonie Konser Salonunun farklı doluluk oranlarından elde edilen EDT değerlerinin grid dağılımı (500 Hz).....	92
Şekil 63. Doluluk oranlarına ait senaryoların simülasyonlarından elde edilen C80 değerleri.....	93
Şekil 64. Isarphilarmonie Konser Salonunun farklı doluluk oranlarından elde edilen C80 değerlerinin grid dağılımı (500 Hz)	96
Şekil 65. Doluluk oranlarına ait senaryoların simülasyonlarından elde edilen D50 değerleri.....	97
Şekil 66. Isarphilarmonie Konser Salonunun farklı doluluk oranlarından elde edilen D50 değerlerinin grid dağılımı (500 Hz).....	98
Şekil 67. Doluluk oranlarına ait senaryoların simülasyonlarından elde edilen STI değerleri.....	98
Şekil 68. Isarphilarmonie Konser Salonunun farklı doluluk oranlarından elde edilen STI değerlerinin grid dağılımı (500 Hz).....	99
Şekil 69. Doluluk oranlarına ait senaryoların simülasyonlarından elde edilen LF80 değerleri.....	100
Şekil 70. Isarphilarmonie Konser Salonunun farklı doluluk oranlarından elde edilen LF80 değerlerinin grid dağılımı (500 Hz)	101
Şekil 71. Doluluk oranlarına ait senaryoların simülasyonlarından elde edilen BR değerleri.....	102
Şekil 72. Doluluk oranlarından elde edilen TR değerleri (2000 Hz).....	103
Şekil 73. Doluluk oranlarından elde edilen TR değerleri (4000 Hz).....	104
Şekil 74. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen T30 değerleri	106
Şekil 75. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen EDT değerleri.....	111

Şekil 76. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen C80 değerleri	115
Şekil 77. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen D50 değerleri	118
Şekil 78. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen STI değerleri	119
Şekil 79. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen LF80 değerleri	120
Şekil 80. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen BR oranları	121
Şekil 81. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen TR değerleri (2000 Hz)	123
Şekil 82. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen TR değerleri (4000 Hz)	124
Şekil 83. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen T30 değerleri	126
Şekil 84. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen EDT değerleri	131
Şekil 85. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen C80 değerleri	135
Şekil 86. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen D50 değerleri	138
Şekil 87. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen STI değerleri	139
Şekil 88. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen LF80 değerleri	140
Şekil 89. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen BR oranları	141
Şekil 90. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen TR değerleri (2000 Hz)	143
Şekil 91. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen TR değerleri (4000 Hz)	144
Şekil 92. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen T30 değerleri	146
Şekil 93. %50 birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen EDT değerleri	151
Şekil 94. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen C80 değerleri	155
Şekil 95. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen D50 değerleri	158

Şekil 96. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen STI değerleri	159
Şekil 97. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen LF80 değerleri	160
Şekil 98. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen BR oranları	161
Şekil 99. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen TR değerleri (2000 Hz)	163
Şekil 100. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen TR değerleri (4000 Hz)	164
Şekil 101. Birleştirilmiş hacimli senaryoların tamamı için düşük frekans bölgesinde (63-250 Hz) elde edilen T30 değerleri	166
Şekil 102. Birleştirilmiş hacimli senaryoların tamamı için orta frekans bölgesinde (500-1000 Hz) elde edilen T30 değerleri	169
Şekil 103. Birleştirilmiş hacimli senaryoların tamamı için yüksek frekans bölgesinde (2000-8000 Hz) elde edilen T30 değerleri	172
Şekil 104. Birleştirilmiş hacimli senaryoların tamamı için düşük frekans bölgesinde (63-250 Hz) elde edilen EDT değerleri	177
Şekil 105. Birleştirilmiş hacimli senaryoların tamamı için orta frekans bölgesinde (500-1000 Hz) elde edilen EDT değerleri	180
Şekil 106. Birleştirilmiş hacimli senaryoların tamamı için yüksek frekans bölgesinde (2000-8000 Hz) elde edilen EDT değerleri.....	183

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Farklı ortamlarda sesin yayılma hızları (Aykol, 1986)	12
Tablo 2. STI değerleri.....	26
Tablo 3. Konser salonu detayları ve akustik bilgileri (Nagata Acoustics, 2021)	64
Tablo 4. Modelde kullanılan malzemeler	66
Tablo 5. Birleştirilmiş hacmin iç yüzeyinde kullanılan malzemeler	69
Tablo 6. Çalışma kapsamında incelenen tüm senaryolar	69
Tablo 7. Müzik türünden bağımsız olarak belirtilmiş parametre değerleri	76
Tablo 8. Reverberasyon süresi ve EDT'nin optimum değer aralıkları.....	79
Tablo 9. Farklı müzik türleri için önerilen optimum reverberasyon süreleri	80
Tablo 10. Farklı müzik türleri için önerilen optimum EDT değerleri	81
Tablo 11. Farklı müzik türleri için önerilen optimum C80 değerleri	82
Tablo 12. Doluluk oranlarının simülasyonundan elde edilen verilerin, farklı müzik türleri için orta frekans bölgesinde önerilen optimum değer aralıklarıyla karşılaştırılması.....	85
Tablo 13. Doluluk oranlarının simülasyonundan elde edilen EDT değerlerinin, farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıklarıyla karşılaştırılması.....	91
Tablo 14. Doluluk oranlarının simülasyonundan elde edilen C80 değerlerinin farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıklarıyla karşılaştırılması	94
Tablo 15. Ortalama T30 ve BR değerlerinin değerlendirilmesi	102
Tablo 16. %20 Birleştirilmiş hacimli tüm senaryolardan elde edilen T30 değerleri (500 Hz).....	106
Tablo 17. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryolarda elde edilen ortalama T30 değerlerinin önerilen optimum aralıklarla karşılaştırılması	108
Tablo 18. %20 Birleştirilmiş hacimli tüm senaryolardan elde edilen EDT değerleri (500 Hz).....	112
Tablo 19. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryolarda elde edilen ortalama EDT değerlerinin önerilen optimum aralıklarla karşılaştırılması	113
Tablo 20. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryolarda elde edilen ortalama C80 değerlerinin önerilen optimum aralıklarla karşılaştırılması	116
Tablo 21. Ortalama T30 ve BR değerlerinin değerlendirilmesi	122
Tablo 22. %35 Birleştirilmiş hacimli tüm senaryolardan elde edilen T30 değerleri (500 Hz).....	126

Tablo 23. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryolarda elde edilen ortalama T30 değerlerinin önerilen optimum aralıklarla karşılaştırılması	128
Tablo 24. %35 Birleştirilmiş hacimli tüm senaryolardan elde edilen EDT değerleri (500 Hz).....	132
Tablo 25. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryolarda elde edilen ortalama EDT değerlerinin önerilen optimum aralıklarla karşılaştırılması	133
Tablo 26. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryolarda elde edilen ortalama C80 değerlerinin önerilen optimum aralıklarla karşılaştırılması	136
Tablo 27. Ortalama T30 ve BR değerlerinin değerlendirilmesi	142
Tablo 28. %50 Birleştirilmiş hacimli tüm senaryolardan elde edilen T30 değerleri (500 Hz).....	146
Tablo 29. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryolarda elde edilen ortalama T30 değerlerinin önerilen optimum aralıklarla karşılaştırılması	148
Tablo 30. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen EDT değerleri (500 Hz).....	152
Tablo 31. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryolarda elde edilen ortalama EDT değerlerinin önerilen optimum aralıklarla karşılaştırılması	153
Tablo 32. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryolarda elde edilen ortalama C80 değerlerinin önerilen optimum aralıklarla karşılaştırılması	156
Tablo 33. Ortalama T30 ve BR değerlerinin değerlendirilmesi	162
Tablo 34. Düşük frekans bölgesindeki T30 değerlerinin büyükten küçüğe sıralanması.....	168
Tablo 35. Orta frekans bölgesindeki T30 değerlerinin büyükten küçüğe sıralanması	171
Tablo 36. Yüksek frekans bölgesindeki T30 değerlerinin büyükten küçüğe sıralanması.....	175
Tablo 37. Düşük frekans bölgesindeki EDT değerlerinin büyükten küçüğe sıralanması.....	179
Tablo 38. Orta frekans bölgesindeki EDT değerlerinin büyükten küçüğe sıralanması	182
Tablo 39. Yüksek frekans bölgesindeki EDT değerlerinin büyükten küçüğe sıralanması.....	185

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

c	: Ses Hızı (m/sn)
V	: Hacim (m ³)
λ	: Dalga Boyu (m)
f	: Frekans (Hz)
α	: Ses yutma katsayısı
W	: Ses Gücü (Watt)
A	: Alan (m ²)
BR	: Bas Oranı (Bass Ratio)
C80	: Netlik (Clarity)
D50	: Ayırt Edilebilirlik (Distinctness)
EDT	: Erken Düşme Süresi (Early Decay Time)
T	: Periyot (sn)
T30	: Reverberasyon Süresi(sn.)
G	: Toplam Ses Düzeyi (Total Sound Level- Strength)
I	: Ses şiddeti /Yeğlilik (W/m ²)
LF80	: Erken Yanal Enerji Oranı (Lateral Energy Fraction)
P	: Ses Basıncı (N/m ²)
RT	: Reverberasyon (Çınlama) Süresi (Reverberation Time)
SPL	: Toplam Ses Basınç Düzeyi (Total Sound Pressure Level)
STI	: Ses İletim İndeksi (Speech Transmission Index)
TR	: Tiz Oranı (Treble Ratio)
TS	: Merkez Zamanı (Centre Time)

1. GENEL BİLGİLER

Mimari bağlamda ses, yalnızca estetik ya da teknik bir unsur olarak değil, kullanıcı konforunu ve yapının işlevselliğini doğrudan etkileyen temel bir bileşen olarak ele alınmaktadır. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar; çevresel gürültünün kontrol altına alınması, yapı elemanları arasındaki ses yalıtımı, yapı fiziği kapsamında ses geçiş kayıpları ve iç mekanlarda yankı kontrolü gibi konuları kapsamaktadır. (Wikipedia, 2024) Gürültü kontrolü, özellikle konut, okul ve hastane gibi hassas kullanımlı yapılarda önem arz ederken; iç mekan akustiği ise performans salonları, ibadethaneler ve toplantı odaları gibi kullanıcı ile ses arasındaki ilişkinin belirleyici olduğu mekanlarda ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda, yapı içindeki hacimsel düzenlemeler ve mekansal ilişkiler, yalnızca fiziksel değil işitsel bağlamda da değerlendirilmekte; sesin yayılım biçimi ve algılanan akustik kaliteyi etkileyen başlıca faktörler arasında yer almaktadır. (CE's Mimarlık, n.d.) Birleştirilmiş hacimlerin, mekanların akustiğine etkisi üzerine yapılan bilimsel çalışmalar konser salonları ağırlıklı olmakla birlikte, konser salonları ölçeğinde olmasa da daha küçük hacimli mekanlarla ilgili bilimsel çalışmalar da yer almaktadır.

Bu tez çalışması, mimari akustik disiplini içinde, özellikle konser salonlarının mekansal akustiği ve birleştirilmiş hacimlerin performansı konularına odaklanmaktadır. Literatürde, bu tür hacimsel düzenlemelerin sesin yayılımı ve algısı üzerindeki etkileri geniş çapta incelenmiş olsa da, farklı doluluk oranları ve malzeme kombinasyonlarının entegre bir yaklaşımla değerlendirilmesi sınırlıdır. Bu çalışma, Münih'teki Isarphilharmonie Konser Salonu örneği üzerinden, dinleyici doluluk oranlarının yanısıra birleştirilmiş hacimlerin açıklık, hacim ve malzeme türü gibi değişkenlerinin salonun akustik performansı üzerindeki etkilerini analiz ederek, bu alandaki bilgi boşluğunu doldurmayı hedeflemektedir. Elde edilen bulgular, konser salonlarının akustik tasarımında daha bilinçli kararlar alınmasına ve farklı müzik türleri için optimum akustik koşulların sağlanmasına yönelik pratik öneriler sunacaktır.

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasının temel amacı, konser salonlarında uygulanan birleştirilmiş hacim tasarımları ile farklı dinleyici doluluk oranlarının, mekansal akustik kalite üzerindeki etkilerini çok yönlü olarak incelemektir. Bu kapsamda, hacim oranı, açıklık boyutu, malzeme türü ve dinleyici doluluk durumu gibi değişkenlerin, sesin nesnel akustik parametreleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma, Münih'te yer alan Isarphilharmonie Konser Salonu örneği üzerinden yürütülmüştür.

Çalışmanın ilk aşamasında, dört farklı doluluk durumuna sahip senaryolar için sesin nesnel akustik parametrelerine (T30, EDT, C80, D50, LF80, BR, TR, STI) ilişkin veriler simülasyon yoluyla elde edilmiş; bu veriler, konser salonları için genel olarak önerilen optimum değer aralıkları ile birlikte, farklı müzik türlerine özgü akustik gereksinimler doğrultusunda değerlendirilmiştir.

İkinci aşamada ise, ana hacme %20, %35 ve %50 oranlarında ek hacimler tanımlanarak, farklı açıklık oranları (%25, %50, %75, %100) ve malzeme türleriyle oluşturulan toplam 36 adet birleştirilmiş hacim senaryosu analiz edilmiştir. Bu senaryolar, hem genel konser etkinlikleri hem de farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıklarıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Son aşamada ise, söz konusu 36 senaryodan elde edilen T30 ve EDT değerleri mevcut durum verileriyle frekans bazında karşılaştırılmış; ISO 3382-1:2009 standardında tanımlanan fark edilebilir değişim (Just Noticeable Difference - JND) kriterleri temel alınarak, yapılan hacimsel ve malzeme kaynaklı müdahalelerin akustik açıdan algılanabilir düzeyde fark oluşturup oluşturmadığı araştırılmıştır.

1.2. Literatür Çalışması

Çalışma kapsamında birleştirilmiş hacimli konser salonları ile ilgili yapılan akustik inceleme ve analizlere ait literatür çalışmaları incelenmiştir.

Harrison, Madaras ve Celmer (2001) “Indiana Goshen College'da 1000 Kişilik Bir Konser Salonu İçin Birleştirilmiş Hacimlerin Tasarımında Bilgisayar Modellemesi Ve Tahmini” başlıklı çalışmalarında; şekil, hacim, konum ve boyut gibi değişkenler üzerinden, birleştirilmiş hacimlerin mekan akustiğine olan etkisi hakkında bilgi edinmeyi amaçlamışlardır. Çalışmadan elde edilen veriler ile birlikte sönümlleme eğrilerinin görsel analizi gerçekleştirilmiş, ayrıca T15, T30 ve T60 değerleri karşılaştırılmıştır. Bunların yanı sıra işitsel simülasyonlar kullanılarak değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda; ana hacme bağlanan hacimlerin büyüklüklerinin çift eğimli sönümlleme üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Şekil, konum ve açıklık tasarımının mekanın akustik performansı üzerinde etkiye sahip olsa da, hacim kadar etkili olmadığı belirlenmiştir. Üzerinde araştırma yapılan konser salonunda etkili bir akustik değişiklik sağlanabilmesi için, birleştirilmiş hacimlerin ana hacmin %50-%75'i kadar olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Ermann ve Johnson (2005) yapmış oldukları “İkincil Odanın Maruziyeti Ve Maddiliği Ve Çift Hacimli Konser Salonlarının Dürtü Tepkisi Üzerindeki Etkisi” başlıklı çalışmalarında; birleştirilmiş hacimli salonların tasarımından kaynaklanan çift eğimli sönümlleme grafiğini, RT/T15 bağlantı sabiti kullanılarak incelemişlerdir. Çalışma için öncelikle birleştirilmiş hacim kullanılmış eski bir salon belirlenmiş, sonrasında alınan birtakım farklı kararlar sonucunda yeniden bir salon tasarlanmıştır. Birleştirilmiş hacim içinde kullanılan malzemeler ile açıklıklar değiştirilerek sönümlleme eğrileri elde edilmiş ve bu eğriler bağlantı sabiti kullanılarak yorumlanmıştır. Bağlantı sabiti, birleştirilmiş hacmin iç yüzeyinde pürüzsüz beton kullanıldığında en yüksekken, sırasıyla tuğla üzeri sıva, alçı panel, kontrplak ve beton blok uygulandığında azalmaktadır.

Bradley ve Wang (2005) “Basit Birleştirilmiş Hacim Geometrisinin Üstel Olmayan Bozunmadan Elde Edilen Objektif Ve Subjektif Sonuçlar Üzerindeki Etkileri” başlıklı çalışmalarında; bir ana hacim ve buna bağlı bir yan odadan oluşan basit bir model üzerinden sesin mekan içindeki davranışını incelemişlerdir. Çalışmada; açıklık, ses yutma katsayı değerleri ve hacim değişken olarak kullanılmıştır. Birleştirilmiş hacim uygulamalarının değerlendirilmesi; çift eğimli sönümlleme eğrisi, T30/T15 oranı ve Bayes analizi aracılığı ile

gerçekleştirilmiştir. Simüle edilen bazı senaryolar işitselleştirilerek psikoakustik testler yapılmıştır. Test sonucunda, hacim ve açıklık artışıyla birlikte dinleyicilerin algıladığı yankılanmanın da artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu değerlendirme sonuçları, elde edilen nesnel parametre değerleriyle uyumluluk göstermiştir. Çalışmanın sonucunda, daha büyük bozunma oranının ve daha küçük dB değerinin, genel olarak yankılanmanın daha fazla algılanmasına sebep olduğu belirlenmiştir. Algılanan netliğin değişkenlere bağlı olmadığı ve önemli bir değişim göstermediği sonucu ortaya konulmuştur.

Michael Ermann (2005) “Birleştirilmiş Hacimler: İkincil Oda Reverberasyonu Ve Konser Salonlarının Çift Eğimli Sönümlemesi” başlıklı çalışması kapsamında; 1990 ve 2000’lerde inşa edilen ve birleştirilmiş hacimlere sahip olan iki farklı konser salonunun modelleri üzerinden incelemeler yapmıştır. İki hacmi birbirine bağlayan açıklıklar, ana salonun toplam yüzey alanının % 0,55’ine karşılık gelmekte olup, açıklık oranının %5 olduğu varsayılarak sonuçlar elde edilmiştir. İkinci oda olarak tanımlanan hacim, ana salon hacminin 1/3’ü olacak şekilde tasarlanmıştır. Yazar, RT/T15 bağlantı sabitini kullanarak enerji zaman grafiğinde oluşan değişimi incelemiştir. Salonda çift eğimli sönümleme olduğu durumlarda, bağıntı sabitinin diğerlerinden daha büyük olduğu görülmüştür. İstatiksel model üzerinden yapılan incelemelerde, 1000 Hz’de 2.0’lık bağıntı sabiti elde etmek için, birleştirilmiş hacimde oluşan reverberasyon süresinin, ana hacimdekinden en az beş kat daha fazla olması gerektiği ve hacimler arasındaki açıklığın, yüzey alanına oranla küçük olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Geometrik model üzerinden yapılan incelemelerde ise, 2.0’lık bir bağıntı sabitinin elde edilmesi için, birleştirilmiş hacimde oluşan reverberasyon süresinin, ana hacimdekinden 15 kat fazla olması gerektiği ve hacimler arasında tasarlanan açıklıkların, toplam yüzey alanına oranla küçük olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Bradley ve Wang (2006) “Birleştirilmiş Hacimlerde Oda Akustiği” başlıklı çalışmaları kapsamında; malzeme, ses yutma katsayıları ve açıklık boyutu gibi mimari tasarım parametrelerinde yapılan değişimlerin, birleştirilmiş hacimlerin akustik koşulları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Malzeme değişimiyle değişen ses yutma katsayı değerleri ile SPL grafiğinde de değişimler görülmüş olup, ses yutma katsayılarının artışıyla SPL grafiğindeki çift eğim etkisi azalmıştır. Bunun yanı sıra açıklık oranındaki azalma grafiğin çift eğimli olmasını tetiklemiştir.

David Timothy Baradley’in, 2006’da, Lily M. Wang danışmanlığında yürüttüğü “Birleştirilmiş Hacim Sistemlerinde Ses Enerjisi Azalması Üzerindeki Parametre Etkilerinin

Analizi” isimli doktora çalışması üç ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, hem inşa edilmiş hem de simüle edilmiş bir birleştirilmiş hacimli konser salonunda oluşan ses bozulmaları üzerindeki belirli mimari parametrelerin etkilerine odaklanılmıştır. İkinci bölümde, bu ses bozulmalarını karakterize etmeye yardımcı olan bir araç geliştirilmiştir. Son bölümde ise, psikoakustik test ve analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, T30/T15 bağlantı katsayısı çift eğimli sönümlemeyi tanımlamak için kullanılmıştır. Hacim artışı ile bağlantı katsayı değeri artmış, yutma değerlerinin artışı ile birlikte ise artış oranı azalmıştır. Açıklık oranı, ana hacim yüzeyinin küçük bir yüzdesini oluşturduğunda, çift eğimli sönümleme meydana gelmiştir. Bu araştırma sürecinde geliştirilen iki farklı metrik, çift eğimli sönümlemeyi daha kolay tanımlamak için kullanılmıştır. Bozunma oranı ve ΔdB olarak adlandırılan niceleyiciler, Bayes analizine dayanmaktadır. Bu niceleyicilerden elde edilen sonuçlar, T30/T15 bağıntısından elde edilen sonuçlarla paralellik göstermektedir. LDT/EDT olarak tanımladıkları çift eğimli sönümlemenin, diğer oranlarla benzer eğilime sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, LDT/EDT’nin düşük çift eğimli sönümleme oranlarını belirlemede diğer oranlardan daha başarılı olduğu görülmüştür. Yutuculuk oranı ve açıklık boyutunun çift eğimli sönümleme üzerindeki etkileri, belirtilen tüm oranlarla değerlendirilmiştir. T30/T15 ve LDT/EDT için elde edilen sonuçlarda, azalan yutuculuk ile birlikte çift eğimli sönümlemenin (double slope effect) arttığı, açıklık oranlarının en düşük olduğu seviyede ise pik yaptığı görülmüştür. Bozunma oranı ve ΔdB , mimari parametrelerin değişimi ve alıcı noktaların farklılaşmasıyla tutarsızlık göstermiştir. Çalışmanın son bölümünde incelenen psikoakustik test ve analiz sonuçlarına göre, katılımcıların en düşük oranda tercih ettiği sönümleme, en yüksek çift eğimli sönümleme olmuştur (Bradley D. T., 2006)

Michael Ermann (2006) “Birleştirilmiş Bir Hacim Konser Salonu'nun Beş Hassasiyeti: Bir Özet” başlıklı çalışmasında; birleştirilmiş hacme sahip olan konser salonlarının akustik özelliklerini incelemiştir. Çalışma kapsamında, oluşturulan birleştirilmiş hacimli sistemin, tek hacimli bir salonun aksine, hem uzun reverberasyon sürelerini hem de netliği aynı anda sunabildiği belirtilmiştir. Ayrıca, oluşturulan sistemde etkili bir sonuç elde edebilmek için; birleştirilmiş hacimde oluşan yankı süresinin ana hacimden daha uzun olması, iki hacmi bağlayan açıklıkların küçük olması, dinleyicinin salondaki konumunun göz önünde bulundurulması ve arka plan gürültüsünün oldukça düşük olması gerektiği belirtilmiştir. Bunlara ilave olarak, dinleyicilerin birleştirilmiş hacimli salonları tercih edip etmediklerinin belirsizliğini koruduğu ifade edilmiştir.

Gül (2006) “Ölçekli Model Tekniğini Kullanarak Akustik Olarak Birleştirilmiş Alanlarda Enerji Azalmaları Üzerine Sistemik Araştırmalar” başlıklı yüksek lisans tez çalışmasında 1:8 ölçekli bir akustik model üzerinden odaların dürtü tepkilerini araştırmıştır. Açıklık boyutunun etkileri, açıklığın şekli sabit tutularak incelenmiştir. Alıcı konumunun etkileri ise, alıcının sabit bir açıklığa olan uzaklığı değiştirilerek değerlendirilmiştir. İki farklı kaynak ve mekan içindeki 4x4’lük ızgara ile belirlenen 16 kullanıcı konumu, %5, %10, %20 ve %40 açıklık boyutu dışındaki diğer değişkenleri oluşturmaktadır. Çalışmada yöntem olarak Schroeder bozunma fonksiyonu kullanılmıştır. Elde edilen veriler Bayes yaklaşımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, çift eğimli sönümleme oluşan frekansın açıklık boyutuyla ilişkili olduğu görülmüştür. Bu sonuca ek olarak, geleneksel görüşe göre akustik kuplajın en güçlü olduğu alanın, açıklığın ekseni boyunca olması gerektiği düşünülmüş ancak elde edilen veriler, akustik kuplajın en çok gölge bölgelerinde bulunan kullanıcı konumlarında meydana geldiğini göstermiştir.

Bradley ve Wang (2007) “Mevcut Birleştirilmiş Hacim Konser Salonu İçin Ölçülen Ve Bilgisayar Modelli Nesnel Parametrelerin Karşılaştırılması” başlıklı çalışmalarında; netlik ve bozulma sürelerini baz alarak bilgisayar modelleme yönteminin doğrulanmasını amaçlamışlardır. Öncelikle konser salonu için yapılan modelleme ile elde edilen değerler mevcut salonda yapılan ölçümler ile kalibre edilmiştir. Kalibrasyon sonucu modelleme ile T30, T15 ve C80 parametreleri için elde edilen sonuçların, 1000 Hz’de büyük ölçüde doğruluk gösterdiği düşük frekanslarda sadece C80 değerinde farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. Çalışmada, bilgisayar modellerinin yüksek frekanslarda C80 değerini tahmin etmede daha güvenilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Xiang ve Summers’ın (2007) “Birleştirilmiş Odalarda Akustik: Modelleme Ve Veri Analizi” başlıklı çalışmalarında; sayısal modelleme, geometrik akustik, difüzyon denklemleri ve Bayesçi analiz gibi farklı teknikler karşılaştırılmış olup, birleştirilmiş hacimlerin akustik performansını değerlendirmede kullanılan bu yöntemler tartışılmıştır. Çalışma sonucunda; birleştirilmiş hacimlerin akustik analizi için tek bir ideal yöntem bulunmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Odanın fiziksel özelliklerine ve araştırılan konuya göre farklı yöntemler tercih edilebilmektedir. Geniş ölçekli mekanlarda, hızlı tahminler yapmak için, istatistiksel akustik modellerinin kullanımı önerilirken, daha ayrıntılı analizler için geometrik ya da dalga akustiği modellerinin kullanımı önerilmektedir. Ayrıca, fiziksel ölçek modellemeleri ve Bayesçi analizler, diğer yöntemlerin doğruluğunu test etmek ve

modellemelerin geçerliliğini sağlamak açısından önemli bir doğrulama aracı olarak öne çıkmaktadır.

Ermann (2007) “Çift Eğimli Bozunma: Algılanabilirliği Ve Tercihi Belirlemek İçin Öznel Dinleme Testi” başlıklı çalışmada, hem deneyimli hem de deneyimsiz dinleyicilerin çift eğimli sönümlemeyi ne kadar algılayabildiklerini belirlemeyi amaçlamıştır. Çalışma kapsamında öncelikle, uygulaması gerçekleştirilmiş olan birleştirilmiş hacimli bir konser salonu simüle edilmiştir. Ardından simülasyon sonuçlarından elde edilen dürtü tepkileri baz alınarak, yankısız bir müzik kaydı değişime uğratılmıştır. Katılımcılara dinletilen müzik Sabine eğrisinden ne kadar farklılaşırsa, kaydın çift eğimli sönümleme olarak tanımlanmasının o kadar artmakta olduğu belirtilmiştir. Çalışma sonucunda katılımcıların kesin bir tercih belirtmeleri istendiğinde, çift eğimli sönümlemeye sahip bir kaydı seçme olasılıkları ile Sabine sönümlemesine sahip bir kaydı seçme olasılıklarının farklı olmadığı belirtilmiştir.

Bradley ve Wang (2010) “Hesaplamalı Analiz Ve Öznel Test Sonuçlarından Belirlenen Gerçekçi Birleştirilmiş Hacim Alanları İçin Optimum Emilim Ve Açıklık Parametreleri” başlıklı çalışmalarında; birleştirilmiş hacimli salonlarda oluşan çift eğimli sönümlemeyi incelemek için T30/T15, LDT/T10, bozunma oranı ve L gibi çeşitli oranlar kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, tüm açıklık boyutları için birleştirilmiş hacmin ses yutma katsayılarında artış oldukça çift eğimli sönümleme etkisinde azalma olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, belirli bir açıklık boyutu ve ses yutma katsayısı kullanıldığında, çift eğimli çürüme etkisinin en yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Bayes analiz yöntemine dayalı olarak hesaplanan bozunma oranı ile L ölçütlerine ait sonuçların birbiriyle örtüşmediği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, salondaki mimari değişkenlerin, dinleyiciler üzerindeki etkilerini belirleyebilmek için özel testler yapılmıştır. Bu testler sonucunda, dinleyicilerin çok güçlü çift eğimli sönümlemeye sahip olan hacimlerden hoşlanmadıkları, bunun aksine düşük ve orta seviyedeki çift eğimli çürüme etkisini beğendikleri görülmüştür.

Ning Xiang vd. (2011) “Birleştirilmiş Hacimli Sistemlerde Çok Eğimli Ses Enerjisi Bozunumlarının Bayesçi Karakterizasyonu” başlıklı çalışmaları kapsamında üç birleştirilmiş odadan oluşan bir ölçek modeli kullanılarak deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında iki farklı Bayesçi formülasyon karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, tam parametrelili Bayesçi modelin yalnızca tek ve çift eğimli bozunmaları değil, aynı zamanda daha karmaşık çok eğimli bozunmaları da başarıyla karakterize edebildiği belirlenmiştir. Bu modelin, bozunma parametrelerini yüksek hassasiyetle tahmin ederek

geleneksel yöntemlere kıyasla daha güvenilir sonuçlar sunduğu belirtilmiştir. Ayrıca, geometrik akustik simülasyonlar kullanılarak gerçekçi konser salonlarında da bu analiz yöntemi uygulanmış ve çok eğimli bozunmaların başarılı bir şekilde tespit edilebildiği görülmüştür. Öte yandan, geleneksel doğrusal eğim analizlerine dayalı yöntemler, çok eğimli bozunmaları tespit etmede yetersiz kaldığı belirtilmiştir.

Ning Xiang vd. (2013)'nin "Çift Odalarda Açıklık Boyutlarının Ve Alıcı Konumlarının Etkisinin Araştırılması" başlıklı çalışmaları kapsamında; açıklık, ve bağlantı açıklığına göre değiştirilen ses kaynağı ve alıcı konumlarında oluşan ses enerjisi dağılımları ve bozunmaları analiz edilmiştir. Çalışmada hem iki salona ait 1:8 akustik ölçek modelleri hem de difüzyon denklem modelleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda difüzyon denklem modellerinin, çift eğimli çürüme grafiklerine ait dönüm noktalarının tespit edilmesinde etkili olduğu belirlenmiştir.

Luizard vd. (2015) "Büyük Birleştirilmiş Hacimli Konser Salonlarında Yankılanmanın Algılanan Uygunluğu" başlıklı çalışmalarında; eğitilmiş dinleyicilerin, birleştirilmiş hacimli mekanlarda oluşan yankılanmayı farklı müzik eserleri açısından nasıl değerlendirdiklerini araştırmışlardır. Araştırma kapsamında yapılan dinleme testine 23 kişi katılmıştır. Dinleyiciler tarafından değerlendirilen sesler, Cremer-Müller'in üstel olmayan enerji azalmasının istatistiksel modeline dayalı dürtü tepkileri kullanılarak, solo çello, timpani, koro ve senfoni orkestrasının yankısız kayıtlarının düzenlenmesiyle oluşturulmuştur. Çalışmanın tek değişkeni birleştirilmiş hacimler arasındaki bağlantı yüzey alanı olarak belirlenmiştir. Elde edilen veriler sonucunda, basit üstel azalmanın senfoni orkestrası için, çift eğimli azalmaya sahip yankılanmaların ise solo enstrümanlar ve koro için daha uygun olduğu görülmüştür.

Jurkiewicz vd. (2015) "Stavanger Konser Salonu, Akustik Tasarım Ve Ölçüm Sonuçları" başlıklı çalışmada; tasarımcılar konser salonu tasarımını, Odeon ve CATT-Acoustic programlarını kullanarak oluşturmuşlardır. Ancak birleştirilmiş hacme ilişkin birleşim detayları yeterli bir doğruluk seviyesinde modellenememiştir. Bu yüzden tasarlanan farklı senaryolara ait 1/25 maketler üzerinden ölçümler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak farklı tasarımlara sahip salonlar arasından, yan balkonlu ve bu balkonlar arkasına yerleştirilen birleştirilmiş hacmin bulunduğu salon tasarımının akustik açıdan en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Bu çalışma sonunda salonların tasarımı ile ilgili 7 farklı çıkarımda bulunulmuştur. Bunlar;

1. Dinleyiciye kuşatılma hissi yaşatan bir yankılanmanın bulunması,

2. Güçlü yankılama ve iyi müzikal netliğin bir arada olmasının sağlanması,
3. Yankılamadaki çok belirgin yüksek frekanslı parlaklıkla ilişkili güçlü bas tepkisinin bulunması,
4. Dinleyicilerin sahneye olan akustik yakınlıklarını destekleyen fazla miktardaki erken yanal yansımaların oluşturulması,
5. Salonda sesin homojen bir şekilde dağılması,
6. Salon arkasına doğru G’de düşük azalma olması,
7. Sahnenin, sesi homojen bir şekilde iletmesi,

yukarıdaki kriterleri sağlayan salonların, her türlü etkinlik ve müzik türü için uyarlanabilir değişken akustik sağlayabilen bir salon tasarımına sahip olduğu varsayılmıştır.

Maiorino ve Bertoli (2016) “Çift Eğimli Sönüm Odaları: Koltuk Konumuna Göre Bağlantı Açıklığı Konumunun Yankılanma Üzerindeki Etkisi” başlıklı çalışmaları kapsamında; öncelikle birleştirilmiş hacimli bir konser salonu tasarlamışlar ve salonda farklı koltuk konumları belirlemişlerdir. Sonrasında ise yankı odasının bağlantı alanlarını değiştirerek reverberasyon süresinin değişimini sağlamışlar ve bu değişimleri incelenmişlerdir. Çalışmada 136 kapı ile 12 farklı bağlantı alanı tasarlanmıştır ve iki farklı senaryo oluşturularak farklı sonuçlar elde edilmiştir. İlk senaryoda, seyirciye yakın olan açıklıklar kademeli bir şekilde açılmıştır. İkinci senaryoda ise dinleyiciye uzak olan açıklıklar açılmıştır. Bu çalışma, bağlantı alanlarının konumlarındaki değişikliğin farklı koltuk konumlarında algılanan reverberasyon sürelerini fark edilebilir bir şekilde değişebileceğini göstermiştir. Çalışma T30 parametresi üzerinden yürütülmüştür.

Tijsma (2016)’nın, “Birleştirilmiş Hacimli Odalarda Düşük Frekanslı Oda Akustiği” başlıklı yüksek lisans tez çalışmasında; çift eğimli sönümlemenin frekanslara bağlı olarak nasıl değişim gösterdiği incelenmiş ve bu değişimin açıklık ve alıcı konumundaki değişimle olan ilişkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmanın sonunda; düşük frekanslı seslerin birleştirilmiş hacimli odalarda farklı şekilde sönümlendiği ve bu sürecin açıklık konumu, açıklık dağılımı ve alıcı konumu tarafından önemli ölçüde etkilendiği belirtilmiştir. Özellikle alıcı konumu, sönümleme eğrisi üzerinde belirleyici bir rol oynamıştır. Bunun yanı sıra, açıklık dağılımı ve konumu, birleştirilmiş hacimler arasındaki ses enerjisinin akışını doğrudan etkilemiş hatta bazı açıklık yerleşimlerinde ikinci odadan gelen gecikmeli ses enerjisi, sesin sönümlenme süresini oldukça artırmıştır. Çift eğimli sönümleme eğrisi bazı frekans aralığında belirgin hale gelse de, açıklık ve frekans arasındaki bağlantı sistematik olarak doğrulanamamıştır.

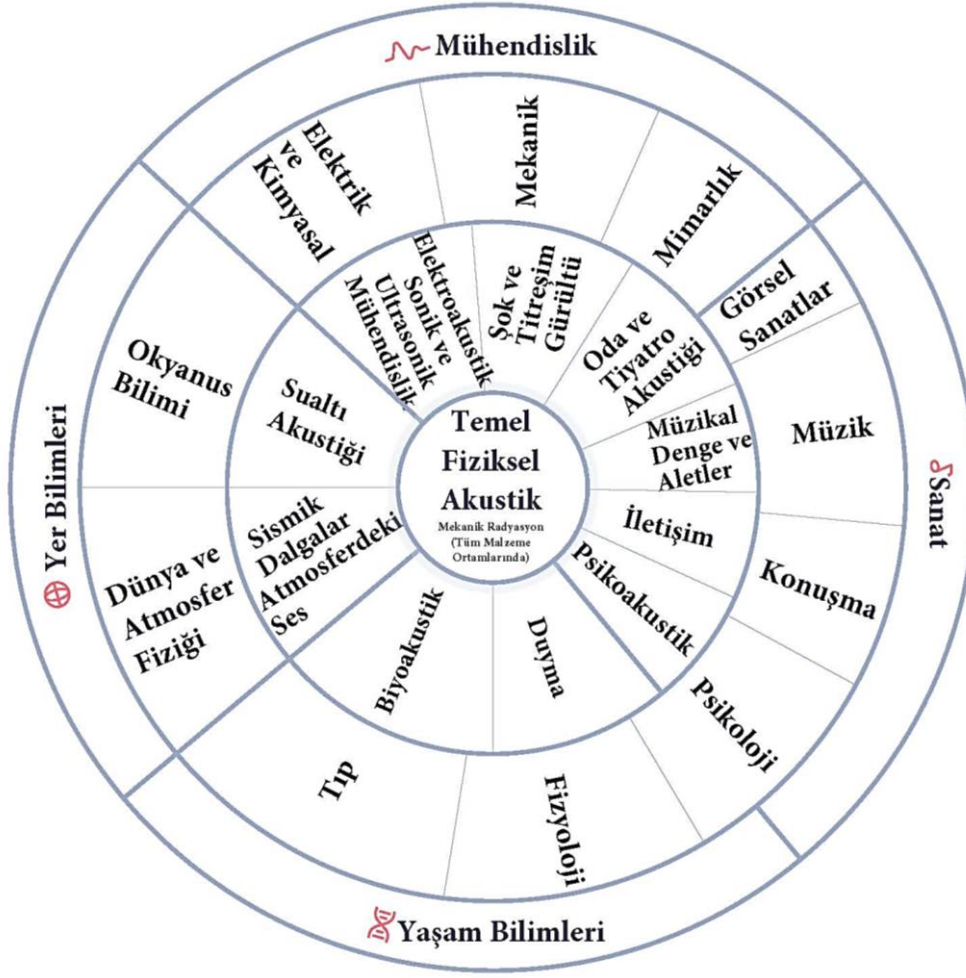
Aspöck ve Volaender (2019) “Geometrik Akustik Simülasyon Modellerine Dayalı Birleştirilmiş Oda Senaryosunun Simülasyonu” başlıklı çalışmalarında; geometrik akustiğe dayalı çeşitli simülasyon programlarının, çift eğimli çürüme eğrilerini ne ölçüde tahmin edebildiğini araştırmışlardır. Bir laboratuvar ve ona bağlı bir odada yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen veriler, simülasyon programlarından elde edilen 1000 Hz oktav bandındaki enerji bozunma eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda incelenen 6 farklı simülasyon programının hiçbirinin ölçülen çift eğimli sönümleme eğrisini doğru tahmin edemediği görülmüştür. Simülasyon programlarının doğru sonuçlar vermesinin, malzemelerin ses yutma katsayıları ile yakından ilişkili olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Cremer ve Müller modelinin, geometrik akustik simülasyon programlarından daha iyi tahminlerde bulunduğu ortaya konulmuştur. Çalışmada, geometrik akustik simülasyon programlarında, birleştirilmiş hacimli odaların ses yayılımının modellenenebilir olduğu fakat girdi parametrelerinin dikkatlice ayarlanması gerektiği belirtilmiştir.

Gül (2019) “Bağlaşık Ses Alanlarında Çoklu Sönümleme Eğrileri Analiz Yöntemleri” başlıklı çalışması kapsamında Bayes analiz yöntemi ve difüzyon denklem modelini kullanmıştır. Çalışma kapsamında Süleymaniye Camii ve Ayasofya Camii’nde (çalışma müze olduğu süreçte yapılmıştır) yapılan analizler; hacimsel düzenleme, açıklık boyutları ve yüzey malzemelerinin, mekan akustikini etkileyen en önemli kriterler olduğunu göstermiştir. Özellikle zemin kaplaması olarak kullanılan halının, mekandaki ses yayılımını doğrudan etkilediği ve bağlaşık ses alanlarının oluşumuna sebep olduğu belirtilmiştir.

Notation (2022) “Mekansal Parametrelere Dayalı Birleştirilmiş Mekanların Akustik Analizi” başlıklı yüksek lisans tezi kapsamında, genellikle tek hacimli mekanların analizinde kullanılan IADC’yi birleştirilmiş hacimli bir mekanda incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, yankılanma kuyruğundaki IADC’nin, birleştirilmiş hacimlerin akustikinde önemli ölçüde değişebileceğini göstermiştir.

1.3. Akustik Bilimi

Akustik, katı, sıvı ve gaz içinde oluşan mekanik dalgaları inceleyen, titreşim, ses ve infrason gibi konuları içeren bir fizik dalıdır. Yer bilimleri, mühendislik, sanat ve yaşam bilimlerinin alt disiplinleri (Şekil 1), ele aldıkları olgular, kullanılan aygıtlar, ölçülen fiziksel nicelikler ve kullanılan birimler açısından ortak noktalara sahiptir (Beranek L. , 1996; Wikipedia, 2024).



Şekil 1. Lindsay'in akustik çarkı (Lindsay, 1968)

Lindsay'in akustik çarkına göre mühendisliğin alt başlığı olan mimari akustik, oda akustiği ve gürültü denetimi olmak üzere iki ana başlıktan oluşmaktadır. Oda akustiği, bir mekandaki ses kaynağından çıkan sesin, o mekanda bulunan tüm kullanıcılara optimum koşullarda iletilmesini hedefleyen akustik dalıdır. Özellikle, konuşmanın ön planda olduğu kongre ve konferans salonları, hem konuşma hem de müzik etkinliklerinin bir arada gerçekleştirildiği tiyatro ve opera salonları, farklı müzik türlerinin ihtiyaçlarını tek mekanda karşılayabilen konser salonları ve müziğe ek olarak görsel etkinliğin ön planda olduğu sinema salonlarına ait özel akustik düzenlemeler, bu akustik dalının çalışma alanı kapsamındadır. Gürültü denetimi, bir yapının iç ya da dış ortamında meydana gelen seslerin, bina içindeki mekanlara iletim yollarını analiz edip, istenmeyen seslerin mekanlar arasında yayılmasını önlemenin yollarını araştıran akustik dalıdır (Lindsay, 1968; CE's Mimarlık, n.d.).

1.4. Sesin Fiziksel Özellikleri

Akustik biliminin öznesi olan ses, ortamda bulunan nesnelerin titreşimi sonucunda havada oluşan basınç dalgalanmalarına kulağın verdiği tepki olarak ifade edilmektedir. Dalgalar halinde yayılan ses, yayılmak için ortama ihtiyaç duymaktadır (Mehta, Johnson, & Rocafort, 1999)

Sesin Yayılma Hızı: Ses dalgalarının birim zamanda aldığı yol “sesin yayılma hızı (c)” olarak ifade edilmekte olup normal ortam koşulları altında havadaki hızı yaklaşık olarak 343 m/s’dir. Ortamın elastikliği, yoğunluğu ve sıcaklığı ortamdaki sesin hızını etkilemektedir (Tablo 1). Örneğin hava sıcaklığındaki yaklaşık 7 °C’lik artış ya da azalma, ses hızının %2 oranında değişimine sebep olmaktadır (Egan, 2007).

Tablo 1. Farklı ortamlarda sesin yayılma hızları (Aykol, 1986)

Ortam	Sesin yayılma hızı c (m/sn)
Hava	330-350
Su	1453
Çelik	5000
Kagir	3000
Ahşap	1000-4000
Kauçuk	50
Mantar	500

Ses hızı;

$$c=\lambda.f, \text{ m/sn} \quad (1)$$

formülü ile elde edilmektedir. Formülde;

c: sesin hızı (m/sn)

λ :dalga boyu (m)

f: frekans (Hz)’dir.

Sesin hızı, frekansına ya da yüksekliğine bağlı olmayıp, duyulabilir frekanslardaki bütün sesler, yükseklikleri ne olursa olsun aynı hıza sahiptirler (Mehta, Johnson, & Rocafort, 1999)

Frekans: Ses yayıldığı ortamda basınç farkları oluşturmakta, bu basınç farkları sesin ortam içinde dalgalar halinde yayılmasına neden olmaktadır (Brown, 2008). Frekans, bu dalgalanmanın ard arda periyodik bir şekilde tekrarlanması olup, 1 sn.'deki titreşim sayısı olarak ifade edilmektedir. “f” ile gösterilmektedir ve birimi Hertz'dir (Egan, 2007). Sesin havada yayılımı esnasında oluşan basınç dalgalanmaları 20 Hz - 20000 Hz aralığında gerçekleştiğinde, insan kulağı bu sesleri algılayabilmektedir (Brown, 2008).

Saf sesler hariç birçok ses kaynağı, birden fazla frekansta enerji üretmektedirler. Konuşma sesi ise 125 Hz ile 8000 Hz aralığındaki frekansları içermektedir. Bu nedenle akustik araştırmalar genellikle sekiz oktav bantda yapılmaktadır. Bunlar: 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz, 8000 Hz'dir. Daha detaylı incelemeler için 1/3 oktav bantlar kullanılmaktadır (Egan, 2007). Bir dinleyicinin işitsel algısı açısından, ses spektrumundaki frekansların en dengeli şekilde algılandığı ortalama değerin yaklaşık olarak 1 kHz olduğu ifade edilmektedir (Brown, 2008).

Sesin frekansının değişmesi, sesin kalınlık/incelik durumunun değişmesine sebep olmaktadır. Farklı seslerin ayırt edilebilmesinin en önemli faktörü frekanstır (Aykol, 1986).

Sesin frekans aralıklarına bağlı olarak kalınlık/incelik durumları;

16-100 Hz sesler çok kalın

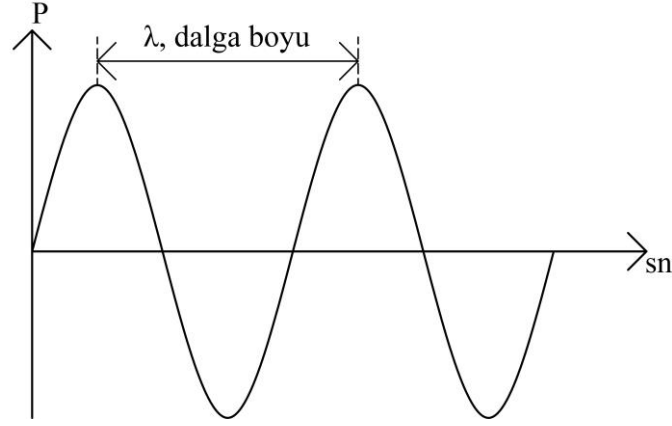
100-400 Hz sesler kalın

400-1600 Hz sesler orta kalın

1600-3150 Hz sesler ince

3150-16000 Hz sesler çok ince, olarak belirtilmektedir (Aykol, 1986).

Dalga Boyu: Ses dalgasının ardışık iki tepe ya da çukur noktası arasındaki uzaklık olarak tanımlanmakta olup λ sembolü ile gösterilmektedir (Mehta, Johnson, & Rocafort, 1999) (Şekil 2). Başka bir deyişle bir titreşim döngüsünde sesin yol aldığı mesafe olarak tanımlanmaktadır (Egan, 2007).



Şekil 2. Basınç-zaman grafiğinde dalga boyu

Dalga boyu, frekans ve hız ile ilişkili olup (Mehta, Johnson, & Rocafort, 1999);

$$\lambda = c/f, \text{ m} \quad (2)$$

formülü ile elde edilmektedir. Formülde;

λ :dalga boyu (m)

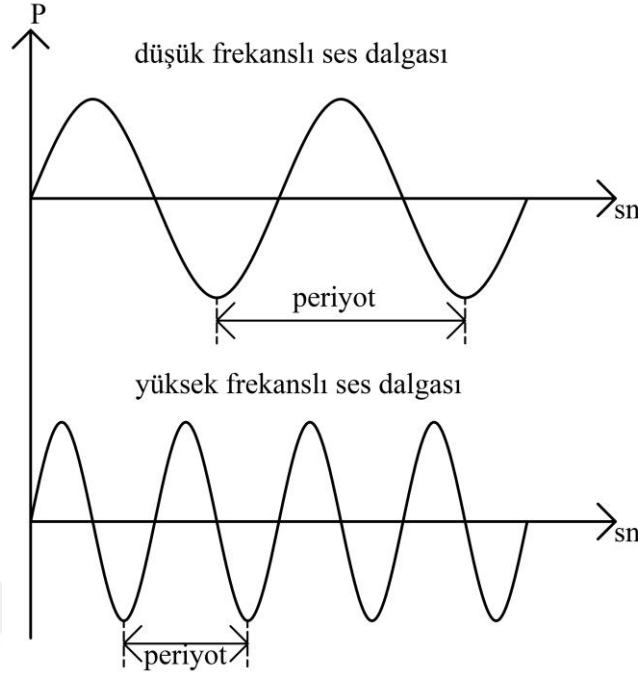
c: sesin hızı (m/sn)

f: frekans (Hz)'dir.

Periyot: Ses dalgalarında ardışık iki tepe veya iki çukur noktası arasındaki oluşuma döngü adı verilmektedir. Bu döngünün tamamlanması için geçen süre periyot olarak adlandırılmakta olup T harfi ile ifade edilmektedir (Şekil 3). Periyot ve frekans arasındaki ilişki (Egan, 2007);

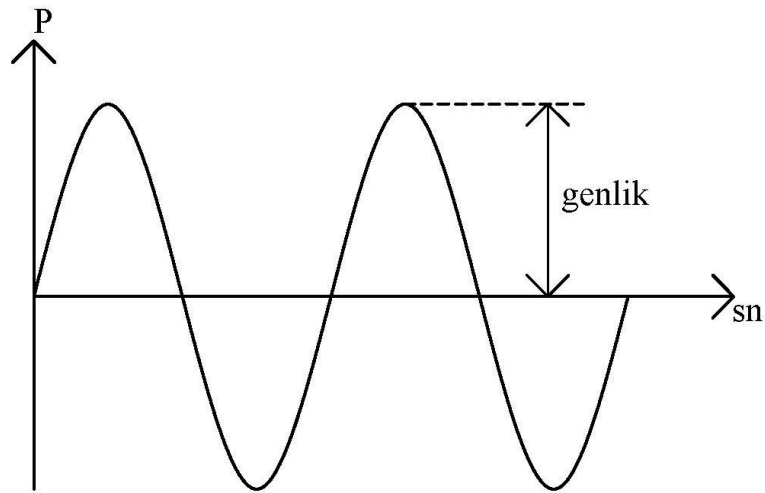
$$T = 1/f, \text{ sn} \quad (3)$$

formülü ile ifade edilmektedir.



Şekil 3. Farklı frekanslardaki seslerin periyotları

Genlik: Bir ses dalgasında, dalga'nın denge konumundan en yüksek ya da en düşük noktaya olan uzaklık “genlik” olarak adlandırılmaktadır(Şekil 4) (Fizik Dersi, n.d.). Genlik, sesin şiddetinin de göstergesi durumundadır. Sabit frekanslı bir titreşim hareketinde genliğin artması, ses titreşimini oluşturan kinetik enerjinin dolayısıyla ses şiddetinin artması anlamına gelmektedir (Aykol, 1986).



Şekil 4. Basınç-zaman grafiğinde genlik

Ses Basıncı: Ses dalgası, elastik bir ortamda boyuna bir basınç dalgalanması oluşturmaktadır (Long, 2006). Bu hareket esnasında, ortamın herhangi bir noktasındaki hava basıncının normal atmosfer basıncından farkı ses basıncı olarak adlandırılmakta olup birimi N/m^2 veya Pascal (Pa)'dır (Abdülrahimov, 2005). Havada oluşan basınç değişikliği sayesinde kulak sesi algılamakta ve duyma olayı gerçekleşmektedir (Yılmaz Demirkale, 2007).

Ses basıncı;

$$P=c^2 \cdot \rho, \text{ m/sn} \quad (4)$$

formülü ile elde edilmektedir (Abdülrahimov, 2005). Burada;

P: Ses basıncı, N/m^2

ρ : Ortamın yoğunluğu, kg/m^3

c: Sesin hızı, m/sn'dir

Sesin Şiddeti: Birim alana düşen ses gücü olarak tanımlanmaktadır. Sesin yüksekliğiyle ilişkili olup birimi W/m^2 dir (Mehta, Johnson, & Rocafort, 1999).

Bir noktasal kaynaktan yayılan sesin, d uzaklığındaki yoğunluğu; kaynağın ses gücünün, aynı uzaklıkta oluşan küresel alan büyüklüğüne bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Bu bağıntı (Egan, 2007);

$$I = \frac{W}{4\pi d^2} \quad (5)$$

formülü ile elde edilmektedir. Burada;

I = ses yoğunluğu W/m^2

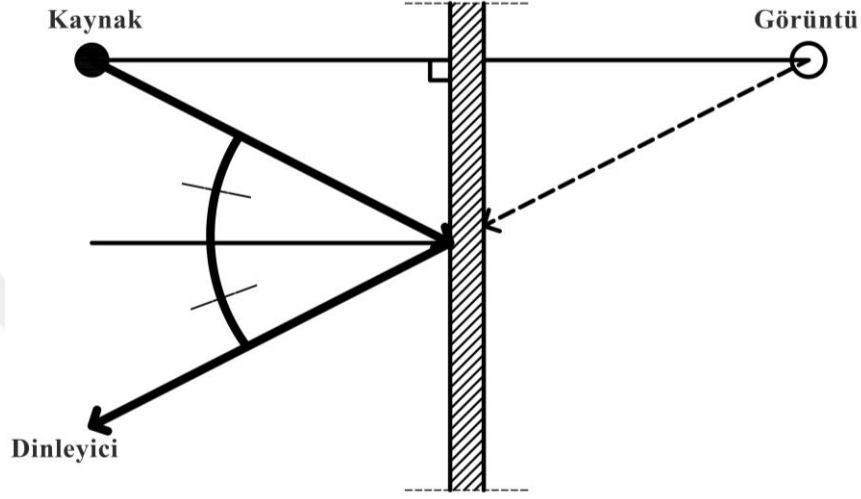
W = ses gücü (W)

d = ses kaynağından uzaklık (m)'dir (Egan, 2007).

1.5. Sesin Ortamdaki Davranışları

Ses dalgaları ortamın mimari özelliklerine ve fiziksel şartlarına bağlı olarak farklı davranışlar sergilemektedir (Cowan, 2000).

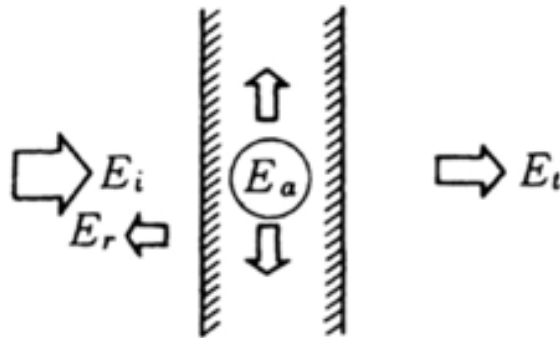
Yansıma: Ses dalgalarının düzgün bir yüzeye çarptığında yön değiştirerek geri dönmesine yansıma adı verilmektedir. Eğer yüzey boyutu, yüzeye çarpan ses dalgasının dalga boyundan daha büyükse, ses dalgası yüzeye geldiği açı ile yansımaktadır (Egan, 2007). Yani gelen ışın ve yansıyan ışın arasındaki açı, yüzey normali tarafından iki eşit parçaya bölünmektedir (Kuttruff H. , 2001) (Şekil 5).



Şekil 5. Ses dalgasının yansıması (Everest & Pohlmann, 2022)

Yutulma: Bir yüzeye çarpan ses dalgasının tamamı yansımamakta, bir kısmı yüzey tarafından yutulurken yüzeyden geçiş yapan bir kısmı da diğer ortama iletilmektedir (Şekil 6).

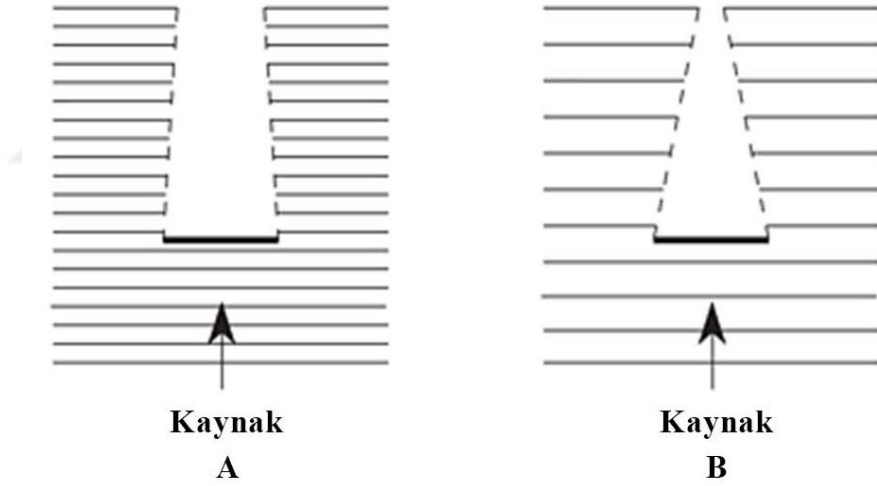
Bir yüzeye gelen ses enerjisinin yutulan kısmı, tüm enerjiye oranlanarak duvarın ses yutma katsayısı elde edilmektedir. Ses yutma katsayısı α sembolü ile gösterilmektedir (Kuttruff H. , 2001).



Şekil 6. Sesin yansıması, yutulması ve geçişi (Maekawa, Rindel, & Lord, 2011)

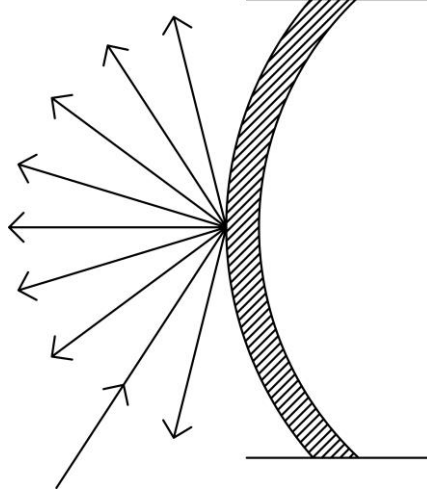
Kırınım: Kırınım parçalara ayrılmak anlamına gelmektedir (Everest & Pohlmann, 2022). Egan'ın (2007) tanımına göre kırınım, ses dalgasının karşılaştığı bir nesne etrafında bükülmesi ya da başka bir deyişle akmasıdır. Bu durum özellikle salonların yüzey tasarımında oldukça önemlidir çünkü dalga boylarından daha küçük tasarlanan yüzeylerde sesin kırınımına uğraması, yüzeylerin ses üzerindeki etkinliğini azaltmaktadır. Bu nedenle asılı paneller gibi farklı tasarım elemanları istenen dalga boylarını yansıtabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Eğer bu duruma dikkat edilmezse icra edilen müzikte ton bozulmaları meydana gelmektedir.

Ses dalgaları sabit bir engelle karşılaştığında Şekil 7'deki gibi farklı kırınım davranışları sergilemektedir. İlk örnekte yüksek frekanslı ses dalgası, engel ile karşılaştığında az bir kırınım yaparken, ikinci görselde düşük frekanslı ses dalgası daha fazla kırınım yapmaktadır. Burada engelin kenarları kaynak gibi davranarak, oluşan gölge bölgesine sesin yönlenmesini sağlamaktadır (Everest & Pohlmann, 2022).



Şekil 7. Farklı frekanslara sahip seslerin aynı engel karşısında davranışları

Saçılma: Bir ses dalgasının yüzeye ulaştıktan sonra rastgele bir şekilde dağılması olarak tanımlanmaktadır (Şekil 8). Özellikle sert yüzeyli malzemelerin yüzey profilleri, ses dalga boylarına yakın boyutlarda olduğunda meydana gelmektedir. Müzik performansları için çok önemli bir özellik olan saçılma yeterli düzeyde olduğunda, her yönden gelen ses dinleyiciler tarafından aynı seviyede algılanmaktadır (Egan, 2007).



Şekil 8. Sesin saçılması (Cowan, 2000)

1.6. Sesin Nesnel Parametreleri

Bir mekanda gerçekleştirilen her etkinlik için gereksinim duyulan sesin işitsel algısı, birbirinden farklı olmaktadır. Hem mekanın akustik açıdan durumunu bilimsel temellere dayandırarak ifade etmek, hem de mekanda bulunan dinleyicilere sesin en iyi şekilde ulaşmasını sağlamak için denetim ölçütü olarak kullanılan ölçülebilir değerlere sesin nesnel parametreleri denilmektedir (Beranek L. , 2004). Bu parametreler:

Reverberasyon süresi (RT, T60, T30, T15), erken düşme süresi (EDT), ayırt edilebilirlik (D50), netlik (C80), bas oranı (BR), tiz oranı (TR), toplam ses basınç düzeyi (SPL), hızlandırılmış ses iletim indeksi (RASTI), erken yanal enerji oranı (LF80), geç yanal enerji oranı (LG80), toplam ses düzeyi (G), merkez zamanıdır (Ts).

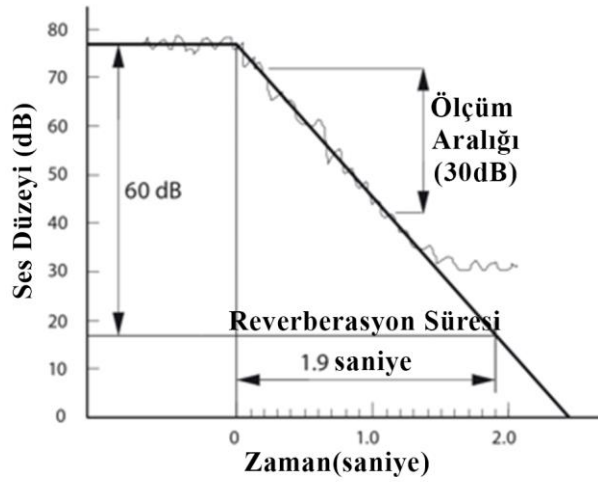
Bu çalışma kapsamında konser salonlarında gerçekleştirilen etkinlikler için değerlendirilmeye alınacak sesin nesnel parametreleri:

Reverberasyon süresi (T30), erken düşme süresi (EDT), Netlik (C80), ayırt edilebilirlik (D50), ses iletim indeksi (STI), erken yanal enerji oranı (LF80), bas oranı (BR) ve tiz oranı (TR)' dir.

1.6.1. Reverberasyon Süresi - Reverberation Time (T30)

Reverberasyon süresi, bilinen en eski akustik terimdir (Ahnert & Tennhardt, 2008). 1898 yılında Wallace Clement Sabine tarafından literatüre kazandırılmış olup; kapalı bir ortamda ses kaynağından çıkan ses düzeyinin alıcıya ulaştıktan sonra 60 dB azalınca kadar

geçen süre olarak ifade edilmektedir. Reverberasyon süresinin birimi saniyedir (Sabine, 1964; Beranek L., 2004) (Şekil 9). Ortamdaki dinleyicinin bu azalmayı algılama süresi, ortamın mimari ve fiziksel özelliklerinin yanı sıra kaynaktan çıkan ses ile odadaki gürültü seviyesine bağlı olarak değişmektedir (Ahnert & Tennhardt, 2008).



Şekil 9. Ses düzeyinde oluşan 60 dB'lik azalmanın zamanla ilişkisi (Barron, 2010)

Bir mekanın reverberasyon süresi, genellikle mekanın hacmine, yüzey alanlarına ve yüzeylerin ses yutuculuk katsayılarına bağlıdır (Ahnert & Tennhardt, 2008). Bu bağlamda reverberasyon süresi;

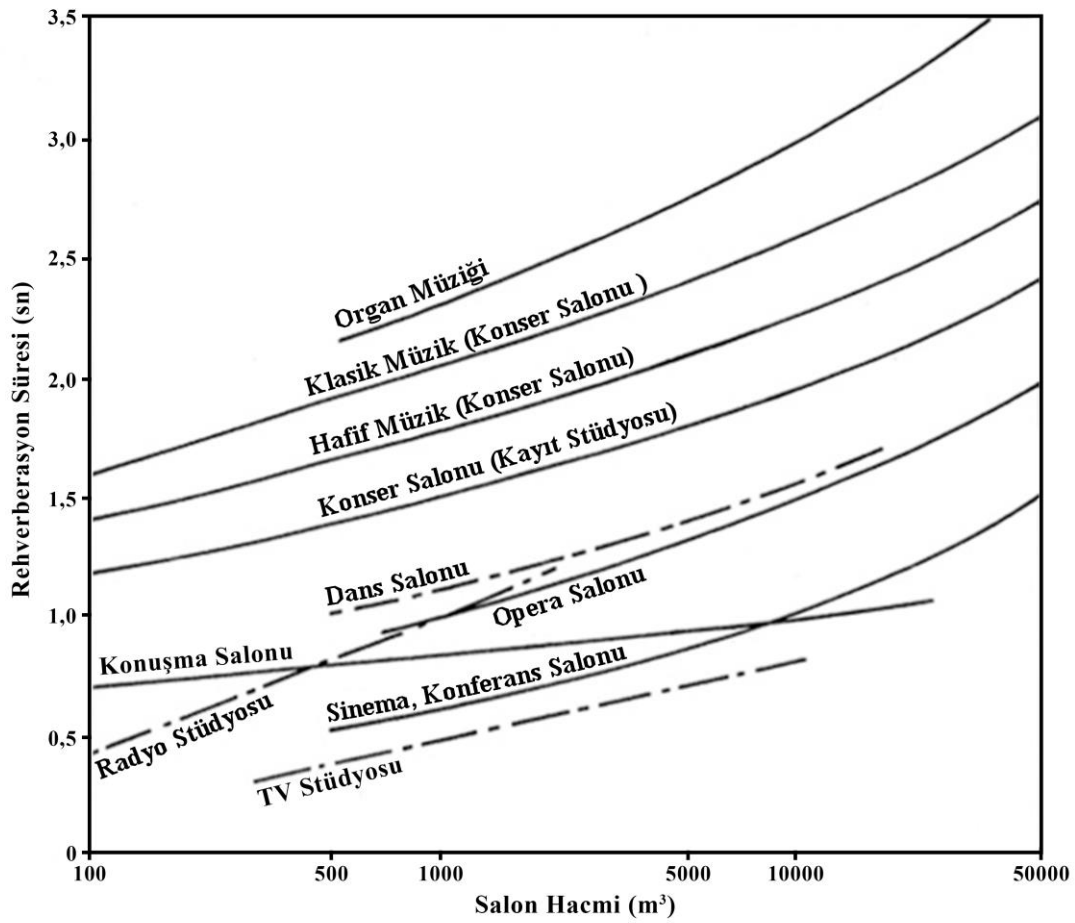
$$RT = 0.161 \frac{V}{A} \quad (6)$$

Sabine formülü ile elde edilmektedir. Burada;

V: Hacim, m³

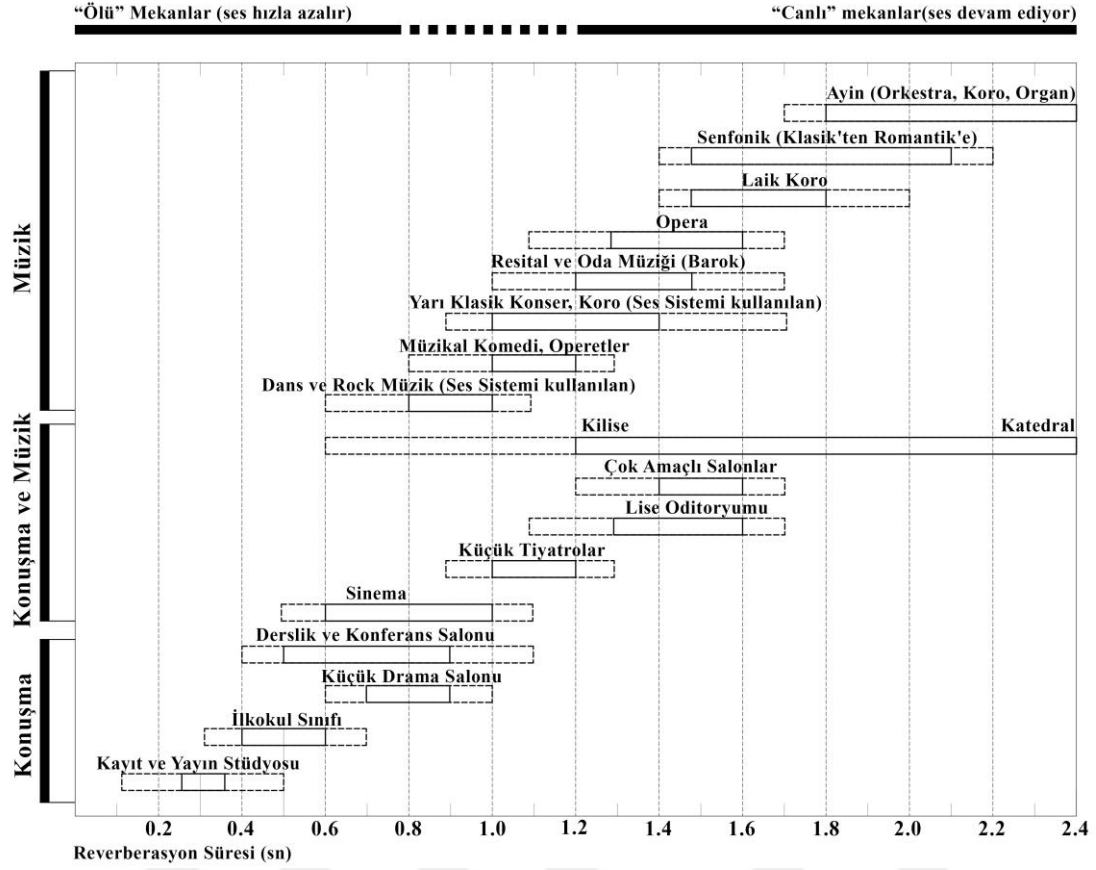
A: toplam yutuculuk, m²'dir (Long, 2006).

Farklı fonksiyonlu mekanlarda farklı reverberasyon sürelerine ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 10). Bu süre mekanda gerçekleştirilen performansın türüne ve mekanın hacmi toplam yutuculuk değerlerine bağlı olarak değişmektedir (Mehta, Johnson, & Rocafort, 1999).



Şekil 10. Farklı müzik türlerinin hacim-RT ilişkisi (Studio, n.d.)

Salonda gerçekleştirilecek etkinlik ve müzik türüne bağlı olarak ihtiyaç duyulan reverberasyon süresi, oldukça farklılık göstermektedir. Örneğin müzik için düşük frekanslarda daha uzun reverberasyon süreleri gerekirken, bunun aksine konuşma için düşük frekanslarda daha kısa süreler gerekmektedir (Şekil 11) (Everest & Pohlmann, 2022) Salonda oluşan reverberasyon, hem müzik tonlarının iyileştirilmesinde hem de müzikal kusurların maskelenmesinde etkili olmaktadır. Optimum düzeydeki reverberasyon süresi müziğin netliğini sağlarken, fazla uzun olan reverberasyon süresi müzikte bulanıklığa sebep olmaktadır (Mehta, Johnson, & Rocafort, 1999).



Şekil 11. Egan'a göre farklı faaliyetler için optimum reverberasyon süreleri (Egan, 2007)

1.6.2. Erken Düşme Süresi-Early Decay Time (EDT)

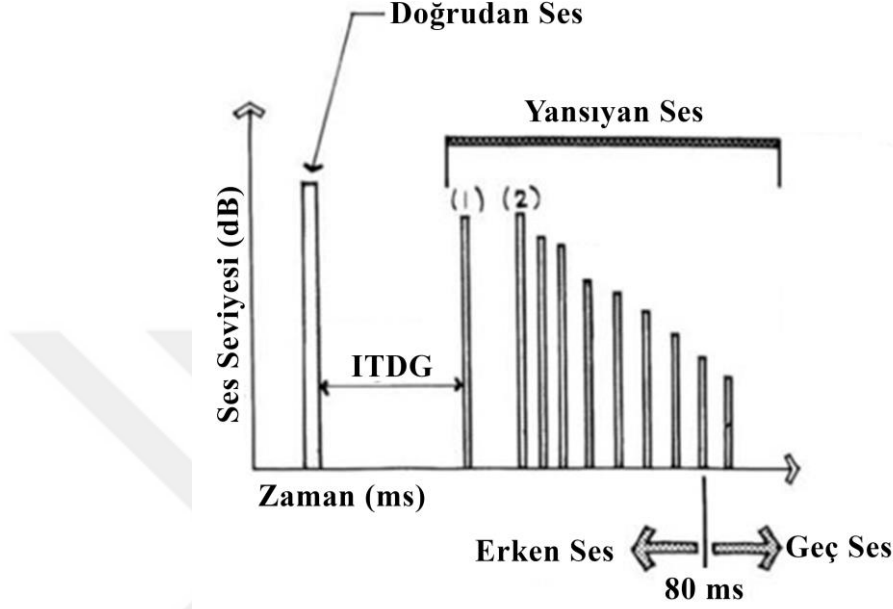
Ses kaynağından çıkan sesin, ilk 10 ms ile 20 ms arasında oluşan ses azalmasına erken düşme süresi (EDT) adı verilmektedir (Long, 2006). Hesaplanmasında ilk yansıyan seslerin önemli bir rol oynadığı erken düşme süresi, ses kaynağından çıkan sesin 10 dB azalması için gereken sürenin 6 ile çarpılmasıyla elde edilmektedir (Everest & Pohlmann, 2022). Erken düşme süresi, reverberasyon süresi ile ilişkilidir ve birimi saniyedir (Beranek L. , 2004). Bu ilişki;

$$EDT=6 \times (RT-10), \text{ sn.} \quad (7)$$

formülü ile ifade edilmektedir.

Alıcıya erken ulaşan sesler çoğunlukla birinci yansılardan oluşmaktadır ve doğrudan sesle bütünleşerek onu güçlendirmektedir (Şekil 12). Bu seslerin azalma süresi,

samimiyet, berraklık ve yanal genişlik yani mekanın ve sesin nasıl algılandığı ile yakından ilişkilidir. Erken yansımalarındaki enerji yoğunluğunun artışı berraklığın da artmasına neden olmaktadır (Everest & Pohlmann, 2022).



Şekil 12. Erken ve geç yansımalarla ilgili bir grafik (Egan, 2007)

Erken yansımalar hem konuşma hem de müzik için oldukça önemlidir. Bu yansımalar, salonda gerçekleştirilen konuşmanın anlaşılabilirliğini artırmaktadır. Bunun aksine dinleyiciye geç ulaşan yansımalar yankıya neden olmaktadır. Temelde, yansıyan her ses bir sonraki sesin spektral özelliklerini etkileyerek sinyalin zaman yapısında değişime neden olmaktadır. Bu durum müzik için istenen bir etki yaratırken, konuşmanın anlaşılabilirliğini olumsuz etkilemektedir (Kuttruff H. , 2017).

Reverberasyon süresi ile erken düşme süresi (EDT), birbiriyle ilişkili iki temel akustik parametredir. EDT, yüzeylerden yansıyan ilk ses bileşenlerine dayandığı için salonun geometrik tasarımında belirleyici bir rol oynamaktadır. Öte yandan, reverberasyon süresi tüm yansıyan ses bileşenlerini kapsadığından, hacmin biçiminden doğrudan etkilenmemektedir (Mehta, Johnson, & Rocafort, 1999).

Orta frekans bölgesinde optimum EDT değerlerinin sağlanabilmesi için, Mehta ve arkadaşları (1999), erken düşme süresinin (EDT) reverberasyon süresinin (RT) 1.1 katı olması gerektiğini belirtmiştir. Buna karşılık Gade (1989), EDT'nin RT'nin 1.1 katından yaklaşık 0.2 sn. daha kısa olması gerektiğini ifade etmiştir (Kurtulan, 2009).

$$EDT_{mid} = 1.1 RT_{mid} \quad RT_{mid} = \frac{(RT_{500} + RT_{1000})}{2} \quad (8)$$

formülü ile elde edilmektedir (Mehta, Johnson, & Rocafort, 1999)

$$EDT_{mid} = -0.2 + 1.1 RT_{mid} \quad (9)$$

formülü ile elde edilmektedir (Gade, 1989).

1.6.3. Ayırt Edilebilirlik- Distinctness (D50)

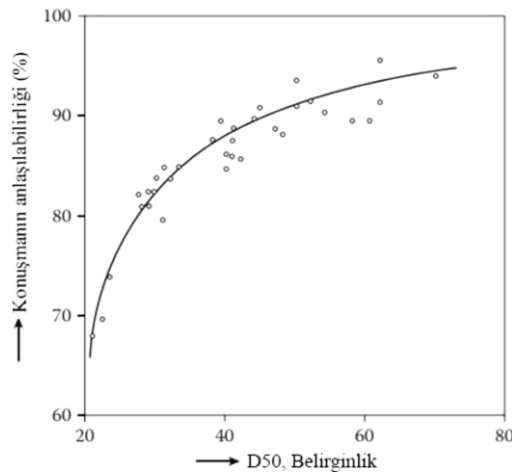
Thiele (1953), erken toplam ses enerjisi oranını anlaşılabilirlik ile ilişkilendirmeye yönelik en erken çalışmalardan birini yayınlamıştır. Ayırt edilebilirlik olarak tanımlanan bu parametre (D50); alıcıya doğrudan ulaşan sestten sonraki ilk 50 ms içinde yansıyarak ulaşan seslerin enerjilerinin toplamının, toplam ses enerjisine oranı olarak ifade edilmektedir (Bistafa & Bradley, 2000; Long, 2006) (Şekil 13). Bu parametre;

$$D50 = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (10)$$

formülü ile elde edilmektedir. Burada;

D50: Belirginlik (%)

p(t): Ses basıncı'dır.



Şekil 13. Konuşmanın anlaşılabilirliği ve D50 ilişkisi (Kuttruff H. , 2001; İlban, 2022)

1.6.4. Sesin Açıklığı Netliği - Clarity (C80)

Müziğin netliğini de ifade etmek için kullanılan C80 parametresi, alıcı konumuna ulaşan erken ses enerjisinin geç ses enerjisine oranının indeksi olarak ifade edilmektedir.

Konuşma anlaşılabilirliğinde olduğu gibi, güçlü erken yansımalar müzikte de netliği sağlamaktadır (Barron, 2010; Long, 2006). Genellikle tek hacimli salon tasarımlarında netlik ve reverberasyon birbiriyle ters orantılı olup reverberasyon arttığında netlik azalmaktadır. Ancak bazı salon tasarımlarında bu ilişki değişebilmektedir (Beranek L. , 2004).

Ahnert ve Tennhardt (2008), 1000 Hz oktav merkez frekansı için C80 parametresinin, özellikle mekanda icra edilen müzikal performansların zamansal şeffaflığını tanımlamak için önemli bir gösterge olduğunu vurgulamışlardır. Netlik parametresi; dolaysız sesin alıcıya ulaşmasından sonraki ilk 80 ms içinde alıcıya ulaşan ses enerjisinin, 80 ms'den sonra ulaşan ses enerjisine oranının 10 tabanındaki logaritmik değerini ifade etmekte olup parametrenin birimi desibel (dB)'dir (Ahnert & Tennhardt, 2008) (Beranek L. , 2004). Bu parametre;

$$C80 = 10 \log \left(\frac{\int_0^{0.08} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad (11)$$

formülü ile elde edilmektedir. Burada;

p: Ses basıncı

C80: Netlik (dB)'dir.

1.6.5. Erken Yanal Yansıma - Lateral Energy Fraction (LF80)

Marshall ve Barron 1981 yılında, salondaki dinleyicilerin hacim tarafından kuşatılmışlık etkisini matematiksel olarak açıklayabildiğini ileri sürmüşlerdir. Çalışmalarında, hacmin sadece ferah bir mekan hissi yaratmakla kalmayıp, aynı zamanda dinleyicilerin mekansal algısını da şekillendirdiğini ortaya koymuşlardır (Barron & Marshall, 1981).

Erken yanal yansıma oranı, doğrudan ses alıcıya ulaştıktan sonra ilk 80 ms boyunca yan yüzeylerden yansıyarak alıcıya ulaşan ses enerjisinin, toplam yansıyan yanal ses enerjisine oranı olarak değerlendirilmektedir (Ahnert & Tennhardt, 2008). Bu parametre;

$$LF_{80} = \frac{\int_{0.05}^{0.08} p^2(t) \cos^2 \theta dt}{\int_0^{0.08} p^2(t) dt} \quad (12)$$

formülü ile elde edilmektedir. Burada;

LEF: Yanal Enerji Oranı

$\cos \theta$: Dinleyicinin kulak aksı ile gelen ses enerjisi arasındaki açıyı tanımlayan açı

1.6.6. Ses İletim İndeksi - Speech Transmission Index (STI)

Ses iletim indeksi, bir kaynaktan çıkan sesin, dinleyiciye iletilişindeki anlaşılabilirliğini ifade eden bir ölçüttür. Bu parametre sesin ortamda nasıl iletilişini ve konuşmanın ne kadar anlaşılır olduğunu belirtmektedir. STI değeri 0 ile 1 arasında değişmekte olup, STI'nın 1 olması mükemmel anlaşılabilirlik olduğu anlamına gelirken; 0 olması konuşmanın hiç anlaşılmadığı anlamına gelmektedir (IEC-60268-16-2011, 2004). Bu parametre, Houtgast ve Steeneken tarafından 1980 yılında geliştirilmiştir. Belirli bir test sinyalinin analiziyle elde edilen verilere göre; sesin anlaşılabilirliği yalnızca yankı ve arka plan gürültüsünden değil, aynı zamanda kaynak ile alıcı arasındaki tüm sinyal bileşenlerinden de etkilenmektedir. (Steeneken & Houtgast, 2014)(Tablo 2).

EN ISO 9921 (2004) standardına göre, Ses iletim indeksi (STI) değerleri, hece anlaşılabilirliğinin öznel değerlendirme sonuçlarıyla karşılaştırılması sonucu belirlenmiştir. Bu karşılaştırmada, mümkün olan en yüksek hece anlaşılabilirlik oranı %96 olarak kabul edilmiştir.

Tablo 2. STI değerleri

Öznel Anlaşılabilirlik	STI Değeri
Yetersiz	0.00-0.30
Zayıf	0.30-0.45
Orta	0.45-0.60
İyi	0.60-0.75
Mükemmel	0.75-1.00

1.6.7. Ses Basıncı Düzeyi - Sound Pressure Level (SPL)

Ses basınç düzeyi, ses basıncının referans ses basıncına oranının 10 tabanında logaritmasının 20 katı olarak hesaplanmaktadır. Bu parametrenin birimi desibel (dB) olup, genellikle SPL kısaltmasıyla ifade edilmektedir. Ses basıncını ölçmek için kullanılan mikrofonlar, tıpkı kulakta olduğu gibi sesin havada oluşturduğu basınç dalgalanmasını algılamaktadır. Bu mikrofonlar, ses basınç düzeyinin ölçülmesini oldukça kolaylaştırmıştır (Mehta, Johnson, & Rocafort, 1999; Beranek L. , 1996). Bu parametre;

$$SPL = 20 \log \frac{p}{p_{ref}} \text{ dB} \quad (13)$$

formülü ile elde edilmektedir. Burada;

p: Oluşan ses basınç değeri

p_{ref}: Referans basınç değeri (insan kulağının duyabildiği en düşük ses basıncı)

1.6.8. Bas Oranı - Bass Ratio (BR)

Bas oranı, 125 Hz ve 250 Hz oktav merkez frekanslarındaki reverberasyon sürelerinin, 500 Hz ve 1000 Hz oktav merkez frekanslarındaki reverberasyon sürelerine oranı olarak tanımlanır (Ahnert & Tennhardt, 2008). Bu oran, aşağıdaki matematiksel ilişki;

$$BR = \frac{RT_{125Hz} + RT_{250Hz}}{RT_{500Hz} + RT_{1000Hz}} \quad (14)$$

ile elde edilmektedir (Mehta, Johnson, & Rocafort, 1999).

1.6.9. Tiz Oranı – Treble Ratio (TR)

Tiz oranı, 2000 Hz ve 4000 Hz'deki EDT değerlerinin iki katının, orta frekans bölgesindeki ortalama EDT değerlerine oranlanması yoluyla belirlenmektedir (Mehta, Johnson, & Rocafort, 1999).

$$TR = \frac{2 \times EDT_{2000Hz}}{EDT_{500Hz} + EDT_{1000Hz}} \quad TR = \frac{2 \times EDT_{4000Hz}}{EDT_{500Hz} + EDT_{1000Hz}} \quad (15)$$

ile elde edilmektedir (Mehta, Johnson, & Rocafort, 1999).

1.7. Konser Salonlarının Mimari Tasarımı

Konser salonları, müzisyenler ile dinleyicilerin bir araya geldiği ve müziğe özel olarak tasarlanmış mekanlardır (Long, 2006). Bu doğrultuda, akustik uzmanları ve mimarlar, tasarım sürecinde iş birliği yaparak salonun akustik performansını en üst seviyeye çıkarmayı hedeflemektedir.

Konser salonlarında sahne, parter ve balkon seyirci alanları gibi mimari unsurlar, yalnızca görsel ve işlevsel açıdan değil, aynı zamanda müzisyenler ve dinleyiciler için optimum akustik konforu sağlamak açısından da titizlikle tasarlanmaktadır (Everest & Pohlmann, 2022).

Long (2006)'a göre canlı müzik icra edilen salonların ideal ortamı sağlayabilmesi için dikkat edilmesi gereken başlıca unsurlar yer almaktadır. Bunlar:

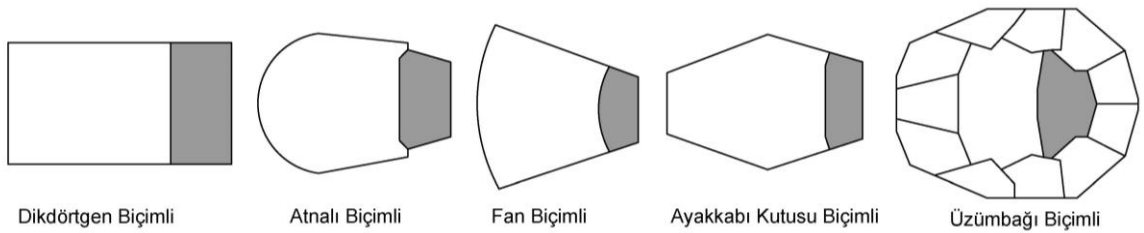
1. Dinleyici, güçlü erken yansımalar sayesinde etrafı ses ile kuşatılmış gibi hissetmelidir.
2. Salonda icra edilen müziğin türüne bağlı olarak gerekli olan reverberasyon süresi sağlanmalıdır.
3. Bazı müzik türlerinde netlik sağlamak için kaynak ve alıcıya yakın destekliyi yüzeyler konumlandırılmalıdır.
4. Ses yüksekliği, tüm salonda eşit olacak şekilde tasarlanmalıdır (Koltuk sayısı arttıkça ses yüksekliği azalmaktadır).
5. Müzik aletleri 30 Hz - 12.000 Hz arasında ses üretebilmektedir. Bu nedenle salon bu bant aralığını karşılayabilecek şekilde olmalıdır.
6. Arka plan gürültüsü büyük konser salonlarında NC15'i, küçük konser salonlarında NC20'yi geçmemelidir.
7. Mekan yankılanma açısından pürüzsüz bir sonlanma sağlamalıdır.
8. Müzisyenler hem diğer müzisyenleri net duymalıdır, hem de icra ettikleri müziği, dinleyicinin duyduğuna yakın bir yankılama ile almalıdır.

1.7.1. Salonların Biçim, Hacim ve Tavan Tasarımları

Konser salonlarının boyutları için en önemli sınırlayıcılar, dinleyici kapasitesi ve salonun fiziksel ölçüleridir. Salonların başarılı akustik tasarım süreçleri, boyutlarının ve dinleyici kapasitelerinin artışı ile zorlaşmaktadır. Tek hacimli salonlarda istenen reverberasyon süresi sağlanabilse bile, netlik ve samimiyet parametrelerinde optimum

koşulların sağlanabilmesi güçleşmektedir. Bu bağlamda, tüm dinleyicilere yeterli düzeyde erken yansıma ulaştırılması, akustik performans açısından kritik bir durum haline gelmektedir. Ancak büyük hacimli salonlarda, yansıtıcı yüzeylerin (tavan ve duvar gibi) dinleyici konumlarından uzaklaşması nedeniyle, erken yansımaların gücü azalmaktadır. Bu nedenle, salon geometrisinin ve dinleyici yerleşiminin tasarımı, yansıtıcı yüzeylerle dinleyiciler arasındaki mesafenin azaltılması yönünde ele alınmalıdır. Böylece yansıma gecikmeleri daha uzun bir sürede gerçekleşirken, erken yansımalar dinleyiciye doğrudan ve etkili bir şekilde iletilmektedir (Barron M. , 2010).

Konser salonlarının tasarımında kullanılan başlıca plan tipleri Şekil 14'te yer almaktadır. Akustik konfor açısından en iyi sonuçlar, dikdörtgen ve ayakkabı kutusu plan tipleri ile elde edilmektedir. Dikdörtgen planlı salonlar, salon şeklinin doğal yapısı sayesinde yanal yüzeylerden erken yansıyan sesleri güçlü bir şekilde seyirciye iletebilmektedir. Seyirci yerleşiminin sahne etrafında kurgulandığı salonlar ise, tasarım ve görsel açıdan mimarlar tarafından tercih edilmektedir. Ancak bu salonlarda, dikdörtgen salonlara göre akustik açıdan daha tutarsız sonuçlar elde edilmektedir (Long, 2006). Klasik Yunan tiyatrolarından esinlenilerek tasarlanan ve günümüzde kullanılan yelpaze formu salonların arka duvarları içbükey olarak tasarlanmaktadır. Bu da duvardan yansıyan seslerin bir noktada odaklanmasına sebep olabilmektedir (Öziş & Vergili, 2010). Konser salonlarında seyirci alanında istenmeyen bu ses odaklanmalarını engellemek için, silindirik kemerler, kubbeler ve içbükey yüzeylerden kaçınılması gerekmektedir. Salonun arka duvarı kesintisiz bir yay çizecek şekilde içbükey, yan duvarlar ise paralel olmamalıdır. Bu durum yan duvarlarda açı değişikliği, bölünme ya da eğme gibi uygulamalarla giderilebilmektedir. Bu uygulamalar, sesi etkili bir şekilde seyirci alanına iletmek için oldukça önem taşımaktadır. Eğer salonda iç bükey yüzeyler ve istenmeyen açılar kaçılmaz olarak oluşursa, bu yüzeyler ses yutucu malzemelerle kaplanmalıdır (Everest & Pohlmann, 2022).



Şekil 14. Konser salonlarında karşılaşılan en yaygın plan tipleri (Long, 2006)

Konser salonlarında ses, en çok seyirciler tarafından emilmektedir. Ancak kişi başına düşen alan üzerinde çok büyük değişiklikler yapılamadığı için, koltuk başına düşen hacim gerekli olan reverberasyon süresinin hesaplanmasında önemli bir kriter haline gelmektedir. Örneğin, konuşma amaçlı kullanılan salonlarda koltuk başına 5-7 m³'lük hacim, yaklaşık olarak 1 sn.'lik bir reverberasyon süresine sebep olurken, 2 sn.'lik bir reverberasyon süresi için koltuk başına düşen hacmin en az 10 m³ olması gerekmektedir. 1500 kişilik kapasiteden az salonlarda senfonik konserler verilmesi planlanıyorsa, salon hacmi büyük olarak tasarlanmaktadır. Uygulaması gerçekleştirilmiş bir konser salonunun yüzey malzemelerinde değişiklik yapılarak yutuculuk oranı dolayısıyla reverberasyon süresi değiştirilebilir fakat sonradan hacim değişikliği ile reverberasyon süresinin değiştirilmesi oldukça güçtür. Genellikle daha büyük kapasitelere sahip salonlarda hacmin sabitlenmesinin temel sebebi uygun güç (G) değerinin korunabilmesini sağlamaktır (Gade, 2014)

Seyirci alanının sabit kaldığı durumlarda, iç hacmi etkileyen en belirleyici unsur tavan yüksekliğidir ve bu yüksekliği belirleyen temel kriter ise salonun kullanım amacıdır. Örneğin, kısa reverberasyon sürelerinin yeterli olduğu derslik gibi konuşma ağırlıklı mekanlarda, alçak ve sesi doğrudan yansıtan düz tavanlar tercih edilmektedir. Buna karşılık, uzun reverberasyon süresinin istendiği konser salonlarında ise daha yüksek ve ses yansıtıcılığı yüksek olan kavisli ya da eğimli tavan tasarımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında, ses dağıtıcı tavanlar kullanılarak dinleyiciye gelen yanal seslerin daha güçlü duyulması sağlanmaktadır ve salon dinleyici için zengin bir akustik deneyim sunmaktadır. Salon yüzeylerinin yansıtıcı olduğu durumlarda, 2 sn.'lik bir reverberasyon süresi için yaklaşık olarak 15 m'lik bir tavan yüksekliği gerekirken, 1 sn. sürecek bir reverberasyon süresi için 5-6 m'lik bir tavan yüksekliği yeterli olmaktadır. Buna karşın salon şekli, zemin eğimi, balkon tasarımı, yüzeylerin ses yutma katsayıları gibi değişkenler, reverberasyon süresinde önemli ölçüde değişime sebep olmaktadır (Gade, 2014; Egan, 2007). Gereğinden yüksek bir tavan, oda hacmini artırmakla birlikte içerideki akustik koşulları bozacak kadar çok geç yansıyan seslere sebep olmaktadır. Ayrıca konser salonlarında, tavan biçimsel olarak zemine paralel olacak şekilde değil, kaynaktan çıkan sesi salonun arkasına, ya da salonun her yerine yönlendirecek şekilde tasarlanmalıdır. Tavan, farklı boyut ve açılardaki parçalara bölündüğünde sesi farklı bölgelere iletebilmektedir. Bazı konser salonlarının tasarımında, tavan birbirinden bağımsız olarak yükseltilip alçaltılabilecek şekilde tasarlanmaktadır. Bu da salonun değişken bir akustiğe sahip olmasını sağlamaktadır (Everest & Pohlmann, 2022).

Tavanın biçimsel tasarımı, özellikle salonun arka tarafında oturan dinleyiciler için oldukça önemlidir. İç bükey ve tek parçadan oluşan tavan, sesin arkadaki dinleyicilere ulaşmasında oldukça yetersiz kalmaktadır. Ayrıca iç bükey form, sesin bir noktada odaklanmasına sebep olmaktadır (Şekil 15-a). Bunun aksine dış bükey ve parçalı bir tavan tasarımıyla bu sorun çözülmektedir. Eğer salon tavanı içbükey olarak tasarlanırsa, eğrilik yarıçapı tavan yüksekliğinin en az iki katı olmalıdır. Tavan ile arka duvarın birleştiği noktada yankı oluşmaması için eğimli bir duvar tasarlanmaktadır. Konser salonlarında oluşan bölgesel akustik problemlerin çözülebilmesi için, salon kesitinin Şekil 15-b'deki gibi olması gerekmektedir (Maekawa, Rindel, & Lord, 2011).



Şekil 15. Konser salonlarında; (a) kötü ve (b) iyi tavan uygulamaları

Bu tasarımlar, mekanın kullanım amacına uygun bir akustik ortam elde edilmesinde kritik rol oynamaktadır (Egan, 2007)

1.7.2. Salonların Sahne Tasarımları

Salonların sahne tasarımları yapılırken en önemli ölçüt, müzisyenlerin birbirini anlaşılır bir şekilde duyabilmesini sağlayacak alana sahip olmalarıdır. Müzisyenler için sahnede ayrılan alan, akustik konfor ve kaliteyle doğrudan ilişkilidir (Long, 2006)

Beranek (1962)'e göre, sahne üzerinde her bir müzisyen için ortalama $1,9 \text{ m}^2$ alan ayrılması gerekmektedir. Bu bağlamda, 100 kişiden oluşan bir orkestra için sahnede en az 190 m^2 alana ihtiyaç duyulduğu sonucuna varılmaktadır. Barron (2010) ise, her enstrüman için farklı büyüklükte alanlar önermektedir. Barron (2010);

Çello ve daha büyük boyutlu üflemeli çalgılar için 1.5 m^2 ,

Telli ve üflemeli çalgılar için 1.25 m^2 ,

Kontrbas için 1.8 m^2 ,

Timpani ve diğer vurmali çalgılar için sırasıyla 10 ve 20 m^2 alan önermektedir.

Sahnenin, derinliği en fazla 11-12 m, genişliği ise 17 m olacak şekilde tasarlanması önerilmektedir. Sahne derinliğinin az olması, arka duvardan yansıyan seslerin etkili bir şekilde dinleyiciye ulaşmasını sağlamaktadır. Orkestrada bulunan müzisyenler birbirine ve orkestra kabuğuna yakın konumlandırılarak şef etrafında yarım daire şeklinde oluşturulan kademeli yükseltilmiş alanlara yerleştirilmektedirler. Yükseltelerin kullanılması, arkadaki enstrümanlara ait seslerin bir engelle karşılaşmadan doğrudan iletilmesine ve şef ile görsel temasın sağlanmasına yardımcı olmaktadır (Long, 2006).

Sahne yüksekliğinin tiyatro salonlarında 1.1 m olması gerekirken, müzikal etkinliklerin gerçekleştirildiği salonlarda daha yüksek tasarlanabilmektedir. Bunun nedeni, tiyatro salonlarının aksine konser salonlarında görsel temasın daha az önem taşımasıdır (Long, 2006).

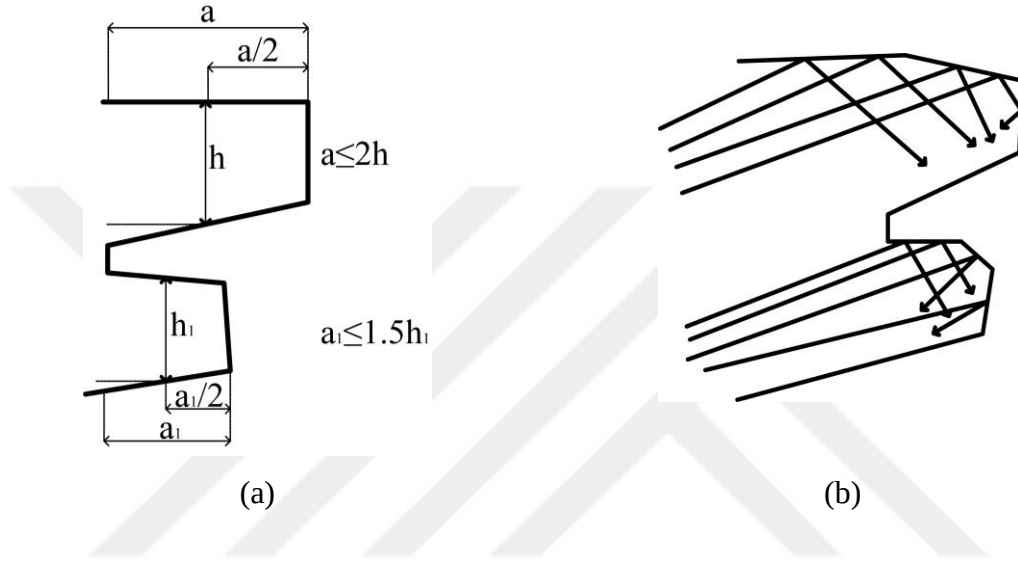
1.7.3. Dinleyici Yerleşim Alan Tasarımları

Dinleyiciler, salonun en emici yüzeyini oluşturmaktadır. Tüm koşullarda salonda akustik konforun sağlanması için, koltuklarda kullanılan malzemeler dinleyicinin ses yutma katsayısına yakın olacak şekilde seçilmektedir. Dinleyici alanının genel emilimi, koltuk sayısı ile değil kapladığı toplam alanla ilişkilidir (Beranek L. , 1996). Bu alanın ses yutulmasını azaltmak için büyük salonlarda zemin eğimli tasarlanmaktadır. Eğimli zemin kullanımı, kaynaktan çıkan sesin dinleyicilere doğrudan iletilmesini sağlamaktadır. Buna ek olarak, eğimli zemin sayesinde ses dalgaları daha dik açılarla yansıyarak dinleyiciler tarafından daha az emilmektedir. Hem konuşma hem de müzik için tasarlanan büyük salonlarda seyirci alanının eğimli bir şekilde tasarlanmasının diğer sebepleri ise dinleyicilerin sahne ile olan görsel bağlantılarının etkili şekilde kurulması ve kaynaktan çıkan doğrudan sesin dinleyicilere bir engelle karşılaşmadan iletilmesidir. Bazı salonların tasarımında zemin eğimi sabit tutulmaktadır. Ancak, bazı salonlarda zemin eğimi sahneden uzaklaştıkça artmaktadır ve basamak yükseklikleri birbirinden farklı tasarlanmaktadır. Bunlardan farklı olarak bazı salonlarda ise, parter bölümünün ön taraflarında eğim sabit tutulurken, arka taraflara gidildikçe eğim artış göstermektedir (Everest & Pohlmann, 2022).

Maekawa ve diğ. (2011)'nin salonlar için önerdiği eğim Şekil 16'da yer almaktadır. Burada; γ açısı, ses kaynağından ilk dinleyiciye ulaşan doğrudan sesin yükselme açısıdır. γ açısı parter boyunca sabit tutulmaktadır. Böylece, P_0 'dan başlayıp, d_n mesafedeki P_n alacasına kadar uzanan bir eğri oluşmaktadır ve buna logaritmik spiral adı verilmektedir.

derinliğinin, aynı bölgenin yüksekliğinin 1.5 katını aşmaması gerektiği vurgulanmaktadır. Derinlik yüksekliğe oranla azaldığında, burada oturan dinleyicilerin sesleri daha kaliteli algılayabildiği belirtilmiştir (Everest & Pohlmann, 2022)(Şekil 17).

Ayrıca, görüş açısının kesintisiz olması ve yeterli balkon açıklığının sağlanabilmesi amacıyla oturma alanlarında koltuk eğimi arttırılabilmektedir. Ancak güvenlik gerekçeleriyle bu eğimin %35 ile sınırlandırılması önerilmektedir (Gade, 2014).



Şekil 17. Balkon ve balkon altı bölümlerinin uygun boyut ve formu (Abdülrahimov, 2005)

1.7.5. Yüzey Malzemeleri

Mimari akustik alanında yapılan çalışmalar, dinleyici açısından akustik konforun sağlandığı mekanların oluşturulmasına yönelik sesin yönlendirilmesi ve uygun malzeme seçimini kapsamaktadır. Bu bağlamda kullanılan akustik malzeme türleri; ses yutucu, ses yansıtıcı, ses dağıtıcı ve ses yalıtım malzemeleri olarak sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmalar, bir mekanın akustik tasarımının şekillendirilmesinde belirleyici rol oynamaktadır. Akustik yapı malzemeleri, özellikle müzikal etkinliklerin gerçekleştirildiği alanların planlanmasında ve dinleyici açısından optimum akustik konfor koşullarının sağlanmasında kullanılan, belirli standartlara sahip malzeme tipleridir. Malzeme seçimi yapılırken dikkate alınması gereken temel parametreler; malzemenin uygulanacağı yüzeyin türü, mekanın işlevi, uygulama yüzey alanının büyüklüğü (m^2) ve düzenlemenin hedeflendiği frekans aralığıdır. (Bilmez & Arpacıoğlu, 2022) Bu nedenle, konser salonlarında uygulanması gereken bazı temel tasarım ilkeleri bulunmaktadır.

Konser salonlarının duvar ve tavan yüzeylerinde yaygın olarak yansıtıcı malzeme olan sıva kullanılmaktadır (Beranek L. , 1996). Yüzeyde kullanılan sıva ve duvar kalınlığı ne kadar sert olursa düşük frekansların yansımaları o kadar fazla olmaktadır (Long, 2006).

Eğer duvar yüzeyinde ahşap kullanılıyorsa, kesitin beton ya da dayanıklı bir duvar ile yapısal olarak güçlendirilmesi gerekmektedir. Beton blok ya da duvar üzerine uygulanan ahşap, duvar yüzeyinde bulunan işçilik hatalarının giderilmesine ve düzgün bir bitiş sağlanmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca, hava boşluğu üzerine uygulanan ahşap paneller, özellikle alçak frekansların emilmesini sağlamaktadır (Long, 2006).

Salon zemininde genellikle beton ya da beton üzerine ahşap uygulanmaktadır. Zemin beton olarak inşa edildiğinde, salonda bulunan koridorlar halı ile kaplanmaktadır. Beton üzeri ahşap uygulamaları iki katman şeklinde uygulanmaktadır. Burada, betona sabitlenen ahşap traverslerin üzerine kontrplak yerleştirilmektedir ve son katmanda ahşap uygulaması yapılmaktadır (Long, 2006).

Balkonda kullanılan malzemeler, derin balkon tasarımlarında arka koltukta oluşan akustik gölgelenmeyi önleyecek şekilde seçilmektedir. Özellikle balkonun alt tarafına dolaysız gelen sesin, mümkün olduğunca yansıyan seslerle desteklenmesi gerekmektedir. Balkon korkuluğunun önü ise yansımaları önleyecek malzemeler ile kaplanmalıdır ya da yansımaları önleyecek şekilde tasarlanmalıdır (Everest & Pohlmann, 2022).

1.8. Konser Salonlarının Akustik Tasarımı

Büyük konser salonlarında gerçekleştirilen müzik performanslarının dinleyiciye en iyi akustik koşullarda sunulabilmesi için yapılan tasarımlar, beraberinde çeşitli zorlukları da getirmektedir. Tarihsel süreçte farklı müzik türlerinin gereksinim duyduğu akustik özelliklerin ve salon boyutlarının birbirinden farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu farklılıkların temel nedeni, konser salonlarının geniş bir repertuara hizmet edecek şekilde tasarlanmalarıdır.

Konser salonlarının tasarımında en önemli parametrelerden biri olan reverberasyon süresi (RT) ölçülebilir bir değer olmasına rağmen, ideal akustik ortamın sağlanması için tek başına yeterli değildir. Ayrıca, optimum akustik koşulların ne olması gerektiği konusunda tasarımcılar arasında kesin bir fikir birliği de bulunmamaktadır. Nesnel ölçütlerin eksikliği, tasarım yaklaşımlarındaki farklılıklar, gereksinimlerin çeşitliliği ve hedefin büyük ölçüde

kişisel değerlendirmelere bağlı olması, konser salonlarının tasarım sürecini daha karmaşık hale getirmektedir (Everest & Pohlmann, 2022).

Konser salonlarında uygulanan akustik tasarım yaklaşımları, dört ana başlık altında sınıflandırılmaktadır:

1. Doğal akustik tasarım
2. Elektro akustik tasarım
3. Değiştirilebilir doğal akustik tasarım
4. Bütünleşik akustik tasarım

Bu tez kapsamında incelenen birleştirilmiş hacimler, değiştirilebilir akustik tasarım başlığı altında ele alındığından, bu konu diğer yaklaşımlara kıyasla daha detaylı bir şekilde incelenmiştir.

1.8.1. Değiştirilebilir Doğal Akustik Tasarım

Farklı müzik türleri ile gerçekleştirilen etkinlikler, mekansal açıdan çeşitli akustik gereksinimlere ihtiyaç duymaktadır. Özellikle bir salon farklı etkinliklere veya müzik türlerine ev sahipliği yapıyorsa, akustik tasarımın bu gereksinimlere uyum sağlayacak şekilde düzenlenmesi gerekmektedir (Everest & Pohlmann, 2022).

Salon içindeki akustik ortamı değiştirmek için aktif ve pasif yöntemler kullanılmaktadır. Pasif yöntemler, mekandaki akustik özellikleri mimari tasarım kriterleri doğrultusunda değiştirmektedir. Bu tasarım kriterleri arasında, salondaki yutuculuk oranının veya hacmin değiştirilmesi, kanopi reflektörlerinin kullanımı ve birleştirilmiş hacim uygulamaları yer almaktadır (Hyon & Jeong, 2021)

Aktif yöntemler ise oda akustiğinin elektronik cihazlar kullanılarak manipüle edilmesini sağlayan inline, rejeneratif ve hibrit sistemleri kapsamaktadır (Hyon & Jeong, 2021). Oda akustiğinin aktif sistemlerle değiştirilebilir olması, salon mimarisinin önemini daha da artırmaktadır (Patel, 2019).

Bu çalışma kapsamında, değişken akustiğin pasif yöntemleri incelenmiş olup akustik koşulları değiştiren tasarım kararları ve uygulamalar ele alınmıştır.

1.8.2. Değiştirilebilir Ses Yutma Katsayısı

Konser salonlarının tasarımında karşılaşılan en yaygın yöntemlerden biri, ses yutucu malzemelerin değiştirilebilir olmasıdır. Özellikle konuşma, oda grupları ve rönesans müziği

gibi netlik ve anlaşılabilirliğin önemli olduğu etkinliklerde malzeme değişikliği yapılması salondaki reverberasyon süresi azaltılıp netliği ön plana çıkarmaktadır (Siebein & Gold, 1997).

Salonlarda değiştirilebilir malzeme uygulamaları farklı yöntemler kullanılarak yapılmaktadır. Bunlar;

1. Perde ve menteşeli elemanlar
2. Taşınabilir emici paneller
3. Menteşeli paneller
4. Jaluzili paneller
5. Emici/dağıtıcı ayarlanabilir paneller
6. Abffusor
7. Değişken rezonanslı aygıtlar
8. Dönen elemanlar
9. Modüler düşük frekans emici cihazlar (Everest & Pohlmann, 2022).

Perde ve menteşeli elemanlar: Bu elemanlar sayesinde salonun reverberasyon süresi ayarlanabilir hale getirilebilmektedir. Perdenin yoğunluğu ve ağırlığı, ses yutma performansı konusunda oldukça önem taşımaktadır. Perdeler Şekil 18’deki gibi uygulanmakta olup perde arkasında kalan duvar yüzeyleri, tüm frekanslarda yansıtıcı olan malzemelerden, düşük frekans bölgesinde maksimum yutuculuğa sahip rezonanslı malzemelere kadar değişkenliğe sahip farklı malzemelerle kaplanabilmektedir (Everest & Pohlmann, 2022).



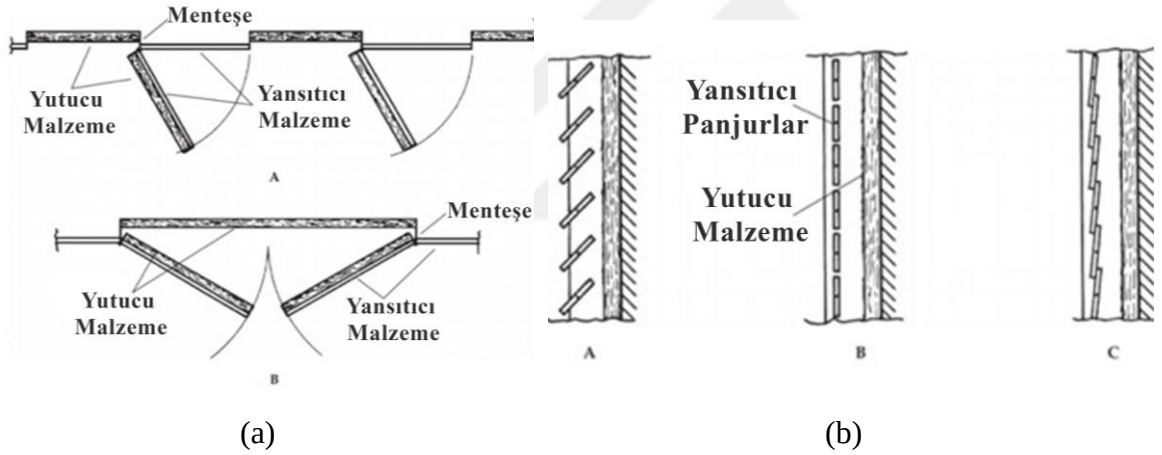
Şekil 18. Yüzeyler üzerine perde uygulaması (Everest & Pohlmann, 2022)

Taşınabilir emici paneller: Özellikle ses stüdyoları ve dinlenme odaları gibi mekanlar, akustik tasarım açısından belirli bir esneklik sunmaktadır. Bu paneller, genellikle ahşap çitadan yapılan bir çerçevenin kumaş kaplanmasıyla uygulanıp, panelin içi cam yünü gibi ses yutucu malzeme ile hava boşluğundan oluşmaktadır. Cam yünü, özellikle kalınlığının artışı ile birlikte tüm frekanslarda iyi ses yutuculuğuna sahip olduğu için tercih edilmekte

olup, panel mekanın akustik ihtiyacına bağılı olarak duvara monte edilebilmekte ya da çıkarılabilmektedir (Everest & Pohlmann, 2022).

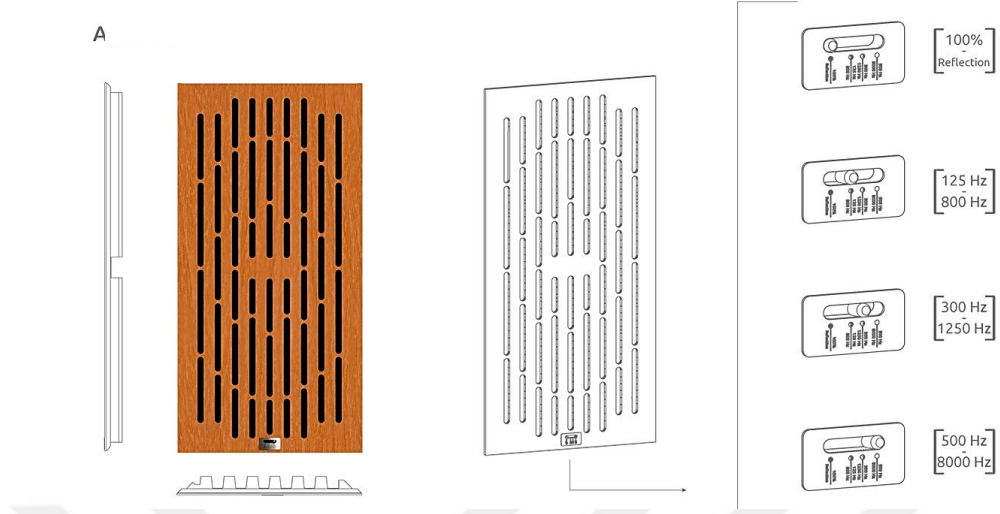
Menteşeli paneller: Salonlardaki akustik koşulları değıştirmenin en ekonomik ve etkili yöntemlerinden biridir. Mentşeli panellerin kapalıyken tüm yüzeyleri ses yansıtıcı, açıldığında ise ses yutucu olacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 19-a). Bu paneller tek ya da çift kapılı olarak tasarlanabilmektedir (Everest & Pohlmann, 2022).

Jaluzili paneller: Şekil 19-b’de gösterildiğı gibi, çerçevelerine entegre edilmiş bir kol mekanizması yardımıyla açıklık açıları ayarlanabilen yapılardır. Genellikle yansıtıcı yüzey özelliklerine sahip malzemelerden üretilen bu panellerin iç yüzeyleri, düşük yoğunluklu cam elyaf levhalarla kaplanarak ses yutma özellikleri artırılabilir. Farklı malzeme kombinasyonlarıyla donatılmış jaluzili paneller, mekanın değışen akustik ihtiyaçlarını karşılayacak esneklikte tasarlanabilmektedir (Everest & Pohlmann, 2022).



Şekil 19. Panel çeşitleri; (a) menteşeli paneller, (b) jaluzili paneller (Everest & Pohlmann, 2022)

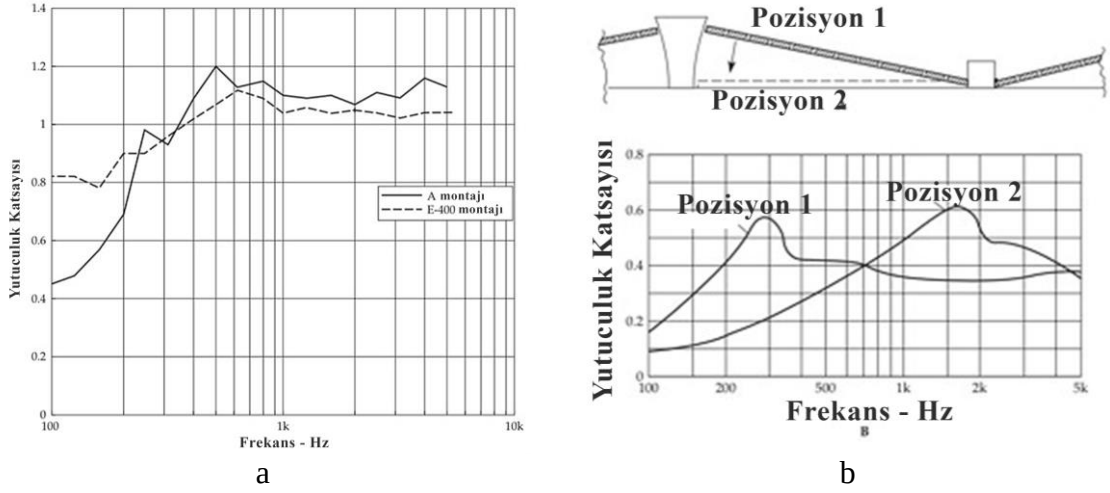
Emici/dağıtıcı ayarlanabilir paneller: Bu paneller sesi hem yayarak hem de yutarak akustik performansı iyileştiren sisteme sahiptirler. Yakın mesafelerde sesi yatay ve dikey yönde dağıtarak, uzak mesafelerde ise geniş frekans aralığında yutulum sağlayarak akustik açıdan dengeli bir ortam oluşturulmasına yardımcı olmaktadır. Bu paneller, dar bölmeli ve eşit genişlikte düzenlenmiş oyuklardan oluşmaktadır. Sesin yutulmayan bölümü bu oyuklar sayesinde dağıtılmaktadır. Bu oyukların derinlikleri belirli matematiksel hesaplara dayanmakta olup her mekan ve ihtiyaç için özel olarak düzenlenebilmektedir (Everest & Pohlmann, 2022) (Şekil 20).



Şekil 20. Emici/dağıtıcı ayarlanabilir paneller (Dükkan Hifi, n.d.)

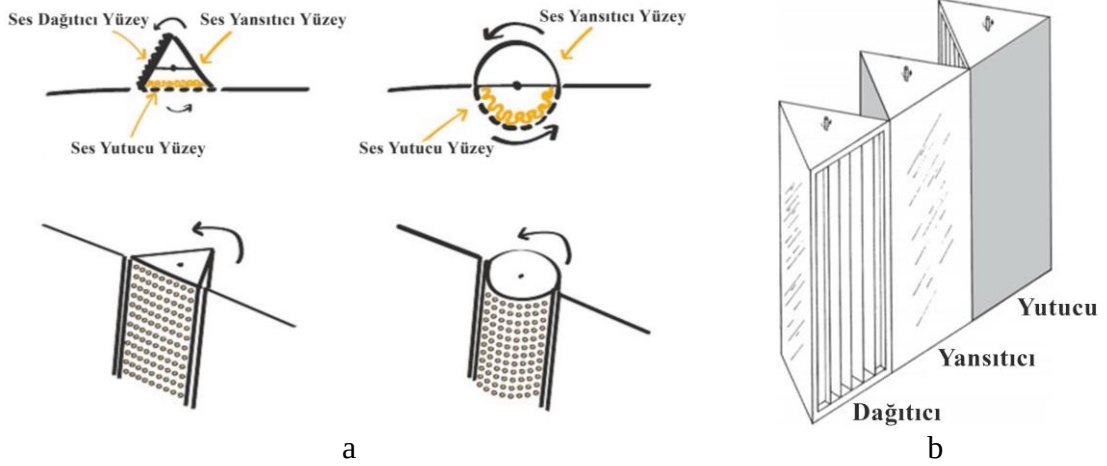
Abffusor: Sesin yutulmasını ve dağıtılmasını sağlayarak akustik kontrolü etkili şekilde gerçekleştiren panel tipidir. Bu tür panellerin duvara monte edilme biçimleri yutuculuk performanslarını etkilemektedir. Örneğin, duvara doğrudan monte edilen bir panelin ses yutma katsayısı 100 Hz’de 0.42 iken, panel ve duvar arasında 400 mm hava boşluğu eklendiğinde ses yutma katsayısı iki katına çıkmaktadır (Şekil 21-a). Abffusor paneller, düşük frekanslarda etkili yutuculuk sağlarken, orta ve yüksek frekanslardaki sesleri dağıtarak ortamın akustik kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır (Everest & Pohlmann, 2022).

Değişken rezonanslı paneller: Genellikle pozisyon değiştirilerek farklı frekanslarda yutuculuk sağlayabilen panellerdir (Şekil 21-b). Bu panellerin çalışma prensibi, panel arkasında bulunan hava boşluğunun esnekliği ile panel üzerindeki deliklerde bulunan hava kütlesi arasındaki rezonansa dayanmaktadır. Panele kaplanan özel gözenekli bez, rezonans frekansının ayarlanmasında ve yutuculuğun artırılmasında önemli rol oynamaktadır. Rezonans frekans panelin açık ya da kapalılık durumuna göre değişiklik göstermektedir. Örneğin, açıkken panelin rezonans tepe noktası düşük frekanslardayken, kapandığında yüksek frekanslara doğru yer değiştirmektedir (Everest & Pohlmann, 2022).



Şekil 21. Panellerin frekanslara göre yutuculuk katsayılarındaki değişim; (a) Abffusor, (b) Değişken rezonanslı panel

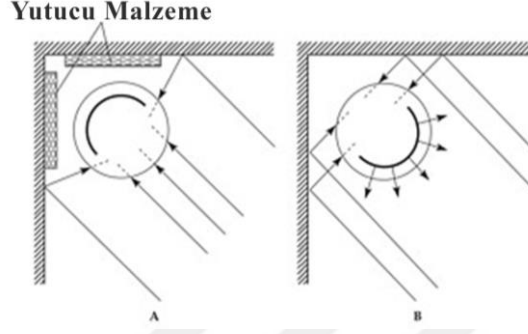
Dönen elemanlar: Düşük frekansların kontrolü için dönebilir şekilde oluşturulmuş panel sistemlerdir. Bu paneller silindirik ya da üçgen prizma şeklinde tasarlanabilmektedir. Panellerin yüzeyleri yutucu, yansıtıcı ya da dağıtıcı olarak kaplanabilmektedir (Şekil 22). Bu sayede panellerin döndürülmesiyle birlikte mekanın akustik ihtiyaçları karşılanabilmektedir (Everest & Pohlmann, 2022).



Şekil 22. Dönen elemanlar; (a) silindirik yapı (Atelier Crescendo, 2021), (b) üçgenler prizması yapısı

Modüler düşük frekans emici cihazlar: Harry Olson tarafından geliştirilen “Tüp Kapanı” (Tube Trap), düşük frekanslı seslerin emilmesi için kullanılan bir panel sistemidir. Bu panel sistemi, cam elyafından yapıldığı için bas seslerin emilmesinde büyük rol

oynamaktadır. Bunun yanında içinde bulunan esnek plastik levha sayesinde orta ve yüksek frekanslı sesleri yansıtarak sesin parlaklığının kontrol edilmesini sağlamaktadır. Panellerin konumu değiştirilerek yutuculuk oranları değiştirilebilmektedir (Şekil 23). Bunun yanı sıra, panel şekilleri akustik ihtiyaçlara göre düzenlenebilmektedir. (Everest & Pohlmann, 2022).



Şekil 23. Tüp Kapanı

1.8.3. Orkestra Kabuğu ve Kanopi

Sahnedeki müzisyenlerin birbirini duyabilmeleri, senkronize bir şekilde müzik icra edebilmeleri açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle, sahneye gerekli durumlarda orkestra kabuğu eklenmektedir. Orkestrayı çevreleyen panellerden oluşan kabuktan gerçekleşen güçlü yansımalar, müzisyenlerin hem kendilerini hem de diğer müzisyenleri duymalarına oldukça katkı sağlamaktadır (Long, 2006). Genellikle sahne önüne ve tavanın altına asılan ses yansıtıcı paneller, orkestra kabuğunu dinleyicilere doğru genişletmektedir. Kanopi olarak adlandırılan bu ses yansıtıcı paneller, sahnedeki ses enerjisini dinleyicilere yönlendirerek erken yansıyan seslerin güçlü bir şekilde iletilmesini sağlamaktadır. Kanopilerden yansıyan sesler sayesinde salon, dinleyiciler tarafından daha samimi algılanmaktadır (Egan, 2007).

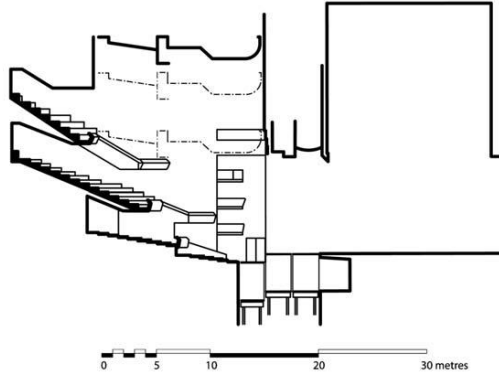
Kanopi, üzümbağı plan tipinde hem orkestra hem de dinleyiciler için oldukça önemlidir. Tavan altına yerleştirilen panellerin, müzisyenlere erken yansımaları ileterek orkestranın senkronize olmasını sağlaması bu önemi ortaya çıkarmaktadır (Long, 2006). Kanopilerin az sayıda büyük parçalardan oluşmasından ziyade çok sayıda küçük parçadan oluşması ve dışbükey olması tercih edilmektedir. Bazı akustik tasarımcılar, ince yansıtıcılar yerine aydınlatma ve ses sistemini barındıran büyük kanopilerin kullanımını önermektedir. Ancak, bu yaklaşım mimari ve akustik açıdan sakıncalar barındırmaktadır. Büyük kanopiler,

salonun görsel bütünlüğünü bozabilmekte, orgu kapatabilmekte ve reverberasyon süresini azaltarak akustik performansı olumsuz etkileyebilmektedir. Ayrıca, yüksek kota konumlandırıldığında (15 metre gibi), yansımaların müzisyenlere geç ulaşması nedeniyle etkinliğini yitirebilmektedir. Kanopiler ve tavan yansıtıcılarının kapsama alanı belirlenirken sahneye yakın oturma bölgeleri dikkate alınmaktadır. Tavan yansımaları netliği artırsa da mekansal genişlik hissini güçlendirme potansiyeli düşüktür. Odaklanma ve ton renklendirmesini önlemek için müzisyenlerin farklı yüzeylerden dengeli yansımalar alması sağlanmalıdır (Barron M. , 2010).

1.8.4. Değiştirilebilir Salon Hacmi

Salonların hacmini değiştirmek için genellikle iki temel yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; hareketli panjur sistemleri ve hareketli paneller/bölmelerdir. Dikey hareketli bölmeler yaygın şekilde seyirci alanını değiştirmek için kullanılmakta olup reverberasyon süresi üzerindeki etkileri oldukça kısıtlıdır.

Reverberasyon süresinin belirgin bir şekilde değiştirilmesi için kullanılan yöntemlerden biri hareketli tavan uygulamasıdır. Tek parça ya da çok parçalı olarak uygulanan bu sistemler, salonlarda gerçekleştirilen farklı etkinlik ve müzik türleri için optimum akustik koşulları sağlamaya yardımcı olmaktadır. Tek parçalı hareketli tavan uygulaması örneklerinden biri İngiltere'deki Milton Keynes Theatre'da yer almakta olup tavan üç farklı seviyede ayarlanarak üç farklı hacim büyüklüğü elde edilebilmektedir (Şekil 24). Orta seviyedeki tavan yüksekliği, 1250 kişilik izleyici kitlesine uygun drama akustiği sağlarken, en düşük seviyeye indirildiğinde üst balkon kapatılarak 850 kişilik drama etkinlikleri için ideal akustik koşullar oluşturulabilmektedir. Yan duvarlarda kullanılan perdeler, reverberasyon süresini azaltarak drama için daha iyi bir ses dengesi sağlarken, sahne üzerine yerleştirilen orkestra kabuğu ise müzikal performanslar için akustik açıdan uygun bir ortam sunmaktadır (Barron M. , 2010)



Şekil 24. Milton Keynes Tiyatrosu hareketli tavan pozisyonları (Barron M. , 2010)

1999 yılında, eski bir tren istasyonunun 1509 kişilik bir konser salonuna dönüştürülmesiyle inşa edilen Sala São Paulo’da, hareketli parçalı tavan sistemi uygulanmıştır. Yapının merkezinde yer alan dikdörtgen planlı ve üstü açık iç avlu, klasik konser salonlarının orantılarına benzer mimari özellikler taşıdığı için bu dönüşüm için uygun bir mekansal zemin oluşturmuştur. Bu avlu, üstü kapatılarak konser salonuna dönüştürülmüştür. Salonda 12.2 m ile 23.7 m arasında yüksekliği ayarlanarak değişebilen tavan uygulaması gerçekleştirilmiştir. Tavan yüzeyi birbirinden bağımsız hareket edebilen 15 panelden oluşmaktadır. Bu sistem sayesinde hacim 12.000 m³ ile 28.000 m³ arasında değiştirebilmekte ve doluluk durumuna bağlı olarak reverberasyon süresi de 1.9 ile 3.0 sn. arasında ayarlanabilmektedir. Gevşek bağlantılı paneller farklı yüksekliklerde konumlandırıldığında alt ve üst hacimler arasında akustik bağlantı sağlamaktadır (Şekil 25). Konferans gibi etkinliklerde, panellerin üzerindeki boşluklara ses yutucu perdeler yerleştirilerek reverberasyon süresi 1.5 sn’ye düşürülebilmektedir (Barron M. , 2010).



a



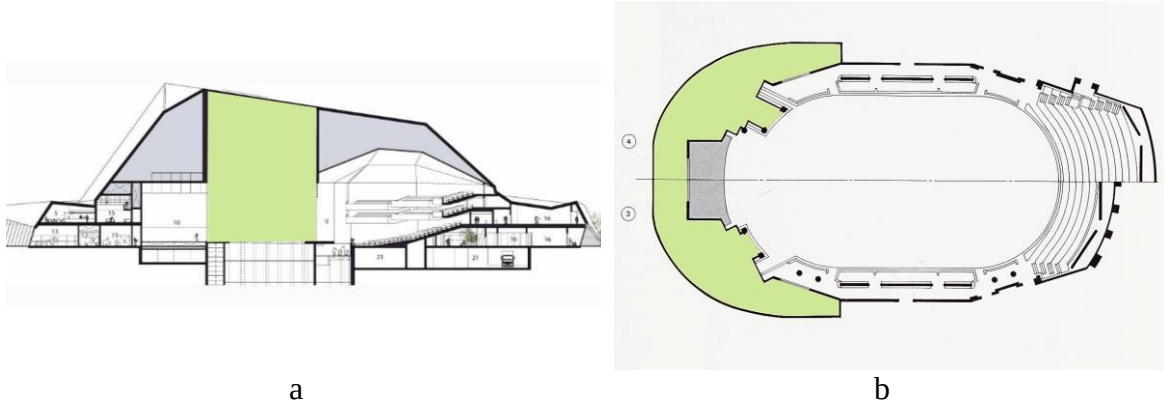
b

Şekil 25. Sala São Paulo konser salonu; (a) parçalı tavan (Wikimedia Commons, 2016), (b) tavan askı sistemi (Sala São Paulo, n.d.)

1.8.5. Birleştirilmiş Hacim

Bir salonda reverberasyon süresini artırmanın alternatif bir yöntemi, ana mekana bitişik konumlandırılan ve açılabilir kapılar veya hareketli duvar panelleriyle bağlantı sağlanan ek odalar kullanarak hacmi genişletmektir. Bu yöntem, tavan yükseltme yoluyla hacim artırmaktan farklı bir yankılanma karakteristiği oluşturarak salondaki ses dağılımını etkilemektedir (Long, 2006)

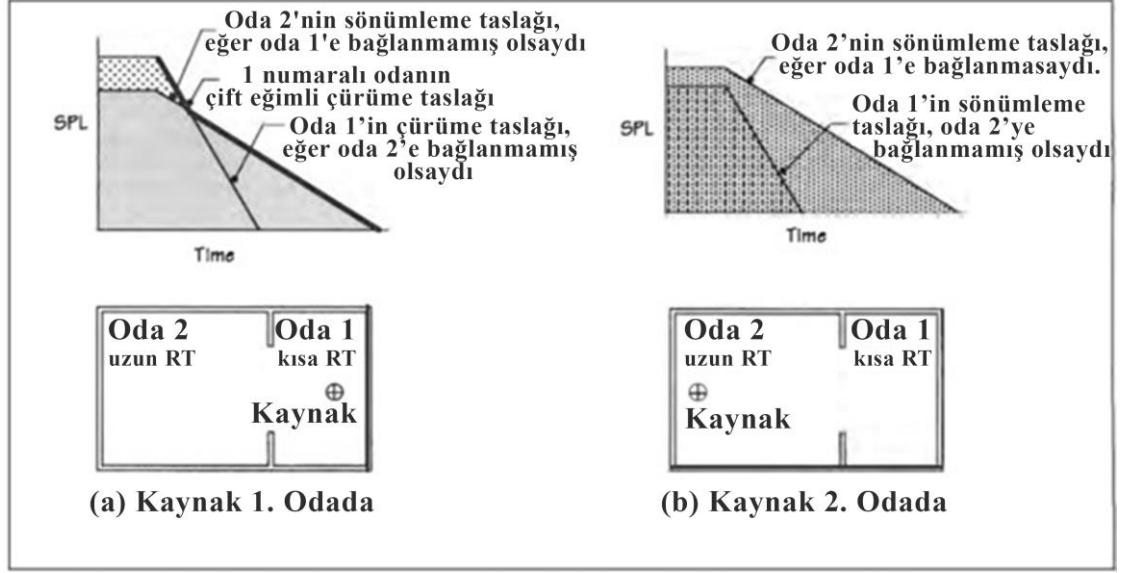
Salonlarda en yaygın kullanılan birleştirilmiş hacim, sahne ve soffito kulesi bağlantısı ile gerçekleşmektedir (Şekil 26-a) (Mehta, Johnson, & Rocafort, 1999). Bunun yanı sıra ana hacme birçok açıklık ile bağlanan büyük yankı odaları da birleştirilmiş hacim olarak etkili şekilde kullanılmaktadır (Şekil 26-b). Ses ana hacimden yankı odalarına açıklıklar yardımıyla girmekte ve buradaki yüzeylerden yansımalar sonucu gücünü kaybederek tekrar ana hacme yönelmektedir (Siebein & Gold, 1997). Eğer yankı odaları, ana hacme kıyasla daha uzun reverberasyon süresine sahipse, ses enerjisi bu odalardan ana hacme doğru bir akış göstermektedir. Birleştirilmiş hacimler, ana salondan enerjinin bir kısmını alıp daha düşük seviyede geri yansıtarak bölümlü bir enerji-azalma eğimi oluşturmaktadır. Bu durum, müzik icrası sırasında yankının sürekli bir etki yaratmasındansa, akorun kesilmesinden sonra belirgin şekilde işitilen bir ses kuyruğu biçiminde algılanmasına neden olur (Beranek L. , 1996; Long, 2006).



Şekil 26. Birleştirilmiş hacim uygulamaları; (a) Sahne ve soffito kulesi (Furuto, 2011), (b) yankı odası (Beranek L. , 1996)

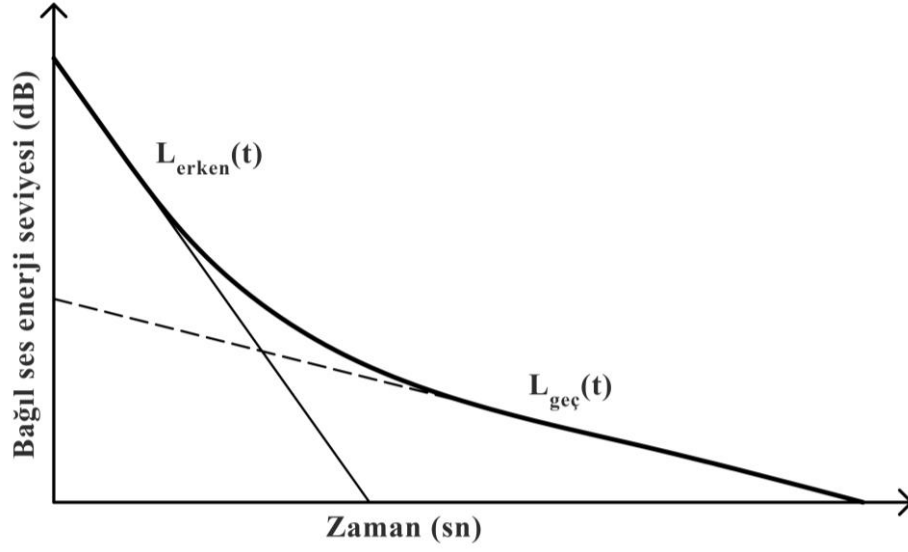
Ses kaynağı sürekli çalışıyorsa, hacimler arasında net bir enerji değişimi yaşanmamaktadır. Ancak kaynak kapatıldığında, her iki hacimde de ses seviyeleri sönümlenme hızlarına bağlı olarak azalmaktadır. Eğer odaların reverberasyon süreleri farklı

ise, fazla enerjiye sahip olan hacimden düşük enerjiye sahip hacme doğru bir geçiş yaşanmakta olup bu durum hacmin yankılanma özelliklerini değiştirmektedir (Şekil 27) (Mehta, Johnson, & Rocafort, 1999)



Şekil 27. Birleştirilmiş hacimlerde ses sönümlenmesi (Mehta, Johnson, & Rocafort, 1999)

Birleştirilmiş hacim içeren sistemler, genellikle "birleştirme açıklıkları" adı verilen akustik olarak geçirgen bağlantılar aracılığıyla birbirine bağlanan birden fazla alandan oluşmaktadır. Eğer yankı odasındaki sönümlenme süresi ana hacimden daha uzunsa, ses enerjisi bu hacimden ana hacme geri aktarılmaktadır. Bu gecikmiş enerji "çift eğimli sönümleme" olarak adlandırılan bir akustik etkiye neden olmaktadır (Şekil 28) (Bradley & Wang, 2005). Ses enerjisinin yardımcı hacimlerden ana hacme geri dönmesi, reverberasyon eğrisinde ikinci bir eğrinin oluşmasına yol açar. Bu ikinci eğri, salonun yankılanma karakterine zenginlik katarken aynı zamanda akustik dengeyi de desteklemektedir (Siebein & Gold, 1997). Özellikle müzik performanslarının gerçekleştirildiği salonlarda, erken bozulan ses enerjisi berraklığı artırırken geç bozulan ses enerjisi ise canlılık ve öznel yankılanma hissini güçlendirmektedir. Böylece, birbirine zıt olan bu iki akustik unsur, çoklu sönümleme eğrileriyle dengelenmektedir (Sü Gül, 2019).



Şekil 28. Çift eğimli sönümlenme eğrisi

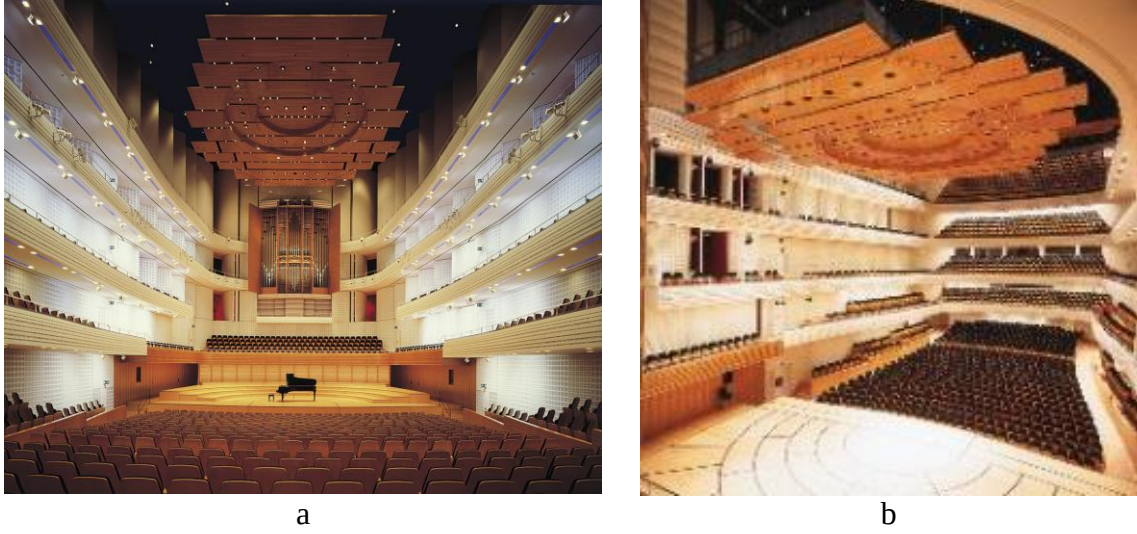
Sonuç olarak, birleştirilmiş hacimler arasındaki ses enerjisi akışı yankılanma özelliklerini belirleyen önemli bir faktördür. Farklı sönümlenme sürelerine sahip hacimler bir araya geldiğinde, sesin zaman içindeki dağılımı değişerek akustik dengenin oluşumunu etkilemektedir. Eğer bir hacmin reverberasyon süresi diğerine kıyasla daha uzunsa, ses enerjisi daha uzun süre korunarak çift eğimli bir yankılanma deseni meydana getirmektedir. Bu durumu ortadan kaldırmak ve hacimlerin akustik performansını iyileştirmek için ana hacim ve yankı odasında oluşan reverberasyon sürelerindeki farklılıkları azaltmak gerekmektedir. Konser salonlarında yaygın olarak kullanılan birleştirilmiş hacim uygulamaları, çoklu sönümlenme eğrileri oluşturarak hem sesin berraklığını artırmakta hem de reverberasyon süresinin dengeli bir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır (Long, 2006) (Sü Gül, 2019).

1.8.6. Birleştirilmiş Hacimli Konser Salonu Örnekleri

Konser salonlarında doğal akustiği sağlama yollarından biri olan değiştirilebilir hacim uygulamaları, dünya üzerinde birçok tasarımcı tarafından kullanılmaktadır. Bu bağlamda, bu başlık altında farklı ülkelerde inşa edilmiş ve hala aktif şekilde müziksel faaliyetlerde kullanılan bazı salonlar incelenmiştir. Bu konser salonları:

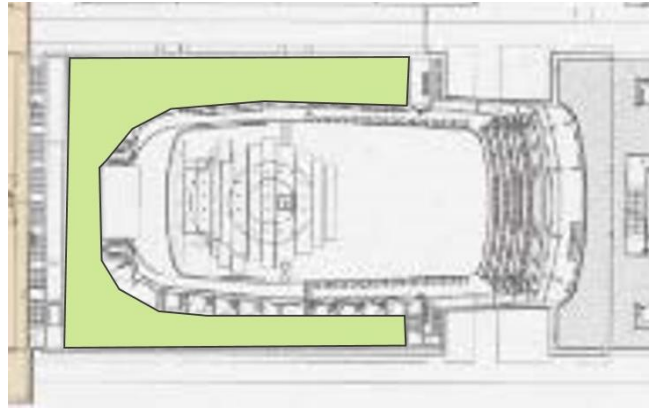
1. The Concert Hall in Lucerne
2. Birmingham Concert Hall
3. Dallas Eugene McDermott Konser Salonu
4. Sibelius Hall
5. Harpa Concert Hall
6. Heydar Aliyev
7. Hamel Müzik Merkezi
8. McPherson Resital Salonu'dur.

KKL Lucerne Konser Salonu: İsviçre'nin Lucerne kentindeki konser salonu, özel akustik düzenlemeleri sayesinde sesin dengeli ve doğal yayılımını sağlayan akustik özelliklere sahiptir (Toronto & Kahle, 2013). Salon 22 m yüksekliğinde, 22 m genişliğinde ve 46 m uzunluğunda olup klasik ayakkabı kutusu biçiminde tasarlanmıştır (Şekil 29-a) (Magazine, 2013) Tavan yüksekliği, genişliği ve uzunluğu arasındaki 1:1:2 oranı, akustik performansın artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte toplam 24.000 adet özel tasarlanmış alçı rölyef sesin homojen bir şekilde yayılmasını sağlayarak reverberasyon süresini dengelemektedir (KKL Luzern Business, n.d.). Sahne, ahşap malzeme ile kaplanmış olup 41 adet ayarlanabilir parçadan meydana gelen esnek bir yapıya sahiptir. Sahnenin tam arkasında konumlanmış olan organ 4.387 boruya sahip olup gerektiğinde büyük kapılarla kapatılabilmektedir. Sahnenin hemen üzerinde bulunan parçalı kanopi müzisyenlerin birbirlerini gecikme olmadan duyabilmelerini sağlamaktadır (Şekil 29-b) (Magazine, 2013).



Şekil 29. Lucerne Konser Salonu; (a) genel görünüm (b) kanopi (Kahle Acoustics, n.d.)

Konser salonu, orgun ve üst yan balkonların arkasında konumlandırılmış U şeklinde bir yankı odasına sahiptir (Şekil 30). Bu hacim, salonun akustik performansının optimize edilmesine yardımcı olmaktadır. Yankı odasında, dikey olarak hareket edebilen afiş benzeri değişken akustik ses yutucu paneller bulunmakta olup, bu paneller reverberasyon süresini müzikal açıdan en uygun seviyeye ayarlamak için kullanılmaktadır (Toronto & Kahle, 2013).



Şekil 30. KKL Lucerne Konser Salonu'ndaki yankı odası

Akustik tasarım sürecinde, yankı odalarındaki ses yutucu panellerin yerleşimi önemli bir rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalar, bu panellerin yan bölgelerde (yan balkonların yanı sıra sahne kenarının ön kısmında) veya arka bölgede (orgun arkasında ve yan köşelerde) konumlandırılmasının, ses algısı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Yan bölgelere ses yutucu malzeme yerleştirilmemesi, yankılanan sesin daha yanal bir karakter kazanmasına imkan tanırken, arka kısımdaki ses yutucu malzemeler yankılanmanın ağırlık merkezini sahne kenarının gerisinden ön kısmına kaydırarak ses kaynağının daha net algılanmasını sağlamaktadır (Şekil 31-a) (Toronto & Kahle, 2013)

Salonun akustik özelliklerine esneklik kazandıran bir diğer önemli faktör ise beyaz renkli duvarların, dokunmatik panel kontrollü hidrolik kapılarla donatılmasıdır. Bu hidrolik kapılar, farklı akustik gereksinimlere uyum sağlamak amacıyla reverberasyon süresinin ayarlanmasına olanak tanıyarak mekanın ses dağılımını optimize etmektedir (Şekil 31-b) (Magazine, 2013). Böylece, konser salonu hem çeşitli müzikal performanslara hem de farklı akustik ihtiyaçlara uygun olacak şekilde tasarlanmıştır.



a



b

Şekil 31. Lucerne Konser salonu; (a) yankı odası, (b) kapılar (Kahle Acoustics, n.d.)

Seyirci alanının toplam hacmi yaklaşık 18.000 metreküp olup, kişi başına ortalama 10 metreküp düşmektedir. Salonun çevresinde konumlandırılmış yankı odası ise bu hacme ek olarak yaklaşık 6.000 m³'lük bir katkı sağlamaktadır. Yankı odası kapılarının belirli ayarlarına bağlı olarak, dolu salonda orta frekanslardaki reverberasyon süresi 1.6 sn ile 3.0 sn arasında değişebilmektedir (Johnson & Kahle, 1999)

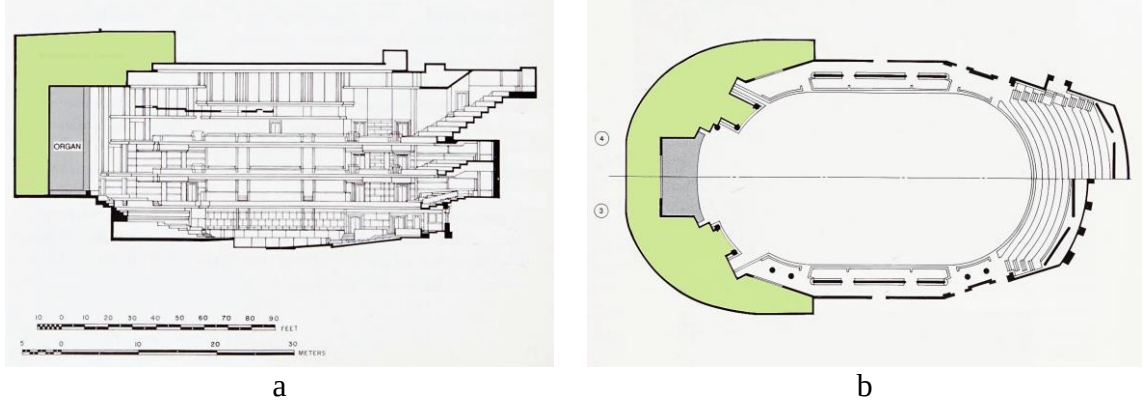
Birmingham Konser Salonu: 1991 yılında Birmingham kentinde açılan konser salonu, şehrin Avrupa’da önemli bir konuma gelmesini sağlamıştır.

Biçimsel olarak klasik dikdörtgen plan tipine sahip olan salonun arka bölümü kavisli ve çok katmanlı olarak tasarlanmıştır. Toplam 2211 kişi kapasitesine sahip olan salonda, orkestranın arkasında kalan duvarlar erken yansımalar sağlayarak salonda samimi bir ortam oluşmasına imkan tanımıştır. Yüzeylerde genellikle yumuşak kırmızı tonlar, ahşap, paslanmaz çelik ve granit kullanılmıştır (Şekil 32) (Beranek L. , 1996).



Şekil 32. Birmingham konser salonu (Visit Birmingham, n.d.)

Konser salonunun en belirgin özelliklerinden biri, yankı odasına sahip olmasıdır. Bu hacim, orgun çevresi ile yan duvarların arkasında yer almakta olup beton kapılar aracılığıyla ana hacme entegre edilmiştir (Şekil 33). Bu kapılar, istenen oranda açılarak reverberasyon süresinin ayarlanmasına imkan tanımakta ve böylece farklı müzik türleri için uygun akustik koşullar sağlanabilmektedir. Yankı odaları 10.300 m³ hacme sahip olup sert beton yüzeylerden oluşmaktadır. Yankı odalarında iki katmanlı ve açılıp kapanabilen kadife perdeler de bulunmaktadır. Bu salonun akustik özellikleri, uzaktan kumanda ile kontrol edilebilen ve her biri 15 cm kalınlığında olan 20 adet beton kapı ile ayarlanabilmektedir. Toplamda 195 m² alana sahip olan bu kapılar, reverberasyon süresinin istenen şekilde düzenlenmesine olanak sağlamaktadır (Beranek L. , 1996)



Şekil 33. Birmingham Konser Salonu; (a) kesit düzleminde yankı odası, (b) plan düzleminde yankı odası (Beranek L. , 1996)

Sesin netliğini maksimum seviyeye çıkarmak amacıyla, orkestra ve izleyici alanının önüne büyük bir ahşap kanopi yerleştirilmiştir. Kanopinin yükseltilip alçaltılabilmesi, akustik kontrolü sağlamak açısından kritik önem taşımaktadır. Buna ek olarak, raylı bir sistem üzerine monte edilen ve içeri-dışarı hareket ettirilebilen 7.6 cm derinliğindeki ses yutucu paneller reverberasyon süresini azaltarak akustik performansı artırmaktadır. Salon dolu olduğunda, orta frekanstaki reverberasyon süresi 1.85 sn olarak belirlenmiştir (Beranek L. , 1996).

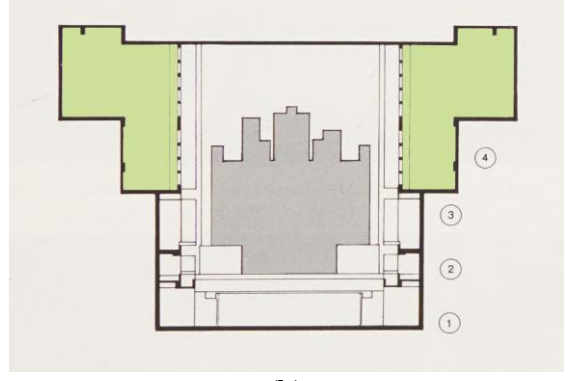
Salonun akustik performansını tek ziyaret ile tam anlamıyla değerlendirmek zordur çünkü reverberasyon süresi ve sesin berraklığı farklı kombinasyonlarla büyük ölçüde değişebilmektedir (Beranek L. , 1996).

Dallas Eugene McDermott Konser Salonu: 1989 yılında Dallas'ta inşa edilen Eugene McDermott Konser Salonu geleneksel "shoebox" (ayakkabı kutusu) ve opera salonu formlarını modern tasarım anlayışıyla bir araya getiren önemli bir mimari eser olarak değerlendirilmektedir. Genel olarak dikdörtgen bir yapıya sahip olmakla birlikte seyirci yerleşim alanının arka duvarı yarım daire biçiminde tasarlanmıştır. Üç balkon katı bulunan salonun kapasitesi yaklaşık 2.000 kişidir (Long, 2006).

Ana salonun hacmi, yan duvarların arkasında konumlandırılan yankı odaları aracılığıyla artırılabilir. Bu yankı odaları, 10 cm kalınlığındaki 74 adet mekanize beton kapının açılmasıyla salona 7.200 m³ ek hacim kazandırmakta ve toplam hacmi %30 oranında artırmaktadır (Şekil 34) (Long, 2006)



(a)



(b)

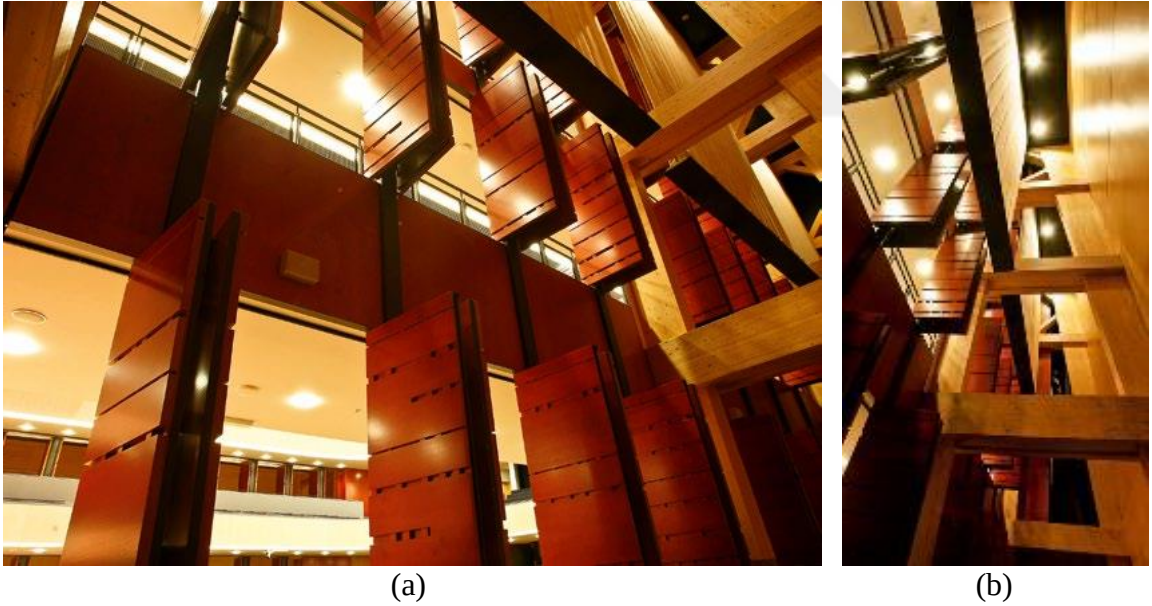
Şekil 34. Dallas Eugene McDermott Konser Salonu: (a) salonun iç mekanı (Dallas Symphony, n.d.), (b) salonun kesiti (Beranek L. , 1996)

Salonun en dikkat çekici mimari elemanı, orkestranın üzerinde kablolarla asılı duran ve tasarımıyla bir uzay gemisini andıran kanopidir. Yüksekliği 11 m ile 15 m arasında ayarlanabilen bu kanopi, orkestraya yukarıdan ses yansımaları sağlayarak akustik performansı iyileştirmektedir. Küçük müzik grupları için daha samimi bir atmosfer oluşturmak amacıyla kanopi aşağı indirilebilirken, org müziği gibi yüksek yankılanma gerektiren durumlarda yukarı kaldırılarak org borularının görünmesi de sağlanabilmektedir. Kanopi büyük boyutları nedeniyle salonu üç farklı hacme ayırmaktadır. Bunlar; kanopinin altındaki alan, ana salon ve yankı odalarıdır. Bu tasarım yaklaşımı sayesinde, ses dalgalarının birbirine bağlı üç hacim içinde yönlendirilmesiyle hem netliğin hem de yankılanmanın dengeli bir şekilde sağlanması amaçlanmıştır. Reverberasyon süresi geniş bir aralıkta değiştirilebilmektedir (Long, 2006).

Akustik değerlendirmelerde Beranek (1996), salonun denge, ton ve samimiyet açısından neredeyse kusursuz olduğunu belirtmiş ve en iyi akustik deneyimin ana salonun parter alanında ve seyirci alanının arka kısmında sağlandığını ifade etmiştir. Yan balkonların akustik dengesi ise diğer bölgelere kıyasla nispeten daha zayıf bulunmuştur. Yankı odalarının etkisi ise “belirgin değil” şeklinde tanımlanmış olup yalnızca akorların kesilmesi anında fark edildiği ancak sürekli bir yankılanma hissi yaratmadığı belirtilmiştir (Long, 2006)

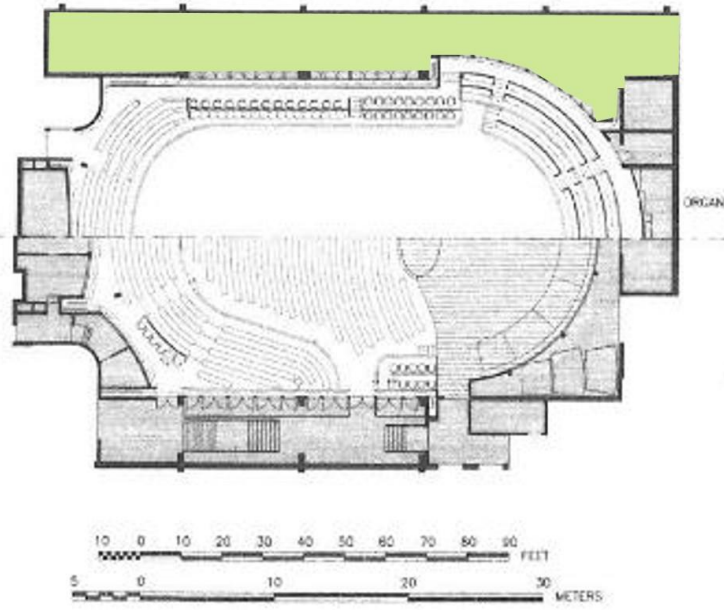
Sibelius Konser Salonu: Salonun akustik tasarımı ABD merkezli Arttec Consultants tarafından gerçekleştirilmiştir. "Ayakkabı kutusu" plan tipine sahip olan salonun oval sahnesi optimum akustik performans elde etmek amacıyla özel olarak tasarlanmıştır. Ayrıca, kullanılan mobilyalar ve yapı malzemeleri ses kalitesini en üst düzeye çıkarmak için özenle seçilmiştir.

Salonun akustik kontrolü; kanopi, yan duvarlardaki akustik kapılar ile salona bağlantısı sağlanan yankı odaları ve akustik afiş sistemleri aracılığıyla sağlanmaktadır. Farklı müzik türlerine uyum sağlamak ve akustik esnekliği artırmak amacıyla sahne üzerine düşey eksen boyunca hareket edebilen bir kanopi yerleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, salonun yan duvarlarında bulunan 188 adet akustik kapı yankı odalarının kontrollü bir şekilde salona dahil olmasını sağlamaktadır. Ayrıca toplam 2.7 km uzunluğundaki yün perdeler, yankı odalarındaki reverberasyon sürelerinin optimum seviyelere getirilmesine katkı sağlamaktadır (Şekil 35). Salonda yer alan oluklu duvar yüzeyleri, yansıyan seslerin kontrollü ve dengeli bir şekilde dağıtılmasını sağlamaktadır (Sibelius Hall, n.d.)



Şekil 35. Sibelius Konser Salonu ;(a) yankı odası kapıları, (b) yankı odası iç görünümü (Beckhoff Automation, 2011)

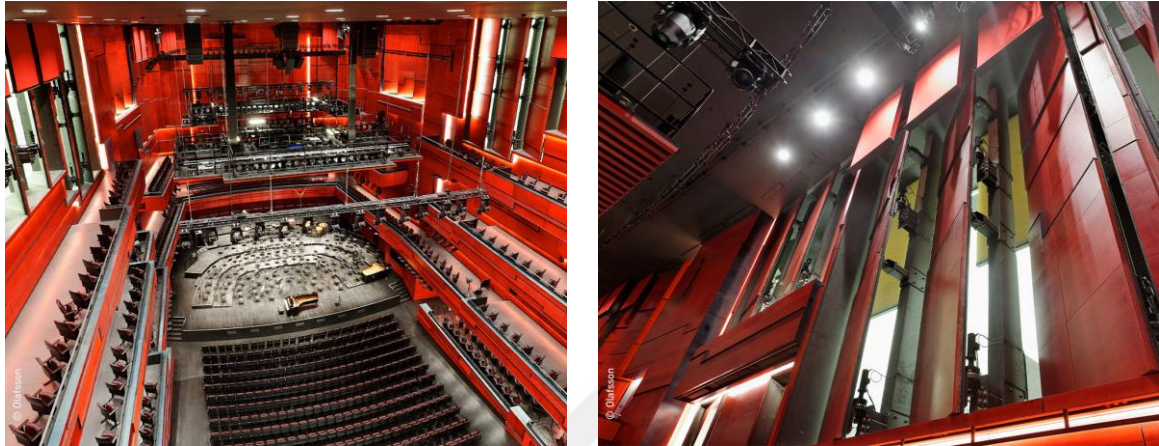
Salonun fiziksel yapısı da akustik performansı artıracak şekilde tasarlanmıştır. 42 m uzunluğa, 23 m genişliğe ve 19 m yüksekliğe sahip olan salon yaklaşık 18.000 m³ iç hacme sahiptir. Buna ek olarak, 7.000 m³ hacme sahip yankı odası bulunmaktadır (Şekil 36) (Storch & Tocci, 2004).



Şekil 36. Sibelius concert hall plan düzleminde yankı odası (Live Sound, n.d.)

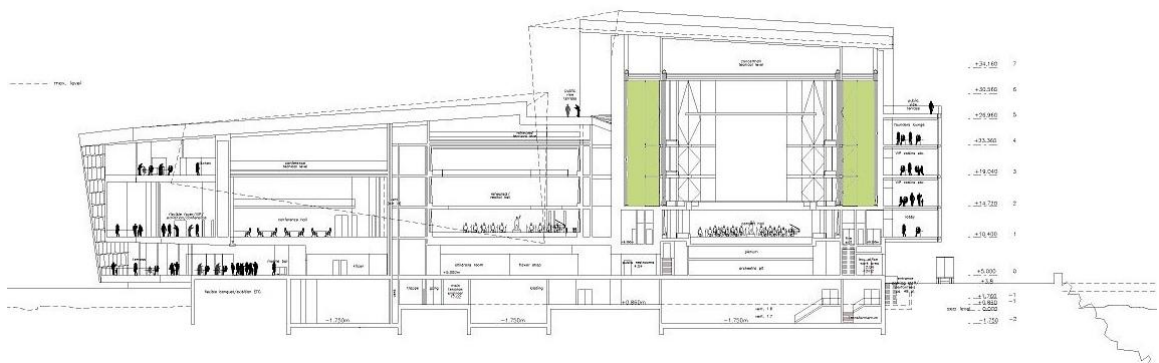
Bu sistem, farklı müzik türleri için ideal bir akustik ortam oluşturulmasını mümkün kılmaktadır. Kapıların açık-kapalılık oranının hassas bir şekilde ayarlanması, konumlandırmalarının dikkatlice belirlenmesi ve açıklık seviyelerinin özenle düzenlenmesi, reverberasyon süresinin istenilen seviyeye getirilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemlerin tek tek veya birlikte uygulanmasıyla, geniş bir repertuar yelpazesine uyum sağlayan çok yönlü bir akustik yapı oluşturulmuştur (Storch & Tocci, 2004).

Harpa Konser Salonu: İzlanda'nın Reykjavik kentinde, deniz kıyısında konumlandırılmış olan yapı kapsamındaki konser salonu 2011 yılında inşa edilmiştir. Salon, “Ateş Dağı” anlamına gelen Eldborg adıyla anılmaktadır (Şekil 37) (Larsen, n.d.)



Şekil 37. Harpa Concert Hall yankı odası ve salon birleşimi (Systems, Waagner-Biro Stage, n.d.)

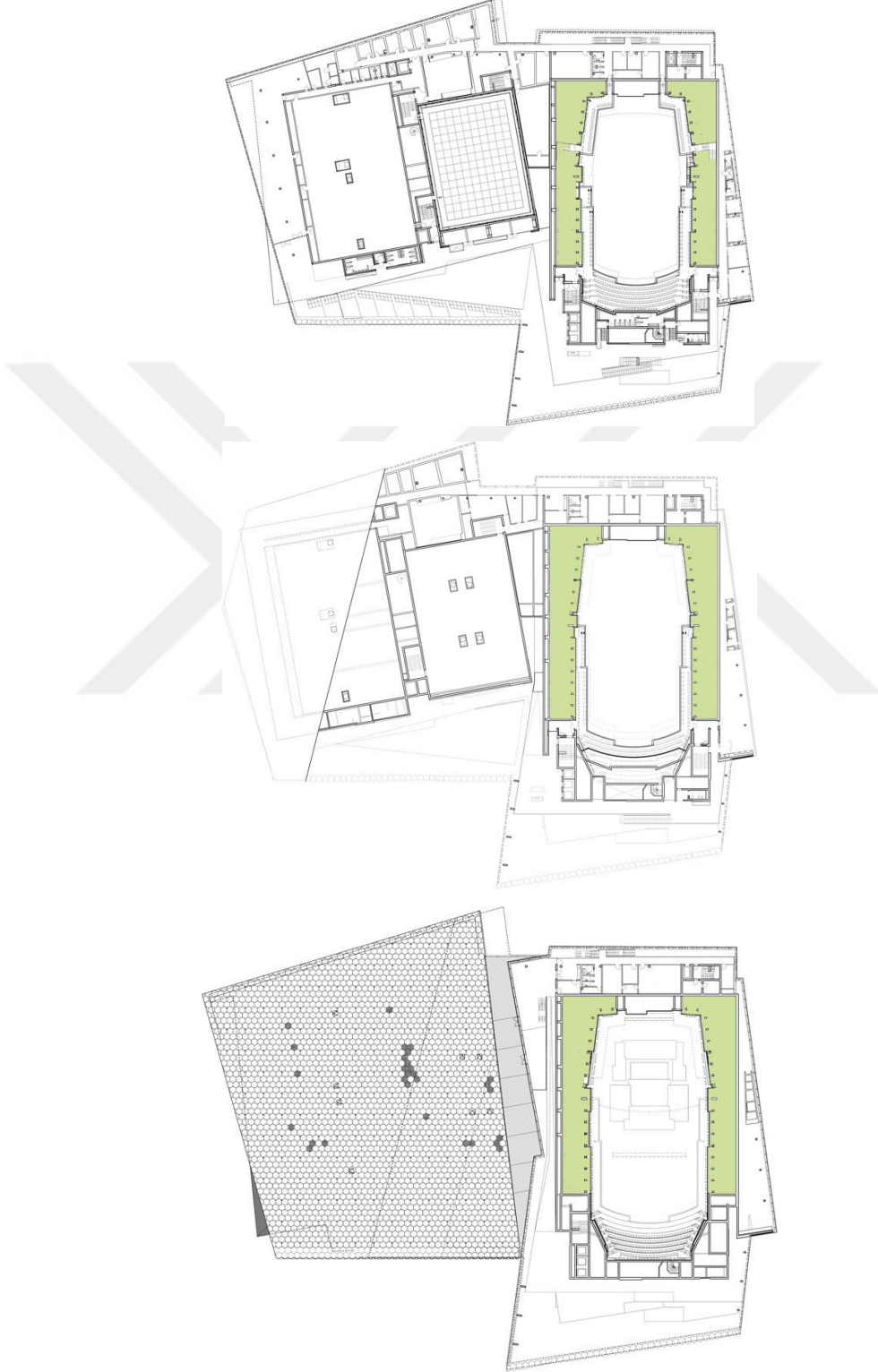
Konser salonuna ait ölçüler literatür verilerine bağlı olarak değerlendirildiğinde, yankı odası ile salon hacmi oranının 1/3 olduğu belirlenmiştir. Yankı odaları, +14.72 kotundan başlayarak +33.00 kotuna kadar kesintisiz bir şekilde devam etmektedir (Şekil 38).



Şekil 38. Harpa Concert Hall'ün enine kesiti (Gooood, n.d.)

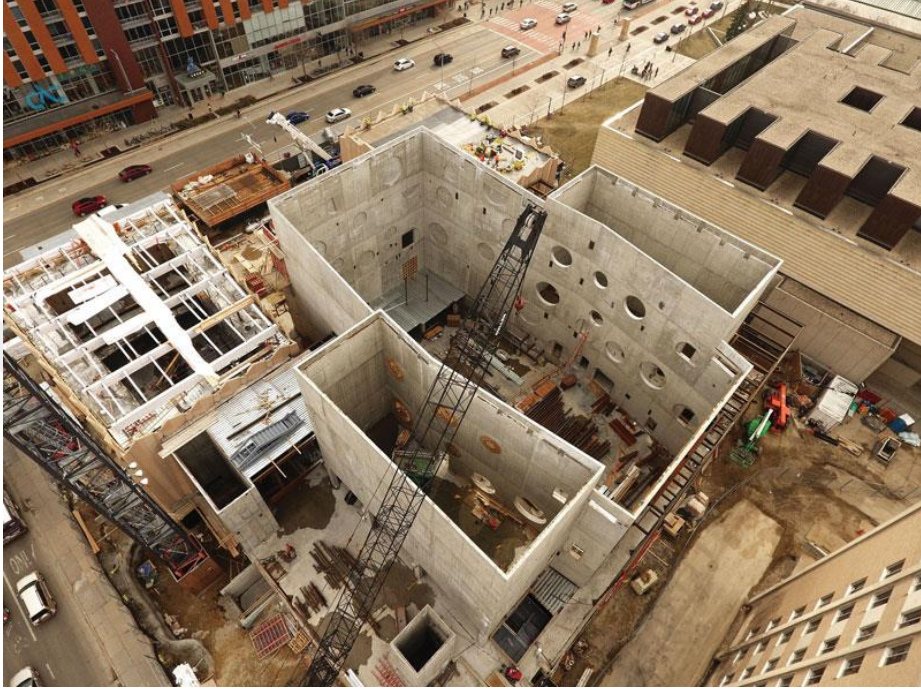
Konser salonunun yankı odalarının toplam hacmi yaklaşık 10.000 m³, ana salonun hacmi ise 30.000 m³ olarak hesaplanmıştır. Salonda yankı odalarına açılan toplam 78 adet akustik kapı bulunmakta olup, bu odalar sayesinde ana hacim %30 oranında artırılabilmekte

ve salonun reverberasyon süresi ayarlanabilir hale gelmektedir. (Şekil 39) (Waagner-Biro Stage Systems, n.d.; Square Yards, n.d.)



Şekil 39. Harpa Concert Hall'ün kat planları (Gooood, n.d.)

Hamel Müzik Merkezi (Mead Witter Vakfı Konser Salonu): Konser salonunun ikinci katında, her biri 1.415 m³ hacme sahip ve kumaşla kaplanmış iki yüzer beton yankı odası bulunmaktadır. Bu odalar, sahnenin her iki yanında konumlandırılmış olup başlangıç kotu 9 m yükseklikte yer almaktadır (Şekil 40) (Mead Witter School of Music, n.d.).



Şekil 40. Hamel Müzik Salonu’ndaki yankı odası (İnşaat aşaması) (Roloff, 2021)

Dört kat yüksekliğinde olan yankı odaları farklı müzik performans türlerine göre özelleştirilebilmektedir.

Performans alanından doğrudan görülmeseler de, yankılanma odalarının varlığı, salonun yan duvarlarına yerleştirilen büyük dairesel girintiler aracılığıyla hissedilmektedir. Bu girintiler, gitar gibi yaylı çalgıların ses deliklerine benzer bir işlev üstlenerek, sesin salon içinde daha etkin yankılanmasını ve yansıtılmasını sağlamaktadır (AIA Wisconsin, 2022)

Hamel Müzik Salonu’na ait ölçekli plan ve kesitlere ulaşılamadığı için fotoğraflar üzerinden oranlama yöntemiyle modelleme gerçekleştirilmiş ve ana hacmin yaklaşık 4.445 m³, yankı odalarının ise toplam 1.415 m³ olduğu hesaplanmıştır (Roloff, 2021).

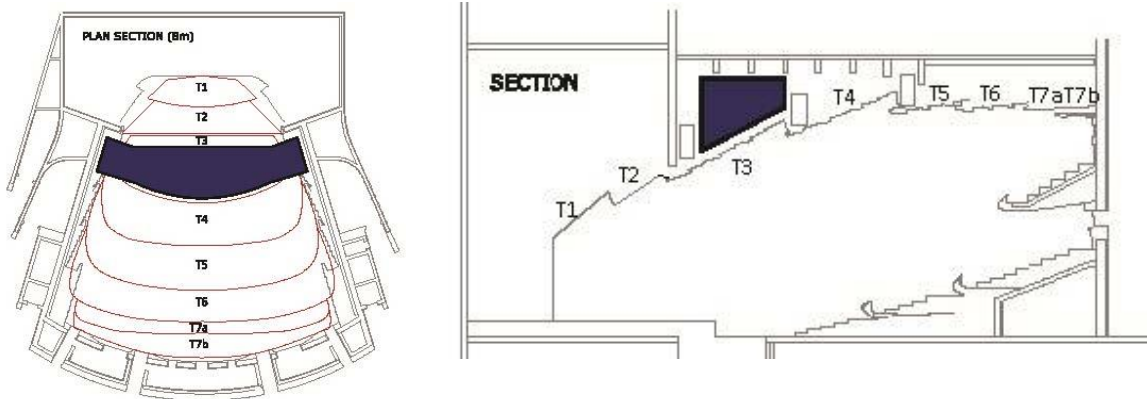
Heydar Aliyev Merkezi Çok Amaçlı Salonu: Heydar Aliyev Kültür Merkezi, akışkan bir form ile tasarlanmış olan özgün öne çıkan bir yapıdır. Binanın taşıyıcılığı, uzay çerçeve sistemiyle desteklenen beton bir yapı sistemi ile sağlanmaktadır. Bu yaklaşım ile hem yapısal

dayanıklılık artırılmış hem de iç mekanın kesintisiz bir akış içinde algılanması sağlanmıştır (Şekil 41).



Şekil 41. Heydar Aliyev Kültür Merkezi (Aksu, 2014)

Heydar Aliyev Kültür Merkezi'ndeki çok amaçlı salonun akustik tasarımı da mimari form ile bütünleşecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 8215 m³ olan ana hacimde reverberasyon süresini ve ses yayılımını optimize etmek için mimari form ile uyumlu akustik çözümler geliştirilmiştir. Oluklu duvar yüzeyleri, sesin dengeli bir şekilde yayılmasını sağlamaktadır. Buna ek olarak, 600 m³ lük yankı odası, salonda icra edilecek farklı müzik türleri ve faaliyetlerin ihtiyaç duyduğu optimum aralıkların sağlanmasına yardımcı olmaktadır (Şekil 42). Ayrıca, yapının kıvrımlı formu ve kesintisiz iç hacmi, sesin doğal bir akış içinde yönlendirilmesine imkan tanımaktadır (ArchDaily, 2013; Sü-Gül & Çalışkan, 2010).



Şekil 42. Heydar Aliyev Oditoryumu'nda bulunan birleştirilmiş hacim uygulaması (Sü-Gül & Çalışkan, 2010)

McPherson Resital Salonu: Hareketli zemin sistemine ve 9 m yüksekliğindeki yankı odasına sahip olan meşe kaplama McPherson Resital Salonu, dünyada türünün öncülerinden biri olarak kabul edilmektedir (Şekil 43) (Welch, 2022)

Bu salona ait boyutsal ölçüm değerleri, çevrimiçi kaynaklardan elde edilen ölçeklendirilmemiş plan ve kesitler üzerinde yeniden ölçeklendirme çalışmaları gerçekleştirilerek elde edilmiştir. Bu doğrultuda yapılan hesaplamalar sonucunda, salonun alanı yaklaşık 540 m², yüksekliği ise 20 m olarak belirlenmiştir. Salonun tamamını kapsayacak şekilde tasarlanan yankı odasının hacmi yaklaşık 4.860 m³ olarak hesaplanırken, ana salonun hacmi ise 5.940 m³ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu veriler, salonun akustik düzenlemeler açısından esnek bir kullanım alanına sahip olduğunu göstermektedir (Kucharek, 2022).



Şekil 43. McPherson Resital Salonu'nun kesit ve planı (Kucharek, 2022)

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında, Almanya'nın Münih kentinin Sendling ilçesinde yer alan bir sanayi parkında inşa edilen Isarphilharmonie Konser Salonu öncelikle mevcut durumu dikkate alınarak oda akustiği gereksinimleri açısından değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler sesin nesnel parametre değerleri ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra mevcut salona farklı miktarlarda ilave edilen (birleştirilmiş) hacim uygulamaları sonucu elde edilen yeni mekanların oda akustiği değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir. Değerlendirmeler sesin nesnel parametreleri aracılığı ile karşılaştırmalı olarak yapılmıştır.

Isarphilharmonie Konser Salonunda farklı müzik etkinliklerinin gerçekleştirildiği belirlenmiştir. Her müzik türünün farklı akustik gereksinimlere sahip olması, konser salonlarının bu gereksinimlere uygun biçimde tasarlanmasını gerekli kılmaktadır. Mekanın akustik açıdan şekillenmesini sağlayan en etkili nesnel parametrelerden biri olan reverberasyon süresinin, her müzik türü için farklı bir değer aralığını karşılaması gerekmektedir. Bu nedenle salon hacmi ve yüzeylerde kullanılan malzemelerin ses yutma katsayıları ile yüzey alanları mekandaki akustik konfor şartlarının sağlanmasında önemli rol oynamaktadır.

Bu doğrultuda çalışma kapsamında, Isarphilharmonie Konser Salonundaki farklı doluluk oranları, birleştirilmiş hacim senaryolarını oluşturan farklı hacimler ile bu hacimler arasındaki açıklık oranlarının ve farklı yutuculuğa sahip malzeme uygulamalarının sesin nesnel parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Elde edilen veriler, literatürde yer alan bilimsel çalışmalar ve uluslararası standartlar dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme sürecinde, hem genel konser salonu tasarım kriterleri hem de farklı müzik türlerine yönelik akustik ihtiyaçlar göz önünde bulundurulmuştur.

Bu çalışma doğrultusunda izlenen adımlar;

- Literatür taraması gerçekleştirilmiş ve buna bağlı olarak çalışma yöntemi belirlenmiştir.
- İncelenen konser salonuna ait planlar ve kesitler elde edilerek üç boyutlu modeller hazırlanmıştır. Ayrıca mevcut duruma ait ölçüm yöntemi ile elde edilen reverberasyon süresi bilgisi literatür araştırmalarından elde edilmiştir.
- Salonda uygulanan yüzey kaplama malzemelerinin akustik açıdan orijinal değerlerine erişim sağlayamadığımızdan dolayı, çalışma kapsamında bu malzemelere ait değerler literatürden ve Odeon Combined Versiyon 10.1 programının kütüphanesinden seçilmiştir.
- Konser salonunun 3D modeli SketchUp 2020 programında hazırlanmış ve belirlenen senaryolara göre gerekli düzenlemeler yapılmıştır.
- Hazırlanan farklı senaryolara ait modeller, akustik simülasyon aracı olarak kullanılan Odeon Combined Versiyon 10.1 programına aktarılmıştır.
- Simülasyon programındaki işlemler, kullanım kılavuzu dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.
- İlk olarak, dört farklı doluluk durumunu içeren senaryolar için sesin nesnel parametrelerine ait veriler simülasyon yöntemiyle elde edilmiş; bu veriler, hem konser salonları için genel olarak önerilen optimum değer aralıkları hem de farklı müzik türlerine özgü akustik gereksinimler doğrultusunda karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.
- Ardından, birleştirilmiş hacim düzenlemeleriyle oluşturulan 36 farklı senaryodan elde edilen akustik veriler, hem genel konser kullanımı hem de farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıklarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.
- Son olarak, bu 36 birleştirilmiş hacim senaryosuna ait T30 ve EDT değerleri, mevcut duruma ilişkin elde edilen değerlerle frekans bazında kıyaslanmış ve fark edilebilir düzeyde bir değişimin olup olmadığı irdelenmiştir.

2.1. Isarphilarmonie Konser Salonu

Isarphilharmonie Konser Binası, Münih'te 1980'lerde inşa edilen Gasteig Kültür Merkezi'nin yenilenmesi sürecinde, Münih Filarmoni Orkestrası'nın taşınması için geçici bir bina olarak tasarlanmış ve Ekim 2021 tarihinde hizmete açılmıştır (Nagata Acoustics, 2021) (Şekil 44).



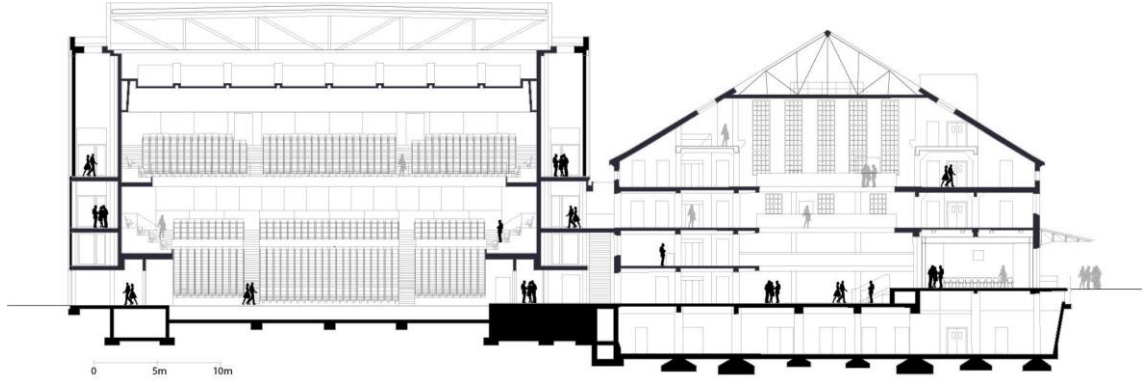
Şekil 44. Isarphilarmonie konser binası (Esch, 2021)

Salonun ana fuayesi, başlangıçta elektrik üretim ve dağıtım amacıyla inşa edilmiş olan 1929 tarihli bir trafo istasyonunun yeniden işlevlendirilmesiyle oluşturulmuştur (Şekil 45). Bu tarihi yapı, yalnızca konser salonunun giriş mekanı olarak değil, aynı zamanda şehir kütüphanesinin yeni bir şubesi olarak da hizmet vermektedir (Gasteig, n.d.). Konser salonu, çok amaçlı etkinliklerin (pop konserleri, film gösterimleri, kongreler vb.) gerçekleştirilebileceği bir kültür merkezi olarak planlanmıştır (GMP Architekten, 2021).



Şekil 45. Hall E (Esch, n.d.)

Yaklaşık 1956 kişilik oturma kapasitesine ve 19.000 m³ hacme sahip olan konser salonu, modüler ve sökülebilir özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Yapının dış kabuğu, standart endüstriyel sistemlerle oluşturulmuş çelik taşıyıcı konstrüksiyondan; iç konser salonu ise çapraz lamine ahşap (CLT) panellerden inşa edilmiş bağımsız bir kutu yapıdan meydana getirilmiştir (GMP Architekten, 2021). Bu düzenleme ile akustik hacim, dış taşıyıcı sistemden ayrıştırılmış ve yapısal titreşimlerin iç mekana iletimi engellenmiştir (Schoof, 2021) (Şekil 46).



Şekil 46. Isarphilharmonie konser salonu ve Hall E ilişkisi (Gasteig, n.d.)

İç mekan tasarımı, Yasuhisa Toyota ve Nagata Acoustics danışmanlığında gerçekleştirilmiştir (Schoof, 2021). Tüm oturma noktaları, sahneden maksimum 33 metre uzaklıkta olacak şekilde tasarlanmış olup, yakınlık hissi desteklenmiştir (Gasteig, n.d.). Duvar ve tavan yüzeylerinde çapraz lamine ahşap (CLT) ve kontrplak çıtalar (plywood battens) kullanılmıştır. Yüzeylere entegre edilmiş ölçeklendirilmiş kütle derinlikleri sayesinde ses yansımalarının saçılarak iletilmesi amaçlanmıştır (Schoof, 2021) (Şekil 47).



Şekil 47. Isarphilharmonie konser salonu (Gasteig, n.d.)

Zemin kaplaması, seyirci alanında çok katmanlı parke (wood over GF boards), sahne alanında ise Alaska sarı sediri (Alaskan Yellow Cedar) malzemeleriyle tamamlanmıştır (Nagata Acoustics, 2021).

Sahne, 11 metre derinliğe ve 220 m² yüzey alanına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Mekanik sistemler aracılığıyla sahne derinliği, 13.90 metreye kadar uzatılabilmektedir. Sahne arkası alanlar; teslimat noktaları, soyunma odaları ve ısınma alanları ile desteklenmiştir (Gasteig, n.d.) (Şekil 47).

Konser salonunun 500 Hz frekans bandındaki reverberasyon süresi (T30), boş durumda 2.1 sn., dolu durumda ise 1.8 sn. olarak belirtilmiştir (Nagata Acoustics, 2021). Yapıya ait temel teknik bilgiler aşağıda yer alan Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Konser salonu detayları ve akustik bilgileri (Nagata Acoustics, 2021)

Konum	Hans-Preißinger-Straße 8 81379 München, Germany			
Kapasite	1956			
Hacim	19000 m ³			
RT(500 Hz)	Boş Salon	2.1 sn.	Dolu Salon	1.8 sn.
Bitirme Malzemeleri				
Tavan	Çapraz Lamine Ahşap (Cross Laminated Timber - CLT)			
Duvarlar	CLT ve Kontrplak Çıtalar (CLT + Plywood Battens)			
Seyirci Alanı Zemini	Çok Katmanlı Zemin Kaplaması (Wood over GF Boards)			
Sahne Zemini	Alaska Sarı Sediri (Alaskan Yellow Cedar)			

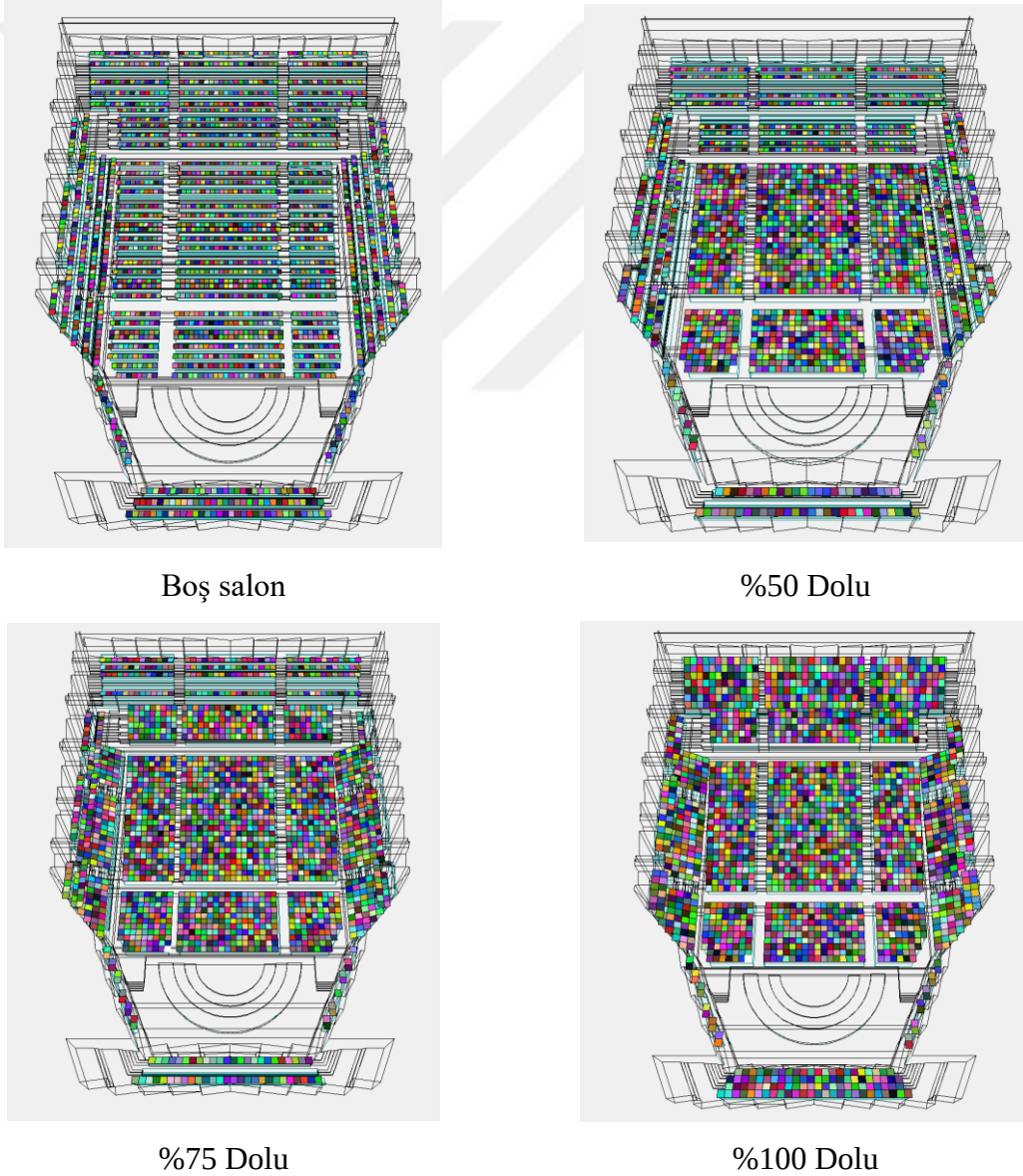
2.1. Konser Salonuna Ait Kabuller ve Kalibrasyon İşlemi

Çalışma kapsamında; konser salonuna ait kaplama malzemeleri, birleştirilmiş hacimler, iki hacim arasındaki geçişi sağlayan kapıların açıklık oranları, sahneye yerleştirilen ses kaynağı ve salondaki dinleyiciler ile ilgili kabuller yapılmıştır.

Ses Kaynağı ve Alıcılara İlişkin Kabuller:

1. Ses kaynağı olarak Omni.SO8 kullanılmış ve tüm senaryolarda ses kaynağının bulunduğu koordinatlar sabit tutulmuştur. Sahne zemininden 1.20 m yüksekliğe konumlandırılmıştır.
2. Salonun boş olduğu senaryoda, alıcı konumları zeminden 1.20 m yükseklikte olacak şekilde tanımlanmış; mevcut koltuk düzenine en yakın yerleşimi sağlamak amacıyla 0.52 × 0.52 m boyutlarında grid yüzeyleri oluşturulmuştur (Şekil 48).

3. Salonun %50 dolu olduğu senaryoda, alıcı konumları zeminden 1.60 m yükseklikte olacak şekilde tanımlanmış; mevcut koltuk düzenine en yakın yerleşimi sağlamak amacıyla 0.62×0.62 m boyutlarında grid yüzeyleri oluşturulmuştur (Şekil 48).
4. Salonun %75 dolu olduğu senaryoda, alıcı konumları zeminden 1.60 m yükseklikte olacak şekilde tanımlanmış; mevcut koltuk düzenine en yakın yerleşimi sağlamak amacıyla 0.65×0.65 m boyutlarında grid yüzeyleri oluşturulmuştur (Şekil 48).
5. Salonun %100 dolu olduğu senaryoda, alıcı konumları zeminden 1.60 m yükseklikte olacak şekilde tanımlanmış; mevcut koltuk düzenine en yakın yerleşimi sağlamak amacıyla 0.69×0.69 m boyutlarında grid yüzeyleri oluşturulmuştur (Şekil 48).



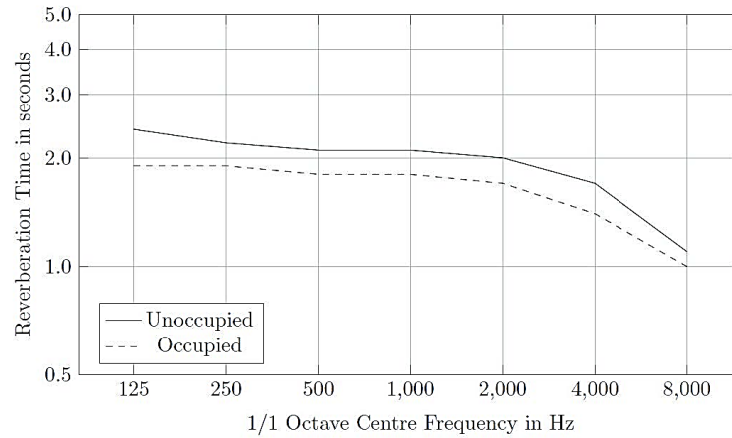
Şekil 48. Doluluk oranlarına ait grid görünümü

Yüzey Malzemelerine İlişkin Kabuller: Mevcut projede kullanılan ve ses yutma katsayıları en uygun malzemeler, Odeon Combined Version 10.1 simülasyon programına ait malzeme kütüphanesinden seçilmiştir (Tablo 4) (Christensen & Koutsouris, 2013). Bu malzeme kütüphanesinde bulunmayan malzemeler, bilimsel literatür araştırması yapılarak malzeme listesine eklenmiştir. Yüzeyle atanan her malzemenin 63-8000 Hz oktav bandındaki ses yutma katsayıları veri olarak program kütüphanesine eklenmiştir.

Tablo 4. Modelde kullanılan malzemeler

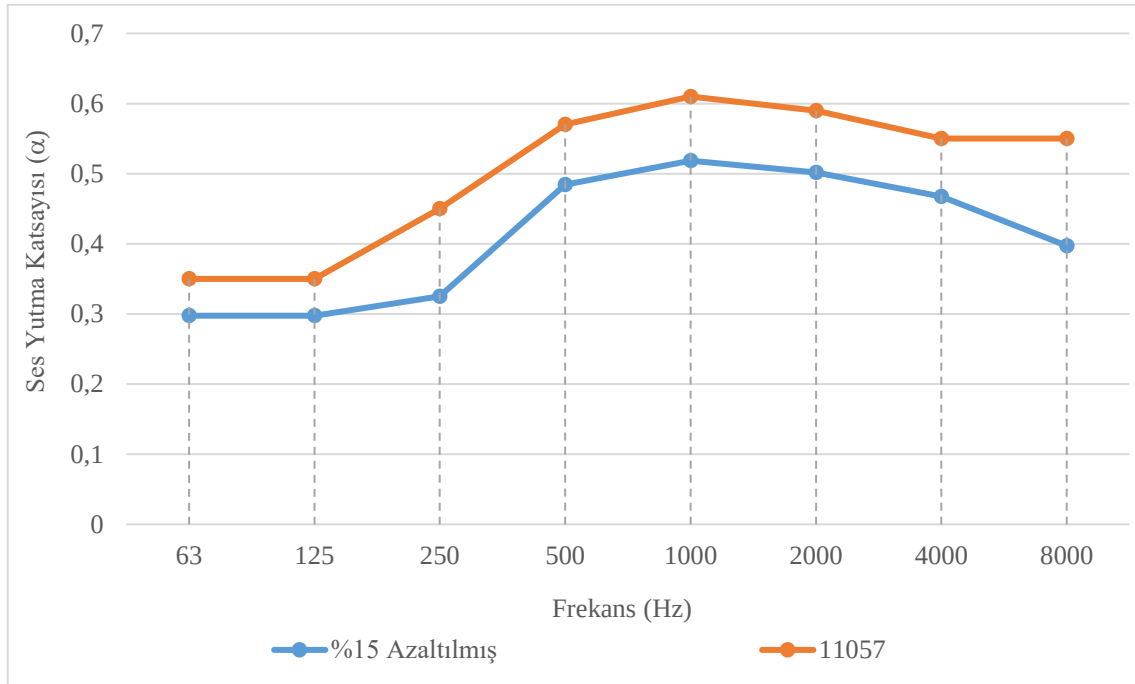
Yüzey	Malzeme	Kod	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
Duvar	25 mm hava boşluklu ahşap	3065	0.19	0.19	0.14	0.09	0.06	0.06	0.06	0.06
Tavan	CLT panel	(Gewerbemuseum, 2012)	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05
Sahne	Ahşap döşeme	3004	0.15	0.15	0.11	0.1	0.07	0.06	0.07	0.07
Zemin	Yüzer ahşap döşeme	3001	0.1	0.1	0.07	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06
Koltuk	Hafif döşemeli konser salonu koltukları	11057	0.29	0.29	0.32	0.48	0.51	0.50	0.46	0.39

Kalibrasyon: Konser salonunun akustik tasarımından sorumlu Nagata Akustik ile yapılan görüşmeler sonucunda elde edilen reverberasyon süresi grafiği Şekil 49’ da verilmiştir. Grafikte yer alan boş durum verileri, salonda gerçekleştirilen ölçümlerle elde edilmiş olup, dolu durum reverberasyon süresi ise bu veriler temel alınarak hesaplanmıştır. Bu doğrultuda, salona ait boş durum reverberasyon süresi grafiği kalibrasyon sürecinde referans olarak kullanılmıştır.



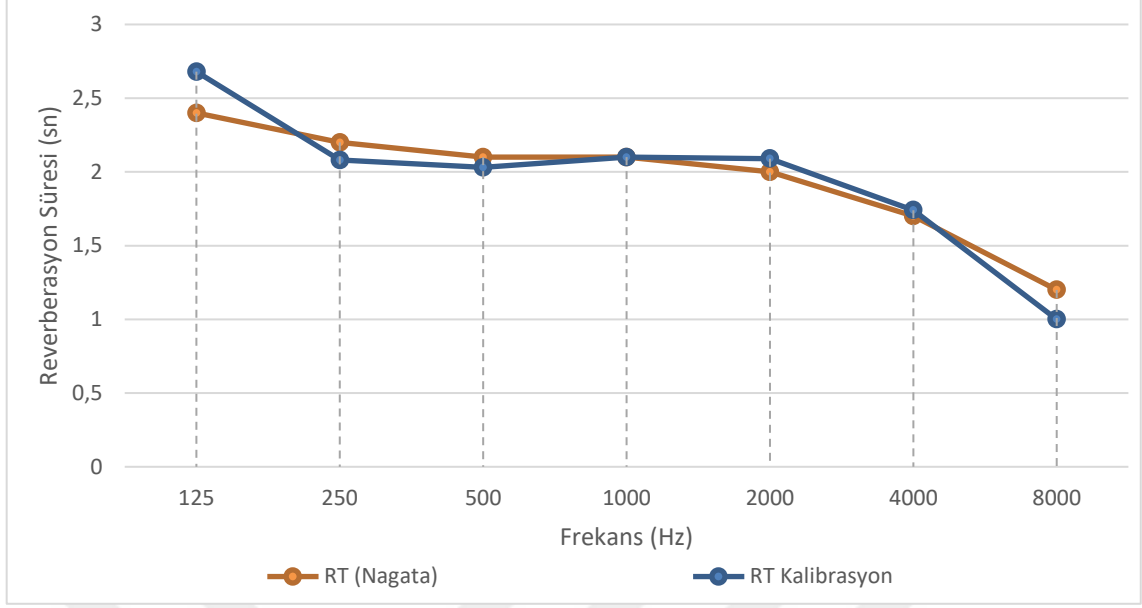
Şekil 49. Isarphilarmonie Konser Salonuna ait RT süreleri (Nagata Acoustics, 2021)

Sabine formülüne göre, reverberasyon süresinde bir değişiklik sağlamak için salon hacmi, malzemelerin ses yutma katsayıları ve yüzey alanlarından en az birinin değiştirilmesi gerekmektedir. Ancak, salon hacmi ve yüzey alanlarının sabit olduğu durumlarda, en uygun yöntem ses yutma katsayılarının değiştirilmesidir. Bu doğrultuda, salonda geniş bir alanı kaplayan ve reverberasyon süresi üzerinde önemli bir etkiye sahip olan koltuk kaplamaları, değişiklik yapılacak en uygun malzeme olarak belirlenmiştir. Koltuk için kullanılan malzemenin ilk hali ve son haline ait ses yutma katsayı grafikleri Şekil 50’de verilmiştir.



Şekil 50. Koltuk malzemesinin kalibrasyon için düzenlenmiş katsayı değerleri

Reverberasyon süresinin kalibrasyonu için JND (en küçük fark edilebilir değişim) genellikle 5% olarak kabul edilmektedir (Bork, 2000; ISO 3382-1, 2009). Koltuk malzemesine ait ses yutma katsayı değerlerinde yapılan değişiklik sonrası elde edilen reverberasyon süreleri her frekansta bu oranı sağlayacak şekilde gerçekleşmiştir. Bu sürecin sonunda Şekil 51’deki “RT Kalibrasyon” eğrisi elde edilmiş olup, çalışmanın tüm aşamalarında bu eğride yer alan değerler referans alınmıştır.



Şekil 51. Mevcut ve kalibrasyon sonucu elde edilen RT değerleri

Yankı Odaları, Kapı Açıklıkları ve Malzemelere İlişkin Kabuller: Birleştirilmiş hacimli sistemler, genellikle ses geçişine olanak tanıyan ‘birleştirme açıklıkları’ aracılığıyla birbirine bağlanan birden fazla hacimden oluşmaktadır (Bradley & Wang, 2005). Bu sistemlerde salondaki akustik koşulları etkileyen başlıca üç temel değişken;

1. Eklenen odaların hacimleri,
2. Ses geçişini sağlayan açıklıkların oranları,
3. Yankı odalarında kullanılan iç yüzey malzemeleridir.

Literatürde yer alan çalışmalar ve mevcut konser salonu örnekleri incelendiğinde, genellikle ana salon hacminin %20’si ile %50’si oranındaki hacimlerin ana salon hacmine eklendiği görülmektedir. Çalışma kapsamında, hacimlerin salondaki akustik ortama olan etkilerinin araştırılması amacıyla %20, %35 ve %50 olmak üzere üç farklı oran belirlenmiştir. Modelleme sonucunda ana salon hacmi 20.000 m³ olarak elde edilmiş, yankı odaları ise sırasıyla 4.000 m³, 7.000 m³ ve 10.000 m³ olarak tanımlanmıştır.

Modelleme sonucunda salonun toplam iç yüzey alanı 6.450 m² olarak hesaplanmıştır. Salona ait ana hacim ve buna eklenen hacimlerle bağlantıyı sağlayan açıklıklar, maksimum yüzey alanından yararlanılacak şekilde birinci ve ikinci balkonların arka duvarlarına konumlandırılmıştır. Açıklıkların toplam yüzey alanı, ana hacmin iç yüzey alanının %6’sı olarak belirlenmiş ve bu oran doğrultusunda açıklıkların toplam alanı 387 m² olarak

hesaplanmıştır. Mevcut salon tasarımından yola çıkarak her biri 6.04 m² büyüklüğünde 64 kapı yerleştirilmiş olup belirlenen toplam yüzey alanı sağlanmıştır.

Salondaki reverberasyon süresini artırmanın en etkili yollarından biri, yansıtıcı yüzey alanının artırılmasıdır. Bunun yanı sıra, ana hacme eklenen hacimlerde meydana gelen uzun süreli yankılanmalar, ses enerjisinin salonda daha yavaş sönümlenmesine neden olarak akustik algıyı etkilemektedir. Bu etkinin incelenebilmesi için, ek hacimlerin iç yüzeylerine farklı ses yutuculuk katsayılarına sahip üç ayrı malzeme uygulanmıştır(Tablo 5).

Tablo 5. Birleştirilmiş hacmin iç yüzeyinde kullanılan malzemeler

Yüzey	Malzeme Adı	Kod	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
1. Malzeme	Ahşap	3065	0.19	0.14	0.09	0.06	0.06	0.05	0.05
2. Malzeme	Pürüzsüz beton	102	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
3. malzeme	Alçıpan levha	4042	0.08	0.11	0.05	0.03	0.02	0.03	0.03

Farklı doluluk oranlarına sahip salon senaryolarına ek olarak, hacim, açıklık oranı ve malzeme değişkenleri ile elde edilen tüm senaryo kombinasyonları modellenip, simülasyon programına aktarılmıştır. Belirlenen tüm senaryoların simülasyonlarından elde edilen sesin nesnel parametrelerine ait değerler analiz edilmiştir. Salonun mevcut durumu ve akustik düzenlemeler sonucunda ortaya çıkan senaryolar Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Çalışma kapsamında incelenen tüm senaryolar

No	Senaryo	Kod
1.	Seyirci alanı boş durum (Mevcut durum)	
2.	Seyirci alanının %50 dolu olduğu durum	
3.	Seyirci alanının %75 dolu olduğu durum	
4.	Seyirci alanının %100 dolu olduğu durum	
5.	Ahşap Malzeme - %20 Ek Hacim - %25 Açık Kapı	%20 Ahşap %25 açık
6.	Ahşap Malzeme - %20 Ek Hacim - %50 Açık Kapı	%20 Ahşap %50 açık
7.	Ahşap Malzeme - %20 Ek Hacim - %75 Açık Kapı	%20 Ahşap %75 açık
8.	Ahşap Malzeme - %20 Ek Hacim - %100 Açık Kapı	%20 Ahşap %100 açık
9.	Ahşap Malzeme - %35 Ek Hacim - %25 Açık Kapı	%35 Ahşap %25 açık
10.	Ahşap Malzeme - %35 Ek Hacim - %50 Açık Kapı	%35 Ahşap %50 açık
11.	Ahşap Malzeme - %35 Ek Hacim - %75 Açık Kapı	%35 Ahşap %75 açık
12.	Ahşap Malzeme - %35 Ek Hacim - %100 Açık Kapı	%35 Ahşap %100 açık
13.	Ahşap Malzeme - %50 Ek Hacim - %25 Açık Kapı	%50 Ahşap %25 açık
14.	Ahşap Malzeme - %50 Ek Hacim - %50 Açık Kapı	%50 Ahşap %50 açık
15.	Ahşap Malzeme - %50 Ek Hacim - %75 Açık Kapı	%50 Ahşap %75 açık
16.	Ahşap Malzeme - %50 Ek Hacim - %100 Açık Kapı	%50 Ahşap %100 açık

Tablo 6'nın devamı

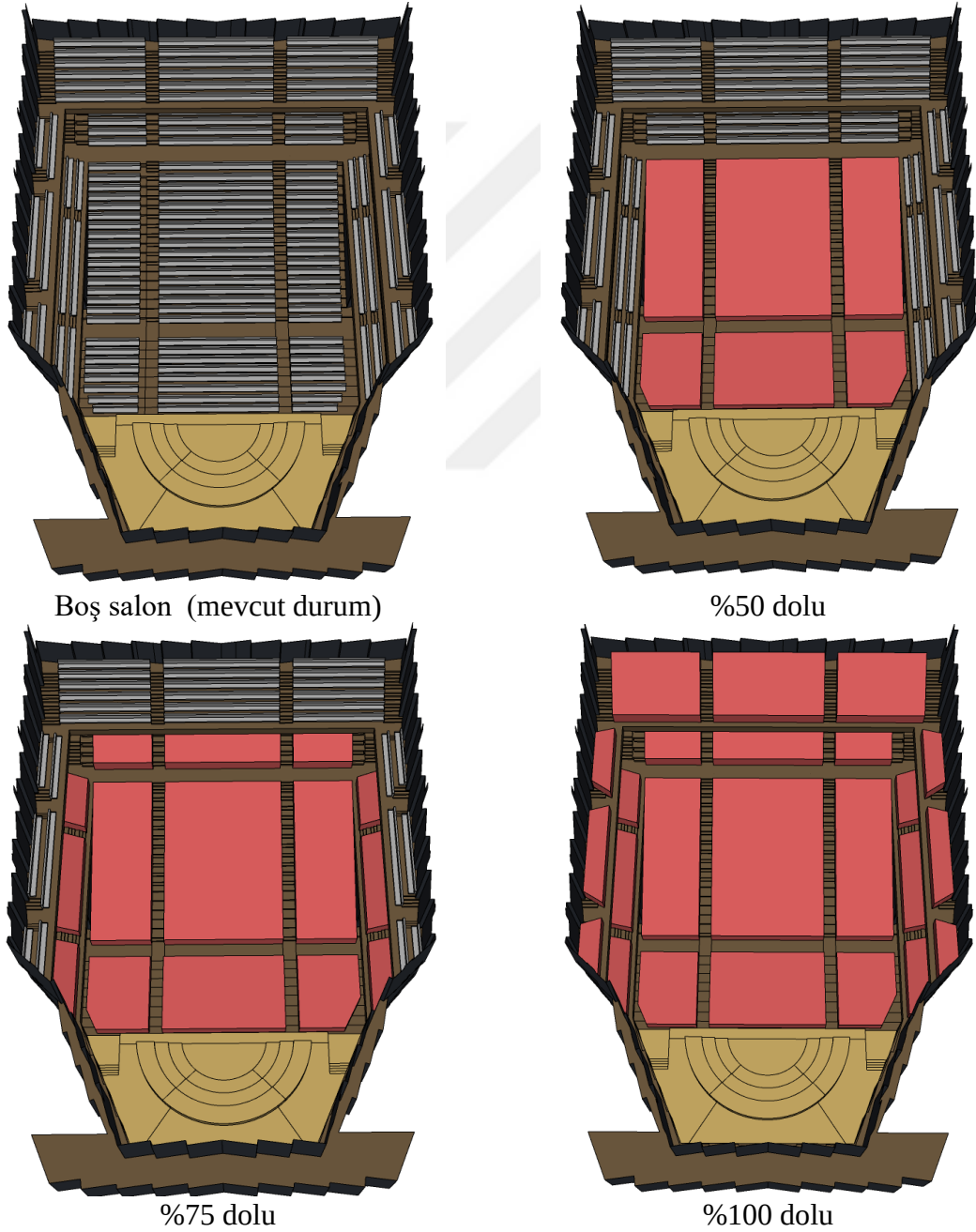
17.	Beton Malzeme - %20 Ek Hacim - %25 Açık Kapı	%20 Beton %25 açık
18.	Beton Malzeme - %20 Ek Hacim - %50 Açık Kapı	%20 Beton %50 açık
19.	Beton Malzeme - %20 Ek Hacim - %75 Açık Kapı	%20 Beton %75 açık
20.	Beton Malzeme - %20 Ek Hacim - %100 Açık Kapı	%20 Beton %100 açık
21.	Beton Malzeme - %20 Ek Hacim - %25 Açık Kapı	%35 Beton %25 açık
22.	Beton Malzeme - %20 Ek Hacim - %50 Açık Kapı	%35 Beton %50 açık
23.	Beton Malzeme - %20 Ek Hacim - %75 Açık Kapı	%35 Beton %75 açık
24.	Beton Malzeme - %20 Ek Hacim - %100 Açık Kapı	%35 Beton %100 açık
25.	Beton Malzeme - %50 Ek Hacim - %25 Açık Kapı	%50 Beton %25 açık
26.	Beton Malzeme - %50 Ek Hacim - %50 Açık Kapı	%50 Beton %50 açık
27.	Beton Malzeme - %50 Ek Hacim - %75 Açık Kapı	%50 Beton %75 açık
28.	Beton Malzeme - %50 Ek Hacim - %100 Açık Kapı	%50 Beton %100 açık
29.	Alçıpan Malzeme - %20 Ek Hacim - %25 Açık Kapı	%20 Alçıpan %25 açık
30.	Alçıpan Malzeme - %20 Ek Hacim - %50 Açık Kapı	%20 Alçıpan %50 açık
31.	Alçıpan Malzeme - %20 Ek Hacim - %75 Açık Kapı	%20 Alçıpan %75 açık
32.	Alçıpan Malzeme - %20 Ek Hacim - %100 Açık Kapı	%20 Alçıpan %100 açık
33.	Alçıpan Malzeme - %35 Ek Hacim - %25 Açık Kapı	%35 Alçıpan %25 açık
34.	Alçıpan Malzeme - %35 Ek Hacim - %50 Açık Kapı	%35 Alçıpan %50 açık
35.	Alçıpan Malzeme - %35 Ek Hacim - %75 Açık Kapı	%35 Alçıpan %75 açık
36.	Alçıpan Malzeme - %35 Ek Hacim - %100 Açık Kapı	%35 Alçıpan %100 açık
37.	Alçıpan Malzeme - %50 Ek Hacim - %25 Açık Kapı	%50 Alçıpan %25 açık
38.	Alçıpan Malzeme - %50 Ek Hacim - %50 Açık Kapı	%50 Alçıpan %50 açık
39.	Alçıpan Malzeme - %50 Ek Hacim - %75 Açık Kapı	%50 Alçıpan %75 açık
40.	Alçıpan Malzeme - %50 Ek Hacim - %100 Açık Kapı	%50 Alçıpan %100 açık

2.2. Doluluk Oranına Göre Oluşturulan Senaryolar

Dinleyiciler, konser salonunda en yüksek ses yutuculuğuna sahip olan yüzeyi oluşturmaktadır. Dinleyici alanındaki toplam ses yutuculuk değerleri, yalnızca koltuk sayısı ile değil aynı zamanda kapladığı toplam alanla da doğrudan ilişkilidir (Beranek, 1996). Öte yandan, konser salonlarında orkestra provaları genellikle boş salonda gerçekleştirilmektedir. Etkinlikler ise salonda oluşan farklı doluluk oranlarında icra edilmektedir. Bu nedenle, salonun doluluk oranı akustik performansı etkileyen önemli bir değişken olarak değerlendirilmelidir.

Mevcut salonun doluluk oranlarına göre dört farklı senaryo oluşturulmuştur. Isarpilarmonie Konser Salonunun doluluk oranına göre oluşturulan bu senaryolar; dinleyici alanlarının boş olduğu, dinleyici alanlarının %50 dolu olduğu, dinleyici alanlarının %75 dolu olduğu ve dinleyici alanlarının %100 dolu olduğu durumlar olarak tanımlanmıştır (Şekil 52).

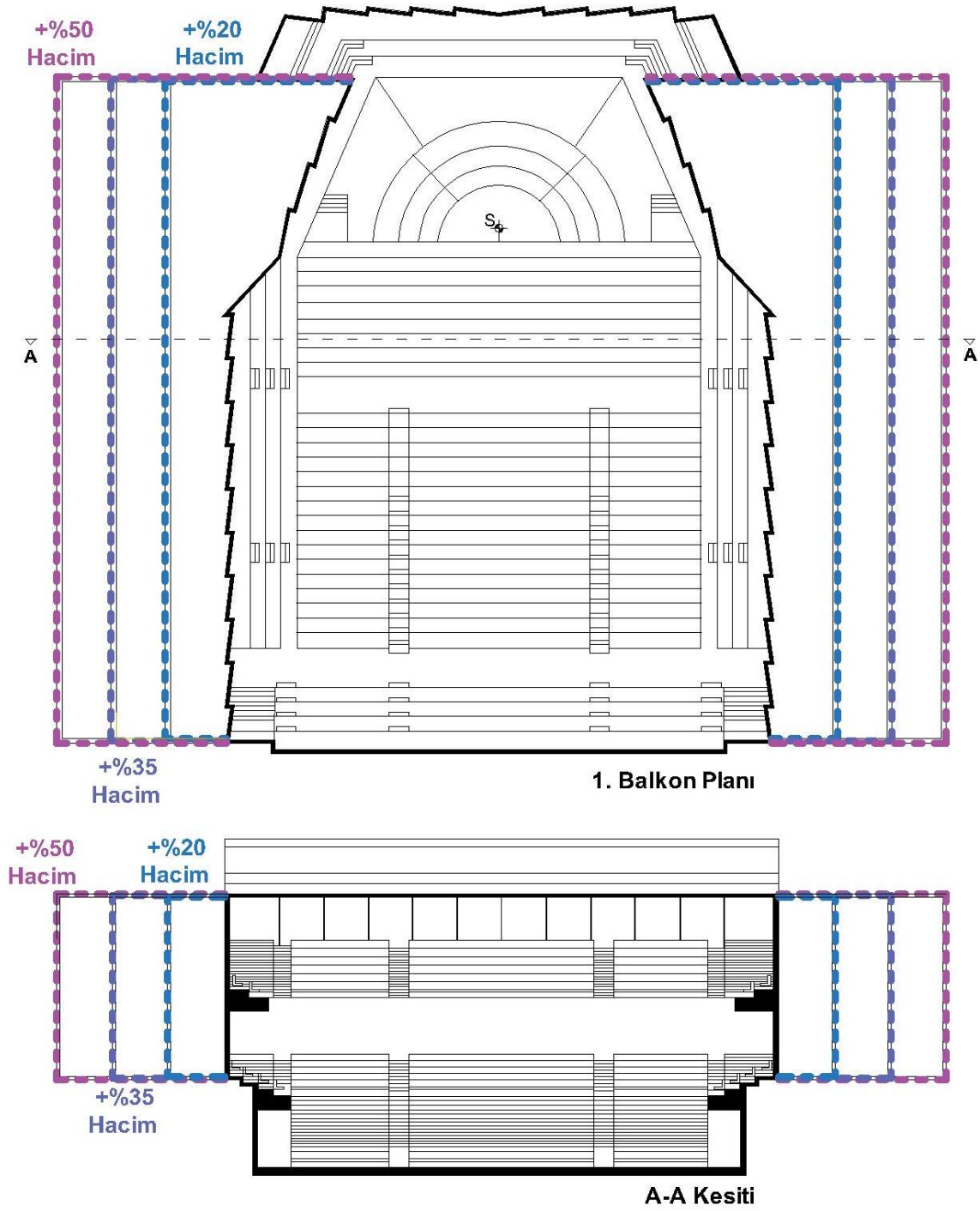
Isarphilarmonie Konser Salonu için doluluk oranlarına ait 3D modellemelerin tamamı Şekil 52’de verilmiştir. Salonun mevcut oturma düzeni planına göre parter bölümündeki koltuklar, toplam dinleyici sayısının yarısını oluşturmaktadır. Bu nedenle %50 doluluk oranında; sadece parter bölümünde ve tam kapasite dinleyici olacak şekilde düzenlenme gerçekleştirilmiştir. %75 doluluk oranı için parter bölümüne birinci balkondaki dinleyiciler dahil edilmiştir. Tam dolu durumda; ikinci balkon ve sahne arkasındaki oturma alanı da dahil edilerek senaryolar oluşturulmuştur.



Şekil 52. Isarphilarmonie Konser Salonunun doluluk oranlarına göre oluşturulan senaryolar

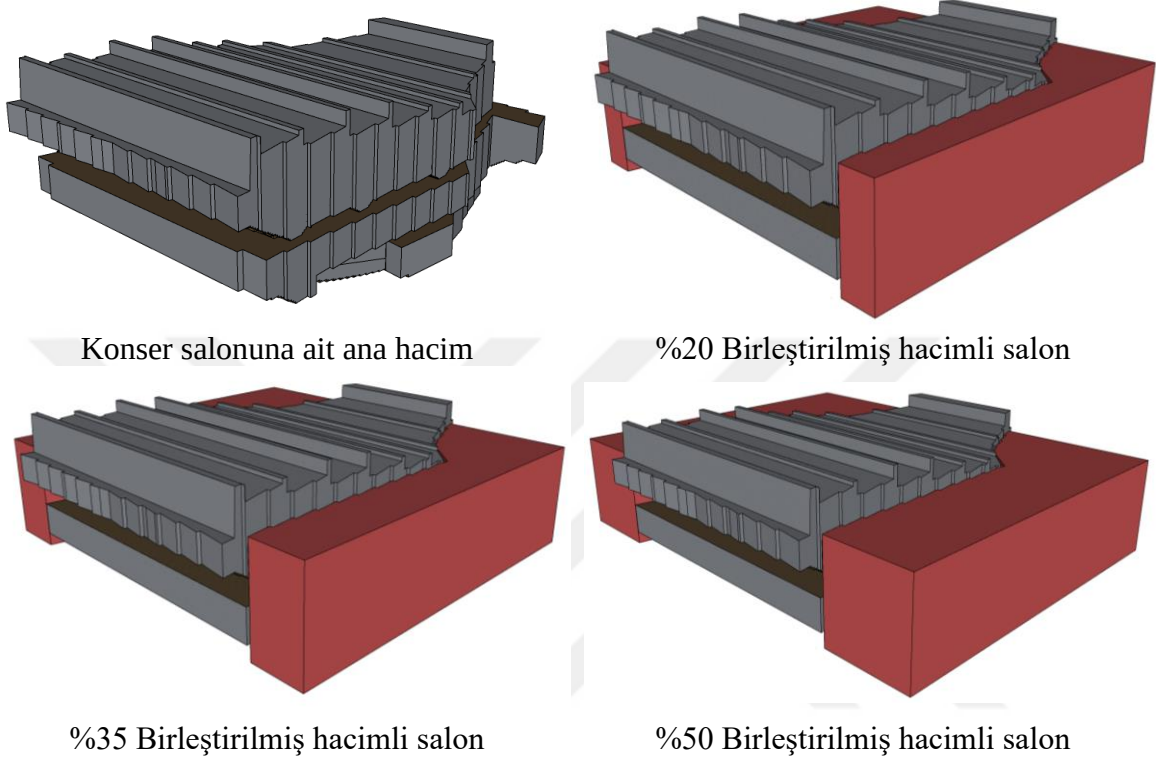
2.3. Birleştirilmiş Hacim Oranlarına Göre Oluşturulan Senaryolar

“2.1. Konser Salonuna Ait Kabuller ve Kalibrasyon İşlemi” başlığında da ifade edildiği üzere, mevcut konser salonuna sırasıyla %20, %35 ve %50 oranlarında olmak üzere üç farklı hacim ilave edilmiştir (Şekil 53).



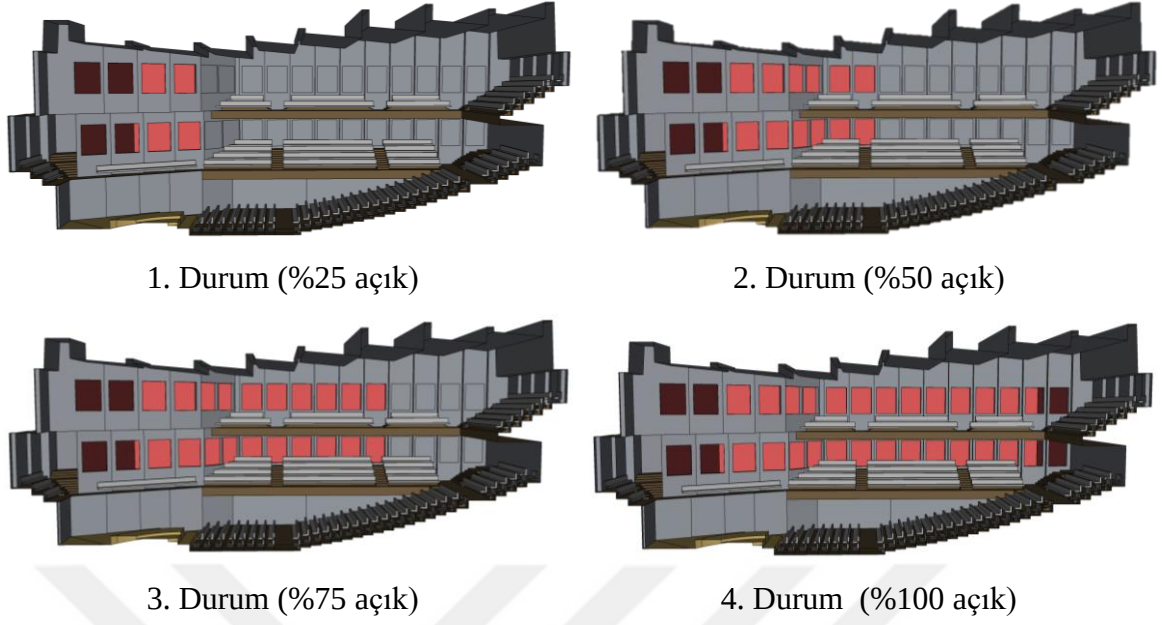
Şekil 53. Birleştirilmiş hacimlerin plan ve kesit düzlemindeki konumu

Söz konusu hacim oranları, “1.8.1.5. Birleştirilmiş Hacimli Konser Salonu Örnekleri” başlığı altında değerlendirilen mevcut konser salonları ve çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalardan elde edilen veriler doğrultusunda belirlenmiştir (Şekil 54).



Şekil 54. Birleştirilmiş hacimlerin konser salonunun ana hacmi ile olan ilişkileri

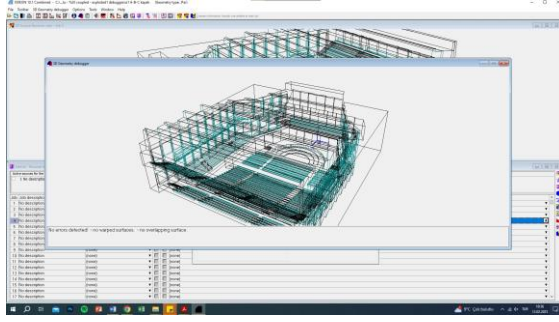
Ana hacim ile birleştirilmiş hacim arasındaki bağlantıyı sağlayan açıklıkların oranları değişken olarak belirlenmiştir. Boş salonun toplam yüzey alanı 6450 m² olarak hesaplanmıştır. Salonun yerleşim planı ve mimari tasarımı dikkate alındığında, 387 m²'lik kapı alanı 64 eşit kapıya bölünmüştür. Açıklıkların toplam boyutu, ana hacmin iç yüzey alanının %6'sı olarak tanımlanmıştır. Açıklık oranları ise toplam kapı alanının %25'i, %50'si, %75'i ve %100'ü olacak şekilde belirlenmiş olup, kapılar sahneye en yakın alandan başlayarak en uzak alana kadar kademeli olarak açılmıştır (Şekil 55). Tüm bunlara ek olarak birleştirilmiş hacimlerin iç yüzeylerinde üç farklı malzeme uygulanmıştır.



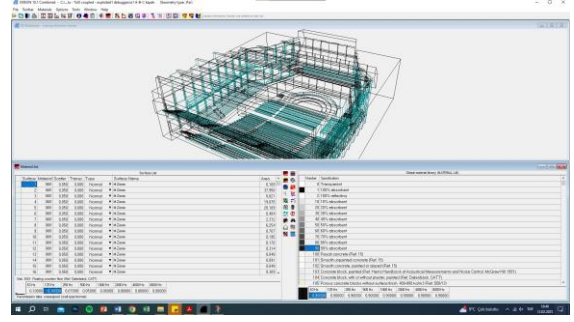
Şekil 55. Birleştirilmiş hacim senaryolarında açıklık oranları

2.4. Programın Çalıştırılması

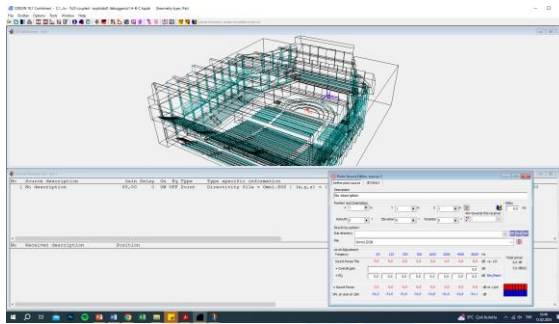
Çalışma kapsamında incelenen konser salonuna ait mevcut durum ve bununla birlikte oluşturulan toplam 40 senaryoya ait 3D modeller Sketchup 2020 programında hazırlanmıştır. Hazırlanan modeller, .dxf dosya formatında kaydedilip, Odeon V10 programının içine aktarılmıştır. “3D Geometry Debugger” komutu kullanılarak tüm modellerde yüzey sorunlarının olup olmadığı kontrol edilmiştir. Modelde herhangi bir yüzey problemi olmadığı görüldükten sonra, her bir yüzey için belirlenen malzeme ataması yapılmıştır. Daha sonra ses kaynağının sahneye konumlandırılmıştır. Ses dalgalarının hacim dışına çıkıp çıkmadığı “3D Investigate Rays” komutuyla kontrol edildikten sonra seyirci alanları grid komutuyla tanımlanmış, yaklaşık 2000 kişilik bir kapasiteyi karşılayacak şekilde koltuk yerleri belirtilmiştir. Tüm senaryolar için hazırlanan modellere ait simülasyonlar çalıştırılmadan önce “Global Estimate” komutu ile tahmini reverberasyon süreleri hesaplanmış olup, room setup sekmesinde gerekli değerler girilmiştir. Bu adımlar sonucunda, simülasyon programı çalıştırılarak Isarphilarmonie Konser Salonu ile oluşturulan tüm senaryolara ait sesin nesnel parametre değerleri elde edilmiştir. Konser salonu modellerinin Odeon V10 programındaki ayarlama aşamalarına ait ekran görüntüleri Şekil 56’da verilmiştir.



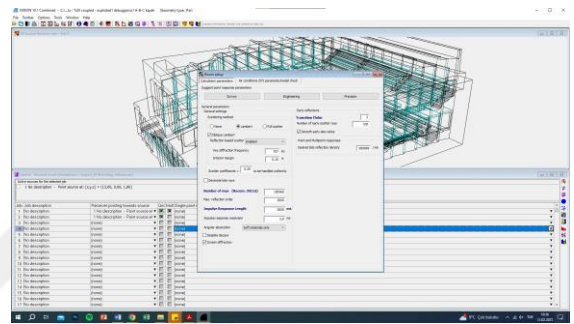
3D geometry debugger



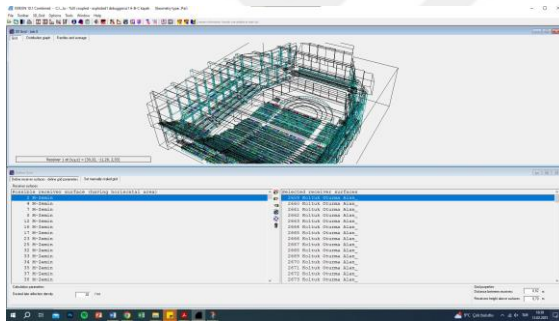
Malzeme atama



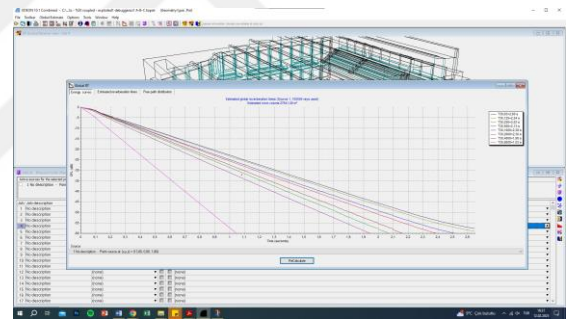
Ses kaynağı atama



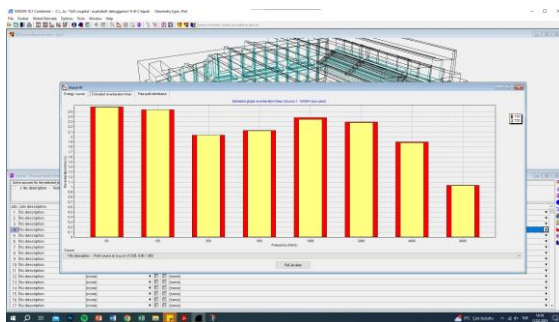
3D investigate rays



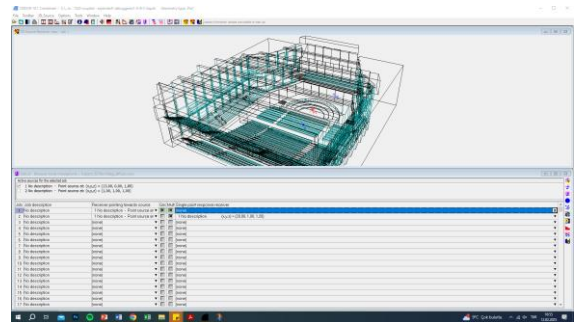
Seyirci alanında “Grid” tanımlama



Global estimate-SPL grafikleri



Global estimate-tahmini T30 süreleri



Akustik hesaplama

Şekil 56. Simülasyon aşamalarına ait görseller

2.5. Sesin Nesnel Parametrelerine Yönelik Kabuller

Çalışma kapsamında, Isarphilarmonie Konser Salonunun ait senaryoların ODEON V10 programındaki simülasyonları sonucunda sesin nesnel parametrelerine ait değerler elde edilmiştir. Bu nesnel parametreler, T30 (Reverberasyon süresi), EDT (Erken düşme süresi), D50 (Ayırt edilebilirlik), C80 (Netlik), LF80 (Erken yanal ses oranı), STI (Ses iletim indeksi), BR (Bas oranı) ve TR (Tiz oranı)'dır.

Bilimsel çalışmalar incelendiğinde konser salonlarının tasarımında kullanılan sesin nesnel parametrelerine ait optimum aralıkların, genel konser etkinliği için ayrı, farklı müzik türleri için ayrı şekilde belirlendiği ortaya konulmuştur.

Tablo 7'de genel konser etkinliği için farklı otoriteler tarafından önerilen reverberasyon sürelerine ait optimum değer aralıkları yer almaktadır. Çalışma kapsamında genel değerlendirmede kullanılan değer aralıkları yıldız ile belirtilmiştir.

Tablo 7. Müzik türünden bağımsız olarak belirtilmiş parametre değerleri

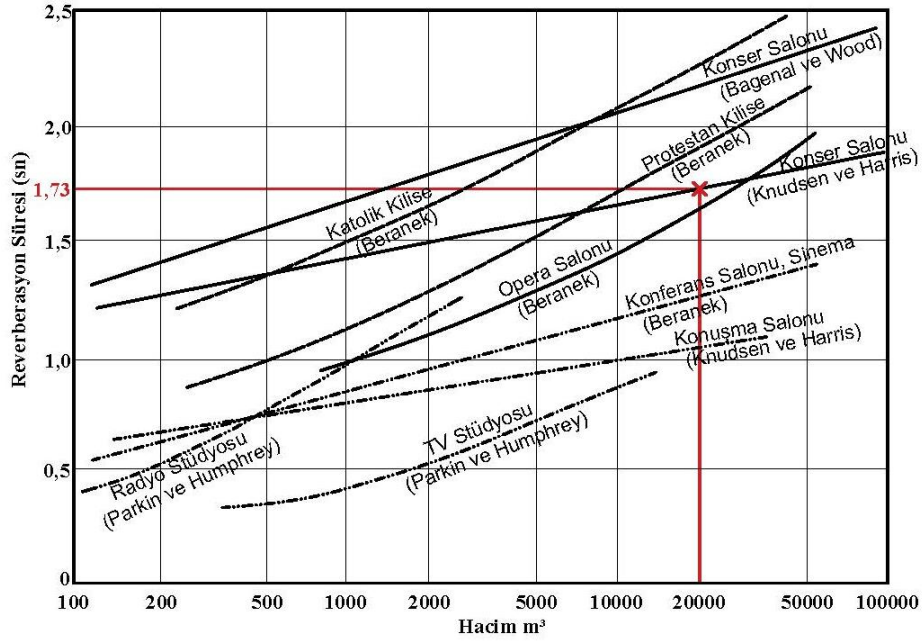
RT (sn)	Kaynak	Notlar
$1.8 \leq T30 \leq 2.2$	Everest & Pohlmann, 2022	Orta frekanslarda
$1.7 \leq T30 \leq 2.3$	Christensen & Koutsouris, 2013	
C80 (dB)		
$-3 \leq C80 \leq +3$	Höhne ve Schroth, 1995	
$-2 \leq C80 \leq +2$	Barron, 1993*	500-1000 Hz
$-4 \leq C80 \leq +1$	Mehta vd., 1999	
$-1 \leq C80 \leq +3$	Christensen & Koutsouris, 2013	
$-4 \leq C80 \leq +1$	Everest & Pohlmann, 2022	500, 1.000 ve 2.000 Hz
$0 \leq C80 \leq +4$	Long, 2006	
$-5 \leq C80 \leq +5$	ISO 3382-1:2009*	500-1000 Hz 25000 m ³
$-3 \leq C80 \leq 0$	Kahle Acoustics, 2006	Seyircisiz
EDT (sn)		
$1.0 \leq EDT \leq 3.0$	Maekawa vd., 2011	500-1000 Hz 25000 m ³
$1.8 \leq EDT \leq 2.2$	Barron, 1993	500-1000 Hz
$1.7 \leq EDT \leq 2.3$	Christensen & Koutsouris, 2013	
LF80		
$0.05 \leq LF80 \leq 0.35$	Maekawa vd., 2011	500-1000 Hz 25000 m ³
$LF80_{ort} > 0.16$	Kahle Acoustics, 2006	
$0.1 \leq LF80 \leq 0.35$	Long, 2006	
$LF80 \geq 0.25$	Christensen & Koutsouris, 2013	
$0.1 \leq LF80 \leq 0.35$	Barron, 1993	

Tablo 7'nin devamı

$0.05 \leq LF80 \leq 0.35$	ISO 3382-1:2009*	
$0.10 \leq LF80 \leq 0.25$	Ahnert & Tennhardt, 2008	
BR		
T30 ≥ 1.8 sn, ise; $1.1 \leq BR \leq 1.25$ T30 < 1.8 sn, ise; $1.0 \leq BR \leq 1.45$	Inacio, 2022; Arau, 1999*	
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 iyi	(Houtgast, Steeneken, & Plomp, 1980)*	

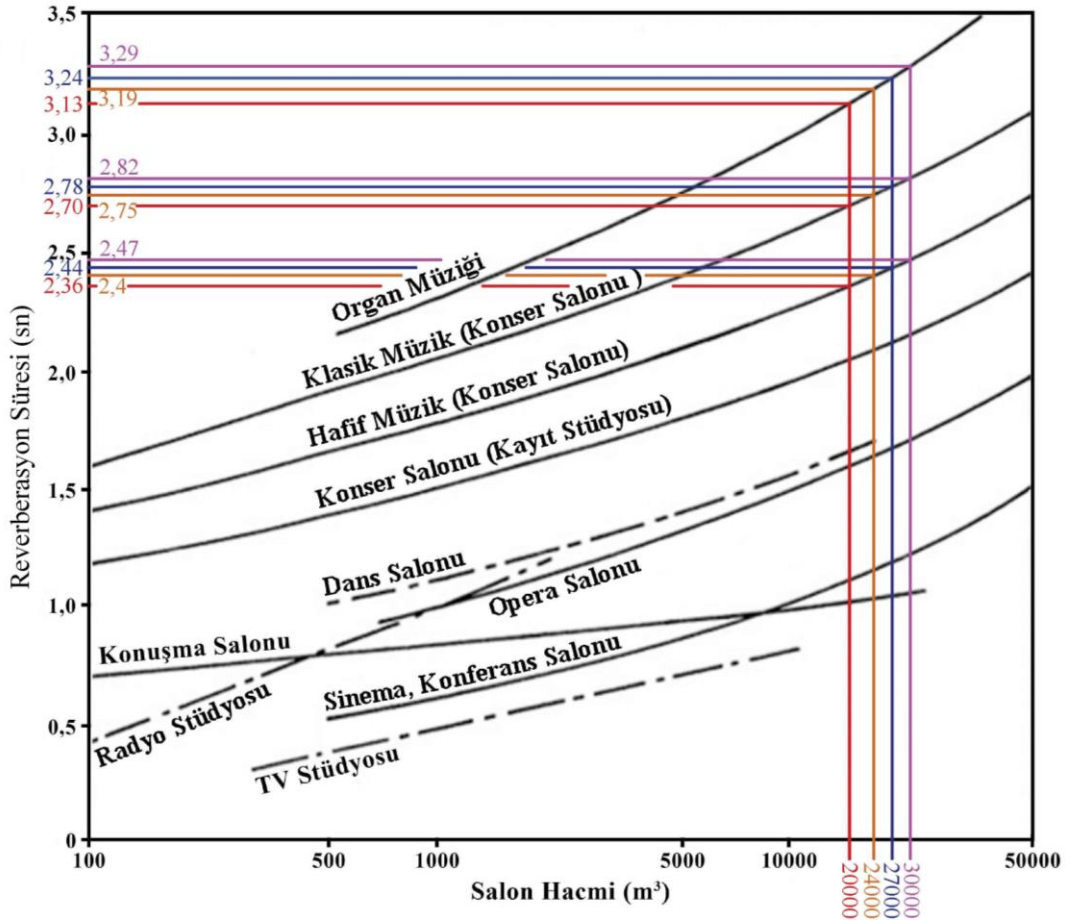
Isarphilarmonie Konser Salonunda oluşturulan senaryoların değerlendirilmesi:

T30'a (reverberasyon süresi) ait optimum değer aralığının belirlenmesi için, Knudsen ve Harris'in 500 Hz oktav bandında verilen reverberasyon süresi-hacim ilişkisi grafiği kullanılmıştır (Şekil 57). Verilen grafikten elde edilen T30 değerinin %10 eksikliği ve %10 fazlası optimum değer aralığı olarak belirlenmiştir (Abdülrahimov, 2005; Long, 2006) (Şekil 57). Değerlendirme için elde edilen optimum değer aralığı $1.56 \leq T30 \leq 1.90$ sn olarak hesaplanmıştır.



Şekil 57. Reverberasyon süresi-hacim grafiğinden elde edilen T30 değeri

Farklı müzik türleri için önerilen T30-Hacim eğrileri Şekil 58’de sunulmuştur. Müzik türlerine göre değişen hacimlere bağlı olarak elde edilen optimum T30 değerlerinde, bu grafikte önerilen değer aralıkları dikkate alınmıştır. Elde edilen reverberasyon süresi aralıkları, salon hacmindeki değişimlere bağlı olarak yeniden analiz edilmiş; bu doğrultuda, farklı müzik türlerine özgü ve hacimle birlikte değişen T30 aralıkları Tablo 8’da ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 58. Müzik türlerine göre, T30-V grafiğinden elde edilen T30 değerleri

Tablo 8’de sunulan değerler, hacimdeki değişimlere bağlı olarak her müzik türü için farklı bir aralık oluşturacak şekilde düzenlenmiştir. Bu doğrultuda hazırlanan değerlendirme tablosunda, hacim değiştiğinde ilgili değer aralıkları da değiştirilerek değerlendirmeler yapılmıştır.

Tablo 8. Reverberasyon süresi ve EDT'nin optimum değer aralıkları

	V (m ³)	RT			EDT		
		RTort	En Düşük	En Yüksek	EDTort	En Düşük	En Yüksek
Organ	20000	3.13	2.82	3.44	3.24	2.92	3.57
	24000	3.19	2.87	3.51	3.31	2.98	3.64
	27000	3.24	2.92	3.56	3.36	3.03	3.70
	30000	3.29	2.96	3.62	3.42	3.08	3.76
Klasik Müzik	20000	2.70	2.43	2.97	2.77	2.49	3.05
	24000	2.75	2.48	3.03	2.83	2.54	3.11
	27000	2.78	2.50	3.06	2.86	2.57	3.14
	30000	2.82	2.54	3.10	2.90	2.61	3.19
Hafif Müzik	20000	2.36	2.12	2.60	2.40	2.16	2.64
	24000	2.40	2.16	2.64	2.44	2.20	2.68
	27000	2.44	2.20	2.68	2.48	2.24	2.73
	30000	2.47	2.22	2.72	2.52	2.27	2.77

Farklı müzik türleri için, orta frekans bölgesinde (500 Hz - 1000 Hz) farklı bilim insanları tarafından önerilen T30 parametresine ait optimum değer aralıkları Tablo 9'da verilmiştir. Senaryolardan elde edilen T30 değerlerinin, müzik türleri için verilen optimum değer aralıklarını sağlayıp sağlamadığı bu tablo kullanılarak değerlendirilmiştir.

Tablo 9. Farklı müzik türleri için önerilen optimum reverberasyon süreleri

Müzik Türü	T30 (sn)	Kaynak	Notlar
Barok dönemi (Erken dönem klasik müzik)	$1.6 \leq T30 \leq 1.8$	Barron, 1993	500 ve 1000 Hz
Klasik Dönem	$1.2 \leq T30 \leq 1.5$ (Mozart)	Long, 2006	Orta frekanslar
	$1.5 \leq T30 \leq 2.2$ (Mozart)	Hidaka vd., 2024	500 ve 1000 Hz
	$1.6 \leq T30 \leq 2.3$ (Rossini)	Hidaka vd., 2024	500 ve 1000 Hz
	$1.8 \leq T30 \leq 2.2$	Barron, 2010	
	$T30 \geq 1.7$	Holden, 2016	
Romantik Dönem	$1.5 \leq T30 \leq 1.6$ (Wagner)	Long, 2006	Orta frekanslar
	$1.7 \leq T30 \leq 2.5$	Long, 2006	Orta frekanslar
	$1.0 \leq T30 \leq 1.2$ (Sullivan ve Gilbert)	Long, 2006	Orta frekanslar
	$1.8 \leq T30 \leq 2.2$	Barron, 1993	500 ve 1000 Hz
	$1.6 \leq T30 \leq 2.5$ (Bruckner)	Hidaka vd., 2024	500 ve 1000 Hz
Oda Müziği	$1.4 \leq T30 \leq 1.7$	Barron, 1993	500 ve 1000 Hz
Modern Müzik	$1.7 \leq T30 \leq 2.2$ (Stravinsky)	Hidaka vd., 2024	500 ve 1000 Hz
Organ	$2.5 \leq T30 \leq 3.5$	Long, 2006	Orta frekanslar
	$T30 > 2.5$	Barron, 1993	500 ve 1000 Hz
	$2 \leq T30 \leq 2.5$	Mehta vd, 1999	
	$2.80 < T30 < 3.44$	Şekil 58*	
Pop müzik	$0.6 \leq T30 \leq 1.2$	Adelman-Larsen vd., 2010	
Rock müzik	$0.6 \leq T30 \leq 1.2$	Adelman-Larsen vd., 2010	
Klasik Türk Müziği	$1.1 \leq T30 \leq 1.30$	Torun, 2019	
	$0.75 \leq T30 \leq 1.1$	Özçevik, 2015	
	$0.97 \leq T30 \leq 1.2$	Özçevik, 2015	
Piyano Solosu	$1.2 \leq T30 \leq 2.0$	Hidaka & Nishihara, 2022	500 ve 1000 Hz
Keman Solosu	$1.8 \leq T30 \leq 2.4$	Hidaka & Nishihara, 2022	500 ve 1000 Hz
Senfoni	$2.0 \leq T30 \leq 2.4$	Gade, 2014	
	$2.43 < T30 < 3.00$	Şekil 58*	
Ritmik Müzik	$0.8 \leq T30 \leq 1.5$	Gade, 2014	
Hafif Müzik	$1.4 \leq T30 \leq 1.8$	Mehta vd, 1999	
Konser Salonu	$2.12 \leq T30 \leq 2.60$	Şekil 58*	
Orkestra, Konser Salonları İçin	$1.8 \leq T30 \leq 2.2$	Mehta vd, 1999	
* : Şekil 58'den elde edilen optimum T30 değerinin $\pm 10\%$ 'u hesaplanarak belirlenmiştir. Her hacim değişikliğinde aralıklar yeniden düzenlenmiştir.			

EDT (Erken düşme süresi) parametresine ilişkin optimum değer aralığının belirlenmesinde, Gade (1989) tarafından önerilen T30-EDT ilişkisi temel alınmıştır. Bu doğrultuda, 500 Hz’de EDT için elde edilen optimum değer aralığı $1.53 \leq EDT \leq 1.87$ sn. olarak belirlenmiştir.

EDT parametresine ilişkin olarak, orta frekans bölgesinde (500 Hz - 1000 Hz) farklı müzik türleri için çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen optimum değer aralıkları Tablo 10’da verilmiştir. Tüm senaryoların simülasyonlarından elde edilen EDT değerlerinin, müzik türlerine göre önerilen aralıkları sağlayıp sağlamadıkları bu tablo aracılığıyla değerlendirilmiştir.

Tablo 10. Farklı müzik türleri için önerilen optimum EDT değerleri

Müzik Türü	EDT (sn)	Kaynak	Notlar
Romantik Müzik	$1.5 \leq EDT \leq 2.2$ (Bruckner)	Hidaka vd., 2024	RTmid
Klasik Müzik	$1.4 \leq EDT \leq 2.0$ (Mozart)	Hidaka vd., 2024	RTmid
	$1.5 \leq EDT \leq 2.0$ (Rossini)	Hidaka vd., 2024	RTmid
Klasik Türk Müziği	$1.20 \leq EDT \leq 1.40$	Torun, 2019	
Senfoni	$2.50 \leq EDT \leq 3.10^*$	Şekil 58*	
Modern Müzik	$1.5 \leq EDT \leq 2.0$ (Stravinsky)	Hidaka vd., 2024	RTmid
Hafif Müzik Konser Salonu	$2.13 \leq EDT \leq 2.65^*$	Şekil 58*	
Organ	$2.90 \leq EDT \leq 3.60^*$	Şekil 58*	
* : Şekil 58’den elde edilen optimum T30 değeri üzerinden hesaplanarak belirlenmiştir. Her hacim değişikliğinde aralıklar yeniden düzenlenmiştir.			

C80 (Netlik) parametresinin değerlendirilmesinde, ISO 3382-1:2009 Standardı ve Barron (1993) tarafından önerilen değer aralıkları esas alınmıştır. Bu doğrultuda, tüm senaryoların simülasyonlarından elde edilen 500 Hz ve 1000 Hz oktav bantlarındaki ortalama C80 değerlerinin sırasıyla $-5 \text{ dB} \leq C80 \leq +5 \text{ dB}$ ve $-2 \text{ dB} \leq C80 \leq +2 \text{ dB}$ değer aralıklarını sağlaması beklenmektedir.

C80 parametresinin, farklı müzik türleri için orta frekans bölgesinde (500 Hz - 1000 Hz) farklı bilim insanları tarafından önerilen optimum değer aralıkları, Tablo 11’de verilmiştir. Senaryolardan elde edilen C80 değerlerinin, müzik türlerine bağlı olarak optimum değer aralıklarını sağlayıp sağlayamadıkları bu tablo aracılığıyla değerlendirilmiştir.

Tablo 11. Farklı müzik türleri için önerilen optimum C80 değerleri

Müzik Türü	C80 (dB)	Kaynak	Notlar
Romantik Müzik	$-3 \leq C80 \leq +4$	Ahnert & Tennhardt, 2008	
Klasik ve Modern Müzik	$C80 \geq -3$	Easera, n.d.	Orta frekans
	$-2 \leq C80 \leq 0$	Holden, 2016	
Klasik Türk Müziği	$-4 < C80 < +4$	Torun, 2019	
Piyano Solosu	$0 < C80 < 2.4$	Hidaka & Nishihara, 2022	RTmid
Keman Solosu	$-1.6 < C80 < 0.7$	Hidaka & Nishihara, 2022	RTmid
Senfoni	$-1 \leq C80 \leq +3$	Gade, 2014	

D50 (Ayırt edicilik) parametresine ait optimum değer aralığı belirlenirken, ISO 3382-1:2009 Standardı referans alınmıştır. Bu standartta belirlenen $0.3 \leq D50 \leq 0.7$ optimum değer aralığı, çalışmadan elde edilen verilerin değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

LF80 (Erken yanal ses oranı) parametresine ait optimum değer aralığı belirlenirken, ISO 3382-1:2009 Standardı referans alınmıştır. Bu standartta belirlenen $0.05 \leq LF80 \leq 0.35$ optimum değer aralığı, çalışmadan elde edilen verilerin değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

BR (Bas Oranı) parametresine ilişkin optimum değer aralıkları, mekandaki reverberasyon süresine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Reverberasyon süresi 1.8 sn.'den fazla olan mekanlar için $1.1 \leq BR \leq 1.25$; 1.8 sn.'den az olan mekanlar için ise $1 \leq BR \leq 1.45$ aralığı çalışmadan elde edilen verilerin değerlendirilmesinde kullanılmıştır (Inacio, 2022; Arau, 1999).

TR (Tiz Oranı) parametresine ilişkin optimum değer aralıklarının, mekandaki EDT değerlerine bağlı olarak değişiklik gösterdiği belirtilmektedir. Mehta ve arkadaşları (1999) tarafından yapılan çalışmada, 2000 Hz için kullanılan $TR = EDT_{2000} / EDT_{mid}$ denklemine göre elde edilen TR değerinin 0.9'un üzerinde olması gerektiği ifade edilmiştir. Benzer şekilde, 4000 Hz için $TR = EDT_{4000} / EDT_{mid}$ denklemi kullanılarak elde edilen TR değerinin ise 0.8'in üzerinde olması gerektiği belirtilmiştir.

STI (Sesin iletim indeksi) parametresine ait optimum değer aralıklarının değerlendirilmesinde Hougast vd. (1980)'nin önermiş olduğu değer aralıkları referans alınmıştır. Bu aralıklar:

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 iyi olarak tanımlanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, Odeon V10 simülasyon programı kullanılarak elde edilen T30 (Reverberasyon süresi), EDT (Erken düşme süresi), D50 (Ayırt edilebilirlik), C80 (Netlik), LF80 (Erken yanal ses oranı), STI (Ses iletim indeksi), BR (Bas oranı) ve TR (Tiz oranı) parametrelerine ait sonuçlar değerlendirilmiştir. İncelenen konser salonunda oluşturulan 40 senaryodan elde edilen veriler hem genel konser etkinlikleri hem de farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıklarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, birleştirilmiş hacimlerle oluşturulan 36 senaryodan elde edilen T30 ve EDT değerleri mevcut durum için elde edilen değerlerle karşılaştırılarak incelenmiştir.

3.1. Konser Salonun Mevcut Durumu ve Doluluk Oranlarının Sesin Nesnel Parametreleri Açısından Değerlendirilmesi

Bu başlık altında, Isarphilharmonie Konser Salonu'nun farklı doluluk oranlarına ait simülasyonlar sonucunda elde edilen T30, EDT, D50, C80, LF80, STI, BR ve TR parametrelerine ilişkin elde edilen veriler analiz edilerek değerlendirilmiştir.

T30 Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'nun farklı doluluk oranlarına ait senaryoların simülasyonundan elde edilen T30 değerleri Şekil 59'da verilmiştir.

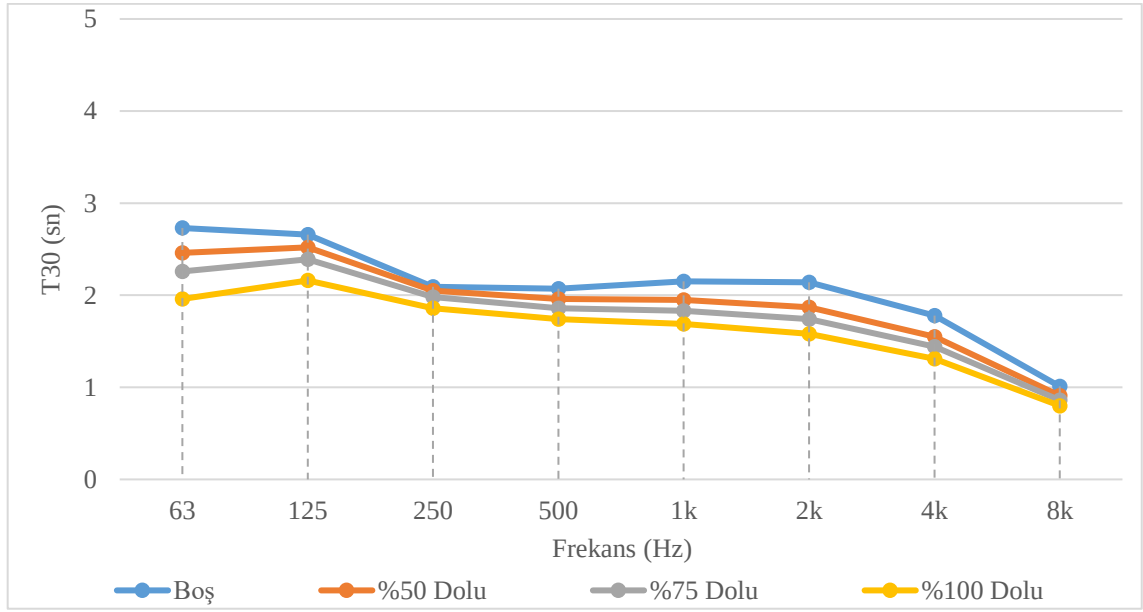
Konser salonunun genel olarak değerlendirilmesinde T30 parametresine ait değer aralığı olarak, Knudsen ve Harris (1988) tarafından önerilen grafikten elde edilen $1.56 \leq T30 \leq 1.90$ değer aralığı referans olarak kabul edilmiştir (500 Hz). Referans olarak alınan değer aralığı, Şekil 59'daki grafik üzerinde taralı bir şekilde gösterilmiştir (Knudsen ve Harris, 1988).

Farklı müzik türleri için orta frekanslarda (500 Hz - 1000 Hz) önerilen optimum değer aralıklarına ait tüm değerlendirmeler Tablo 12'ye göre yapılmıştır.

Seyirci alanı boşken yapılan simülasyon sonucunda elde edilen T30 değerleri, düşük frekanslarda (250 Hz'e kadar) azalma eğilimi gösterirken 250 Hz ile 2000 Hz arasındaki frekans aralığında belirli bir artış göstermektedir. Buna ek olarak, 2000 Hz'den 8000 Hz'e doğru reverberasyon süresinde belirgin bir azalma görülmektedir (Şekil 59). Bu grafiğe göre,

mevcut durumun simülasyonu sonucunda 500 Hz'deki T30 değeri 2.07 sn olarak elde edilmiştir.

Salonun %50 dolu olduğu senaryonun simülasyonundan elde edilen T30 değerleri, düşük frekanslarda en yüksek seviyelere ulaşmakta olup, frekans yükseldikçe elde edilen değerlerde düşüş meydana gelmiştir. %75 ve %100 doluluk oranları için elde edilen simülasyon sonuçları da benzer eğilimler sergilemiştir. 500 Hz'de T30 süreleri; %50 dolulukta 1.96 sn, %75 dolulukta 1.86 sn ve %100 dolulukta 1.74 sn olarak elde edilmiştir (Şekil 59).



Şekil 59. Doluluk oranlarına ait senaryolardan elde edilen T30 süreleri

500 Hz'de elde edilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, mevcut durum için hesaplanan T30 değerinin, belirlenen referans aralığın üzerinde kaldığı açıkça görülmektedir. Benzer şekilde, salonun %50 dolu olduğu senaryoya ait simülasyon sonucunda da T30 değerinin referans aralığını aştığı tespit edilmiştir. Öte yandan, salonun %75 ve %100 dolu olduğu senaryolar için gerçekleştirilen simülasyonlarda elde edilen T30 değerlerinin ise referans aralıklarında kaldığı belirlenmiştir. Sonuç olarak salonun doluluk oranı arttıkça T30 değerlerinin referans olarak belirlenen optimum değer aralığına yaklaştıkları ve bu değer aralığını sağladıkları görülmüştür.

Akustik alanda farklı otoriteler tarafından, müzik türüne bağlı olarak belirtilen optimum reverberasyon süreleri birbirinden farklılık göstermektedir. Orta frekans

bölgesinde (500-1000 Hz) farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıkları ile farklı doluluk oranlarından oluşan senaryoların simülasyonlarından elde edilen veriler arasındaki karşılaştırmalı ilişki Tablo 12’de verilmiştir. Tabloda yeşil renkle gösterilen hücreler elde edilen T30 değerlerinin önerilen optimum değer aralığında yer aldığını, mavi hücreler bu aralığın üzerinde kalan değerleri, kırmızı hücreler ise optimum aralığın altında kalan değerleri ifade etmektedir.

Tablo 12. Doluluk oranlarının simülasyonundan elde edilen verilerin, farklı müzik türleri için orta frekans bölgesinde önerilen optimum değer aralıklarıyla karşılaştırılması

Müzik Türü	Optimum Değer Aralıkları	T30 (sn) Kaynak	Doluluk Oranı			
			Boş	%50	%75	%100
			2.11 sn	1.96 sn	1.85 sn	1.72 sn
Barok dönemi (Erken klasik müzik)	$1.6 \leq T30 \leq 1.8$	(Barron, 1993)	-	-	-	+
Klasik Dönem	$1.2 \leq T30 \leq 1.5$ (Mozart)	(Long, 2006)	-	-	-	-
	$1.5 \leq T30 \leq 2.2$ (Mozart)	(Hidaka vd., 2024)	+	+	+	+
	$1.6 \leq T30 \leq 2.3$ (Rossini)	(Hidaka vd., 2024)	+	+	+	+
Romantik Dönem	$1.5 \leq T30 \leq 1.6$ (Wagner)	(Long, 2006)	-	-	-	-
	$1.7 \leq T30 \leq 2.5$	(Long, 2006)	+	+	+	+
	$1.0 \leq T30 \leq 1.2$ (Sullivan ve Gilbert)	(Long, 2006)	-	-	-	-
	$1.8 \leq T30 \leq 2.2$	(Barron, 1993)	+	+	+	-
	$1.6 \leq T30 \leq 2.5$ (Bruckner)	(Hidaka vd., 2024)	+	+	+	+
Oda Müziği	$1.4 \leq T30 \leq 1.7$	(Barron, 1993)	-	-	-	-
Modern Müzik	$1.7 \leq T30 \leq 2.2$ (Stravinsky)	(Hidaka vd., 2024)	+	+	+	+
Organ	$2.5 \leq T30 \leq 3.5$	(Long, 2006)	-	-	-	-
	$T30 > 2.5$	(Barron, 1993)	-	-	-	-
	$2 \leq T30 \leq 2.5$	(Mehta vd, 1999)	+	-	-	-
	$2.80 \leq T30 \leq 3.44^*$	Şekil 58	-	-	-	-
Pop müzik	$0.6 \leq T30 \leq 1.2$	Adelman-Larsen vd., 2010	-	-	-	-
Rock müzik	$0.6 \leq T30 \leq 1.2$	(Adelman-Larsen vd., 2010)	-	-	-	-
Klasik Türk Müziği	$1.1 \leq T30 \leq 1.30$	Torun, 2019	-	-	-	-
	$0.75 \leq T30 \leq 1.1$	(Ozcevik, 2015)	-	-	-	-
	$0.97 \leq T30 \leq 1.2$	Ozcevik, 2015	-	-	-	-
Piyano Solosu	$1.2 \leq T30 \leq 2.0$	Hidaka & Nishihara, 2022	-	+	+	+

Tablo 12'nin devamı

Keman Solosu	1.8≤T30≤2.4	Hidaka & Nishihara, 2022	+	+	+	-
Senfoni	2.0≤T30≤2.4	Gade, 2014	+	-	-	-
	2.43≤T30≤3.00*	Şekil 58	-	-	-	-
Ritmik Müzik	0.8≤T30≤1.5	Gade, 2014	-	-	-	-
Hafif Müzik	1.4≤T30≤1.8	Mehta vd, 1999	-	-	-	+
Konser Salonu	2.12≤T30≤2.60*	Şekil 58	-	-	-	-
Orkestra, Konser Salonu	1.8≤T30≤2.2	Mehta vd, 1999	+	+	+	-
Elde edilen reverberasyon süresi, önerilen optimum aralığın			Altında	Arasında	Üstünde	
* : Şekil 58’de 20000 m ³ için verilen optimum T30 değerinin ±%10’u hesaplanarak belirlenmiştir.						

500 Hz ile 1000 Hz orta frekans bölgesinde önerilen optimum reverberasyon süresi aralıkları incelendiğinde, salon akustiğinin her bir müzik türü için farklı reverberasyon süresine ihtiyaç duyduğu anlaşılmaktadır. Klasik müzik bağlamında yapılan değerlendirmede, akustik otoriteler tarafından önerilen optimum reverberasyon süresi aralıklarının yalnızca müzik türüne göre değil, aynı zamanda farklı müzisyenlerin eserleri arasında da değişkenlik gösterdiği anlaşılmıştır. Bununla birlikte, salon doluluk oranı arttıkça klasik müzik için önerilen reverberasyon süresi koşullarının daha etkili sağlandığı belirlenmiştir. Diğer taraftan, Long (2006) tarafından önerilen Mozart, Wagner, Sullivan ve Gilbert'e ait eserler özelinde yapılan analizlerde, elde edilen T30 değerlerinin önerilen aralıkların üzerinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu durumda, ilgili eserlerde reverberasyon süresinin önerilen optimum değer aralığını sağlayabilmesi için mekan içerisindeki ses yutuculuğunun artırılması gerekmektedir.

Oda müziği, opera, klasik Türk müziği, drama-tiyatro, pop, rock, ritmik müzik ve hafif müzik türlerine yönelik olarak gerçekleştirilen değerlendirmelerde, elde edilen T30 değerlerinin büyük ölçüde önerilen optimum değer aralıklarının üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Ancak, salonun %100 dolu olduğu senaryoda elde edilen T30 değerlerinin, Gade (2014) ve Barron (1993) tarafından opera türü için önerilen optimum değer aralıklarını ve Mehta (1999) tarafından hafif müzik için önerilen değer aralığını sağladığı belirlenmiştir.

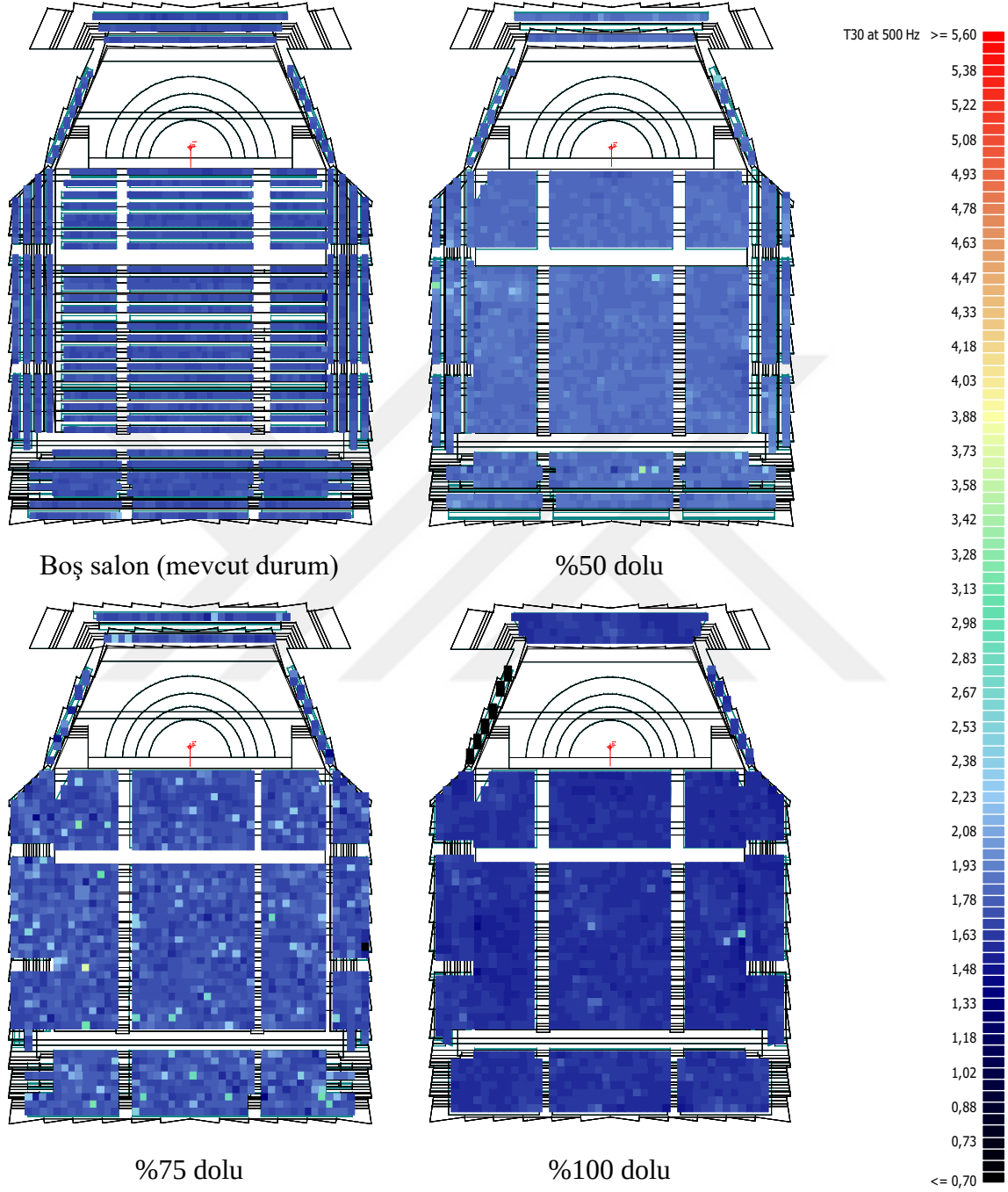
Modern müzik, orkestra, piyano ve keman solosu türlerine yönelik gerçekleştirilen değerlendirmede, tüm simülasyonlardan elde edilen T30 değerlerinin modern müzik için önerilen optimum reverberasyon süresi aralıklarını karşıladığı tespit edilmiştir. Piyano solosu türünde, boş salon koşullarında elde edilen T30 değerinin önerilen aralığın üzerinde

olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık, %100 doluluk senaryosunda elde edilen T30 değerlerinin keman solosu için önerilen değer aralığının altında kaldığı tespit edilmiştir.

Senfoni türüne ilişkin olarak yapılan değerlendirmede, yalnızca boş salon senaryo simülasyonundan elde edilen T30 değerinin Gade (2014) tarafından önerilen reverberasyon süresi aralığını sağladığı tespit edilmiştir. Bunun dışında kalan tüm senaryolarda elde edilen T30 değerlerinin, önerilen optimum değer aralıklarının altında kaldığı belirlenmiştir.

Müzik türleri arasında en yüksek reverberasyon süresi gereksinimine sahip olan organ müziğine yönelik yapılan değerlendirmede ise, yalnızca boş salon koşullarında elde edilen T30 süresinin Mehta ve arkadaşları (1999) tarafından önerilen değer aralığını sağladığı belirlenmiştir. Diğer tüm senaryolarda elde edilen T30 değerlerinin, önerilen optimum aralıkların altında kaldığı ve bu aralıkları karşılamadığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, bu türün bir konser salonunda icra edilebilmesi için, mevcut salondaki reverberasyon süresini artırmaya yönelik akustik düzenlemelerin yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Konser salonunun mevcut durumu ve doluluk oranlarının değişimine bağlı olarak elde edilen T30 sürelerinin grid dağılımı Şekil 60'ta verilmiştir.



Şekil 60. Isarphilarmonie Konser Salonunun farklı doluluk oranlarından elde edilen T30 değerlerinin grid dağılımı (500 Hz)

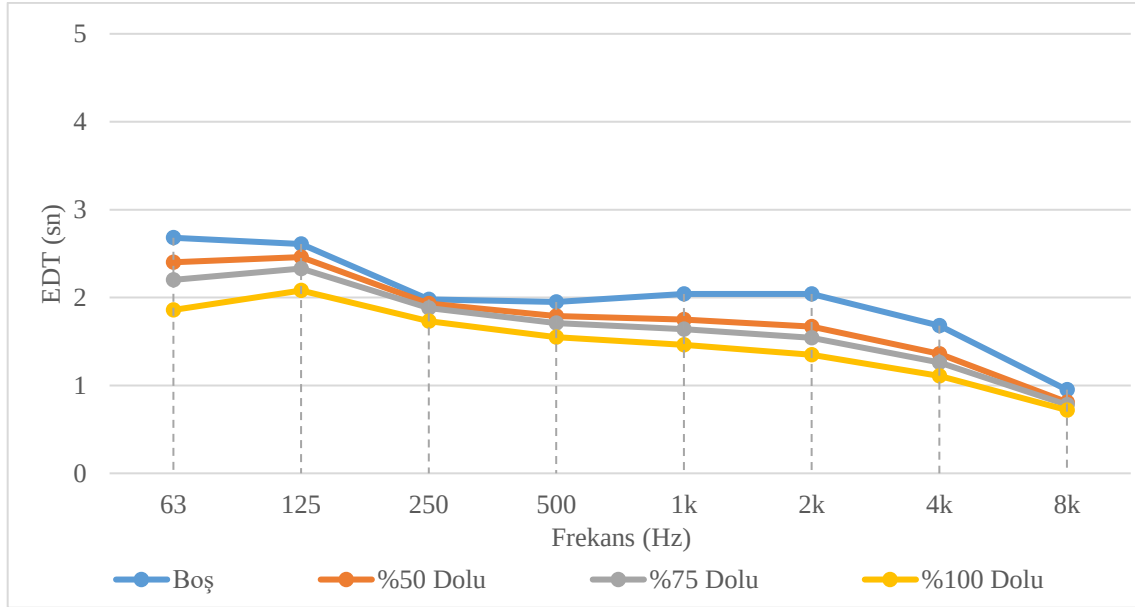
EDT Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait farklı doluluk senaryolarının simülasyonlarından elde edilen EDT değerleri Şekil 61'de verilmiştir.

Konser salonunun genel değerlendirilmesinde EDT parametresine ait optimum değer aralığı, öncelikle Şekil 57'den elde edilen T30 değeri ile Gade'nin (1989) önerdiği T30-EDT ilişkisi kullanılmıştır. Daha sonra Abdülrahimov (2005) ve Long (2006)'un önerdiği $\pm\%10$ tolerans dikkate alınarak optimum değer aralığı belirlenmiştir. Bu kapsamda, 500 Hz'de EDT parametresi için önerilen optimum değer aralığı $1.53 \leq \text{EDT} \leq 1.87$ sn olarak hesaplanmıştır. Referans olarak alınan optimum değer aralığı, Şekil 61'de verilen grafik üzerinde taralı bir şekilde gösterilmiştir.

Farklı müzik türleri için orta frekans bölgesinde (500 Hz - 1000 Hz) önerilen optimum değer aralıklarına ait değerlendirmeler Tablo 13'te verilmiştir.

Seyirci alanı boşken yapılan simülasyon sonucunda elde edilen EDT değerleri, düşük frekanslarda (250 Hz'e kadar) azalma eğilimi gösterirken 250 Hz ile 2000 Hz frekans aralığında az miktarda bir artış göstermiştir. Buna ek olarak EDT süresinde 2000 Hz'den 8000 Hz'e doğru gidildikçe belirgin bir azalma görülmektedir. Bu grafiğe göre, mevcut durumun simülasyonu sonucunda 500 Hz'deki EDT değeri 1.95 sn olarak elde edilmiştir.

Salonun %50 dolu olduğu senaryonun simülasyonundan elde edilen EDT değerleri düşük frekanslarda en yüksek seviyelere ulaşırken, frekans yükseldikçe EDT değerlerinde azalma görülmüştür. %75 ve %100 doluluk oranlarına ait senaryoların simülasyonlarından elde edilen sonuçlar da benzer eğilimler sergilemektedir. 500 Hz'deki EDT değerleri, %50 dolulukta 1.79 sn, %75 dolulukta 1.71 sn ve %100 dolulukta 1.55 sn olarak elde edilmiştir (Şekil 61).



Şekil 61. Doluluk oranlarına ait senaryoların simülasyonlarından elde edilen EDT süreleri

500 Hz'deki simülasyon sonuçları incelendiğinde, mevcut durum için elde edilen EDT değerinin belirlenen optimum referans aralığının üzerinde kaldığı açıkça görülmektedir. Bunun aksine, salonun %50, %75 ve %100 dolu olduğu senaryolar için gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen EDT değerlerinin ise referans aralığı içerisinde kaldığı belirlenmiştir. Sonuç olarak salonun doluluk oranı arttıkça EDT değerlerinin referans olarak belirlenen optimum değer aralığına yaklaştıkları ve bu değer aralığını sağladıkları görülmüştür.

Her müzik türünün ihtiyaç duyduğu optimum EDT değeri farklılık göstermektedir. Orta frekans bölgesinde (500-1000 Hz) farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıkları ile farklı doluluk oranlarından oluşan senaryoların simülasyonlarından elde edilen veriler arasındaki karşılaştırmalı ilişki Tablo 13'te verilmiştir. Tabloda yeşil renkle gösterilen hücreler elde edilen EDT değerlerinin önerilen optimum değer aralığında yer aldığını, mavi hücreler bu aralığın üzerinde kalan değerleri, kırmızı hücreler ise optimum aralığın altında kalan değerleri ifade etmektedir.

Tablo 13. Doluluk oranlarının simülasyonundan elde edilen EDT değerlerinin, farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıklarıyla karşılaştırılması

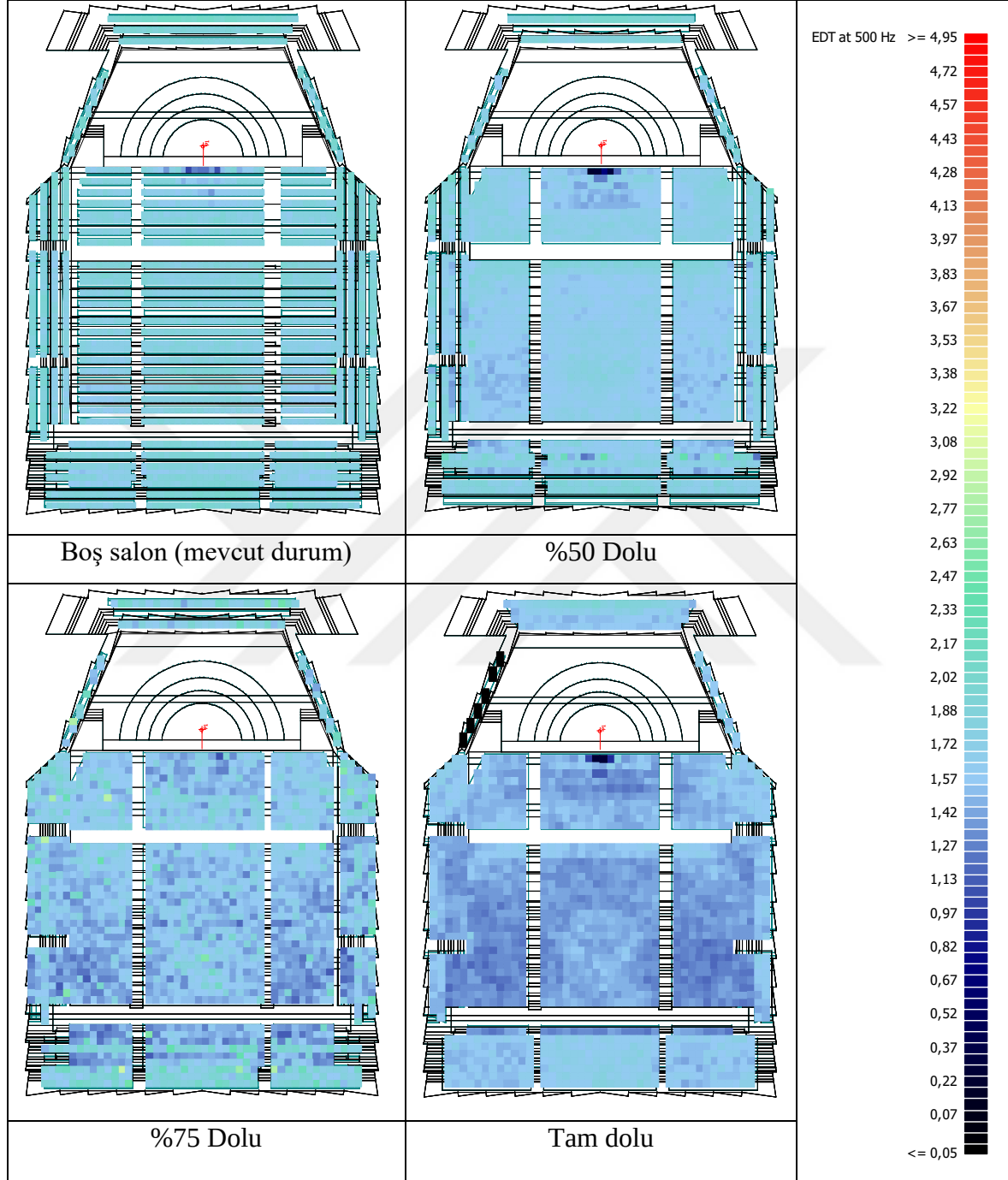
Müzik Türü	Optimum Değer Aralıkları	EDT (sn) Kaynak	Doluluk Oranı			
			Boş	%50	%75	%100
			2.00 sn	1.77 sn	1.68 sn	1.51 sn
Romantik Müzik	1.5≤EDT≤2.2 (Bruckner)	Hidaka vd., 2024	+	+	+	+
Klasik Müzik	1.4≤EDT≤2.0 (Mozart)	Hidaka vd., 2024	+	+	+	+
	1.5≤EDT≤2.0 (Rossini)	Hidaka vd., 2024	+	+	+	+
Klasik Türk Müziği	1.20≤EDT≤1.40	Torun, 2019	-	-	-	-
Senfoni	2.50≤EDT≤3.10*	Şekil 58*	-	-	-	-
Modern Müzik	1.5≤EDT≤2.0 (Stravinsky)	Hidaka vd., 2024	+	+	+	+
Hafif Müzik Konser Salonu	2.13≤EDT≤2.65*	Şekil 58*	-	-	-	-
Organ	2.90≤EDT≤3.60*	Şekil 58*	-	-	-	-
Elde edilen reverberasyon süresi, önerilen optimum aralığın			Altında	Arasında	Üstünde	
* : Şekil 58’de 20000 m ³ için verilen optimum EDT değerinin ±%10’u hesaplanarak belirlenmiştir.						

500 Hz ile 1000 Hz orta frekans bölgesinde önerilen optimum EDT değer aralıkları incelendiğinde, salon akustiğinin her bir müzik türü için farklı EDT değerine ihtiyaç duyduğu tespit edilmiştir. Klasik müzik bağlamında yapılan değerlendirmede, önerilen optimum EDT değer aralıklarının yalnızca müzik türüne göre değil, aynı zamanda farklı müzisyenlerin eserleri arasında da değişkenlik gösterdiği anlaşılmıştır. Bununla birlikte, salon doluluk oranlarına bağlı olarak oluşturulan simülasyonlardan elde edilen EDT değerlerinin, klasik müziğin yanı sıra romantik ve modern müzik için de önerilen optimum değer aralıklarını sağladığı belirlenmiştir.

Klasik Türk müziğine yönelik yapılan değerlendirmede, tüm senaryoların simülasyonlarından elde edilen EDT değerlerinin, önerilen optimum değer aralıklarının üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

Senfoni, organ ve hafif müzik türlerine ilişkin yapılan değerlendirmede, senaryoların simülasyonlarından elde edilen tüm EDT değerlerinin önerilen optimum değer aralıklarının altında kaldığı belirlenmiştir.

Konser salonunun mevcut durumu ve doluluk oranlarının değişimine bağlı olarak elde edilen EDT sürelerinin grid dağılımı Şekil 62’de verilmiştir.



Şekil 62. Isarphilarmonie Konser Salonunun farklı doluluk oranlarından elde edilen EDT değerlerinin grid dağılımı (500 Hz)

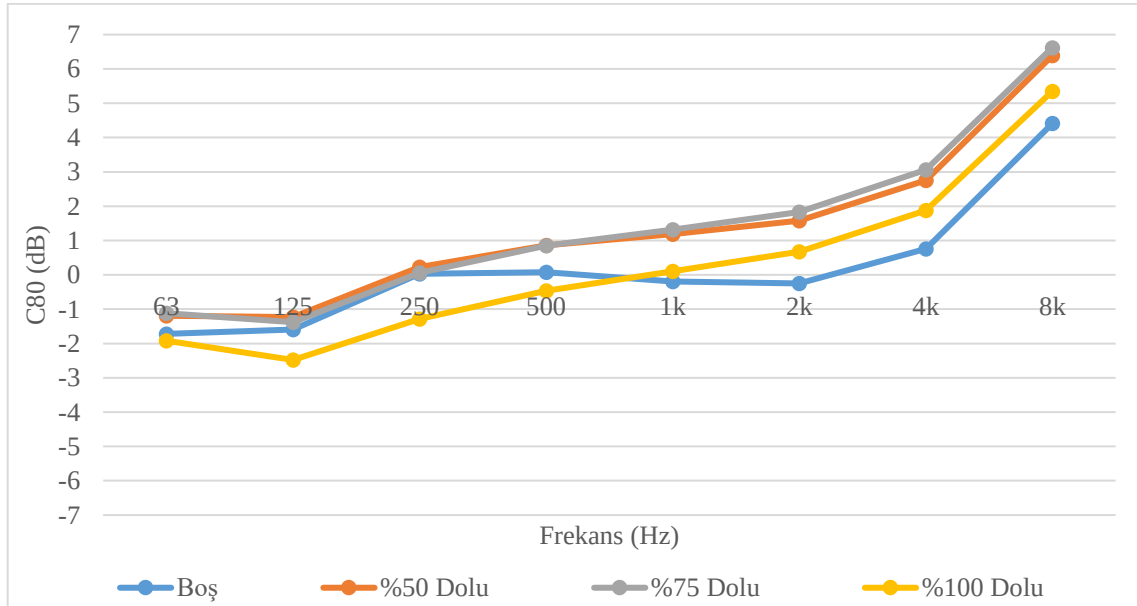
C80 Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait farklı doluluk senaryolarının simülasyonlarından elde edilen C80 değerleri Şekil 63'te verilmiştir.

Konser salonunun genel değerlendirilmesinde, C80 parametresi için ISO 3382-1:2009 standardında önerilen $-5 \text{ dB} \leq C80 \leq +5 \text{ dB}$ ve Barron (1993) tarafından önerilen $-2 \text{ dB} \leq C80 \leq +2 \text{ dB}$ aralıkları esas alınmıştır. Bu referans değer aralıkları Şekil 63'teki grafikte taralı alanlarla gösterilmiştir.

Farklı müzik türleri için orta frekans bölgesinde (500 Hz - 1000 Hz) önerilen optimum değer aralıklarına ait değerlendirmeler Tablo 14'te verilmiştir.

Solunun boş olduğu senaryonun simülasyonundan elde edilen C80 değerlerinin 63 Hz, 125 Hz, 1000 Hz ve 2000 Hz frekanslarda sıfırın altındayken 250 Hz, 500 Hz, 4000 Hz ve 8000 Hz frekanslarda sıfırın üzerinde olduğu belirlenmiştir. Mevcut durumda C80 parametresinin orta frekans bölgesindeki ortalama değeri -0.06 dB olarak elde edilmiştir.

Salonun %50 dolu olduğu senaryoda elde edilen C80 değerlerinin düşük frekanslarda az miktarda da olsa azaldığı görülürken, 125 Hz'den itibaren frekans yükseldikçe artış görülmüştür. %75 ve %100 doluluk oranları için elde edilen simülasyon sonuçları da benzer eğilimler sergilemiştir. Orta frekans bölgesinde C80 değerleri; %50 dolulukta 1.03 dB , %75 dolulukta 1.09 dB ve %100 dolulukta -0.18 dB olarak elde edilmiştir.



Şekil 63. Doluluk oranlarına ait senaryoların simülasyonlarından elde edilen C80 değerleri

Konser salonunun doluluk oranlarına ait simülasyonlardan elde edilen C80 değerlerine yönelik yapılan genel değerlendirmede, orta frekans bölgesinde farklı senaryoların simülasyonlarından elde edilen tüm C80 parametre değerlerinin optimum değer aralığında yer aldığı belirlenmiştir.

Her müzik türünün ihtiyaç duyduğu optimum C80 değeri farklılık göstermektedir. Orta frekans bölgesinde (500-1000 Hz) farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıkları ile farklı doluluk oranlarından oluşan senaryolara ait simülasyonlardan elde edilen veriler arasındaki karşılaştırmalı ilişki Tablo 14'te verilmiştir. Tabloda yeşil renkle gösterilen hücreler elde edilen C80 değerlerinin önerilen optimum değer aralığında yer aldığını, mavi hücreler bu aralığın üzerinde kalan değerleri, kırmızı hücreler ise optimum aralığın altında kalan değerleri ifade etmektedir.

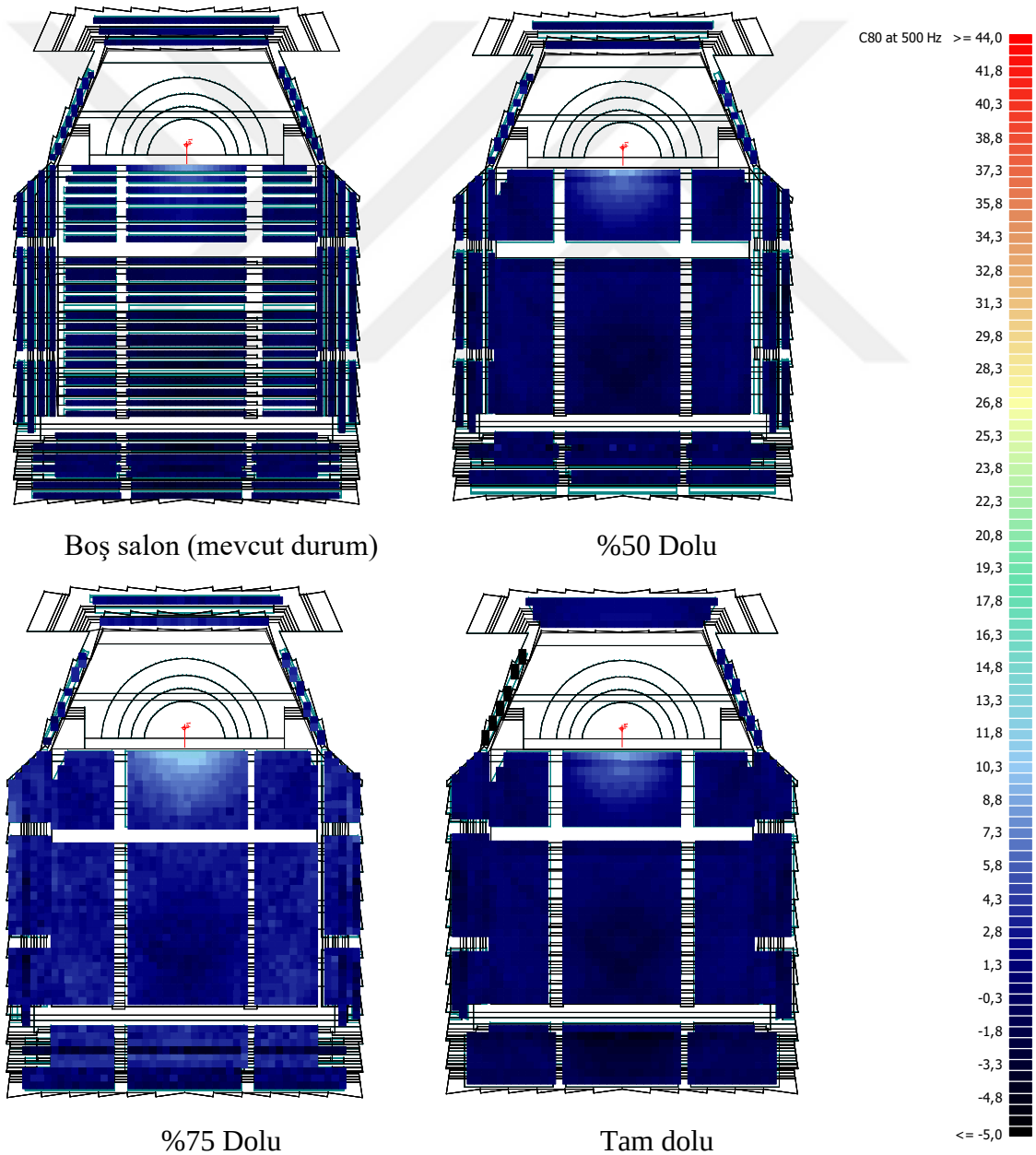
Tablo 14. Doluluk oranlarının simülasyonundan elde edilen C80 değerlerinin farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıklarıyla karşılaştırılması

Müzik Türü	Optimum Değer Aralıkları	C80 (dB) Kaynak	Doluluk Oranı			
			Boş	%50	%75	%100
			-0.06	1.03	1.09	-0.18
Romantik Müzik	$-3 \leq C80 \leq +4$	(Ahnert & Tennhardt, 2008)	+	+	+	+
Klasik ve Modern Müzik	$C80 \geq -3$	Easera, n.d.	+	+	+	+
	$-2 \leq C80 \leq 0$	Holden, 2016	+	-	-	+
Klasik Türk Müziği	$-4 \leq C80 \leq +4$	(Torun, 2019)	+	+	+	+
Piyano Solosu	$0 \leq C80 \leq 2.4$	(Hidaka & Nishihara, 2022)	-	+	+	-
Keman Solosu	$-1.6 \leq C80 \leq 0.7$	(Hidaka & Nishihara, 2022)	+	-	-	+
Senfoni	$-1 \leq C80 \leq +3$	(Gade, 2014)	+	+	+	+
Elde edilen C80 değeri, önerilen optimum değer aralığının			Altındadır.	Arasındadır.	Üstündedir.	

500 Hz ile 1000 Hz orta frekans bölgesine ilişkin C80 parametresi için önerilen optimum değer aralıkları incelendiğinde, salon akustiğinin her bir müzik türü için farklı C80 değerlerine ihtiyaç duyduğu tespit edilmiştir. Salonun doluluk oranlarına bağlı olarak oluşturulan simülasyonlardan elde edilen C80 değerlerinin, romantik müzik, klasik müzik, modern müzik, klasik Türk müziği ve senfoni türleri için önerilen optimum değer aralıklarını sağladığı belirlenmiştir.

Piyano solosu için önerilen optimum C80 değeri aralığı $0 \leq C80 \leq 2.4$ dB olarak belirtilmiştir. Bu doğrultuda, boş ve %100 dolu senaryolara ait simülasyonlardan elde edilen negatif C80 değerlerinin, ilgili aralığın altında kaldığı tespit edilmiştir. Öte yandan, klasik müzik için Holden (2016) tarafından önerilen optimum aralık $-2 \leq C80 \leq 0$ dB; keman solosu için önerilen değeri aralığı ise $-1.6 \leq C80 \leq 0.7$ dB'dir. Bu çerçevede, %50 ve %75 doluluk oranına sahip senaryolarda elde edilen pozitif C80 değerlerinin, her iki aralığın da üzerinde kaldığı belirlenmiştir.

Konser salonunun mevcut durumu ve doluluk oranlarının değişimine bağlı olarak elde edilen C80 değerlerinin grid dağılımı Şekil 64'te verilmiştir.

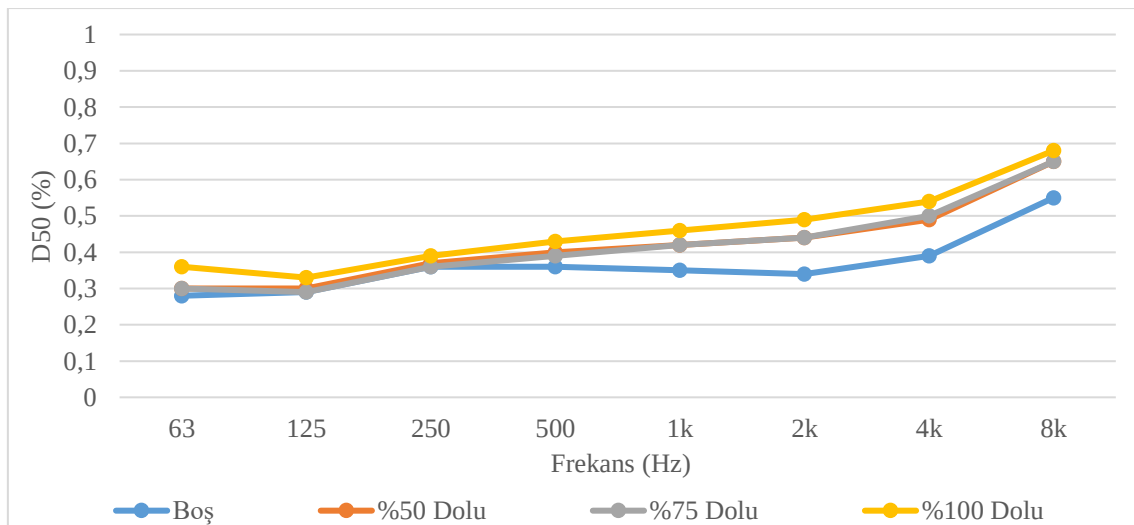


Şekil 64. Isarphilarmonie Konser Salonunun farklı doluluk oranlarından elde edilen C80 değerlerinin grid dağılımı (500 Hz)

D50 Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait farklı doluluk senaryolarının simülasyonlarından elde edilen D50 değerleri Şekil 65'te verilmiştir.

Konser salonundan elde edilen D50 parametresine ait verilerin değerlendirilmesinde orta frekans bölgesinde ISO 3382-1:2009 tarafından önerilen $0.3 \leq D50 \leq 0.7$ değer aralığı referans alınmıştır. Referans olarak alınan optimum değer aralığı, Şekil 65'te verilen grafik üzerinde taralı bir şekilde gösterilmiştir.

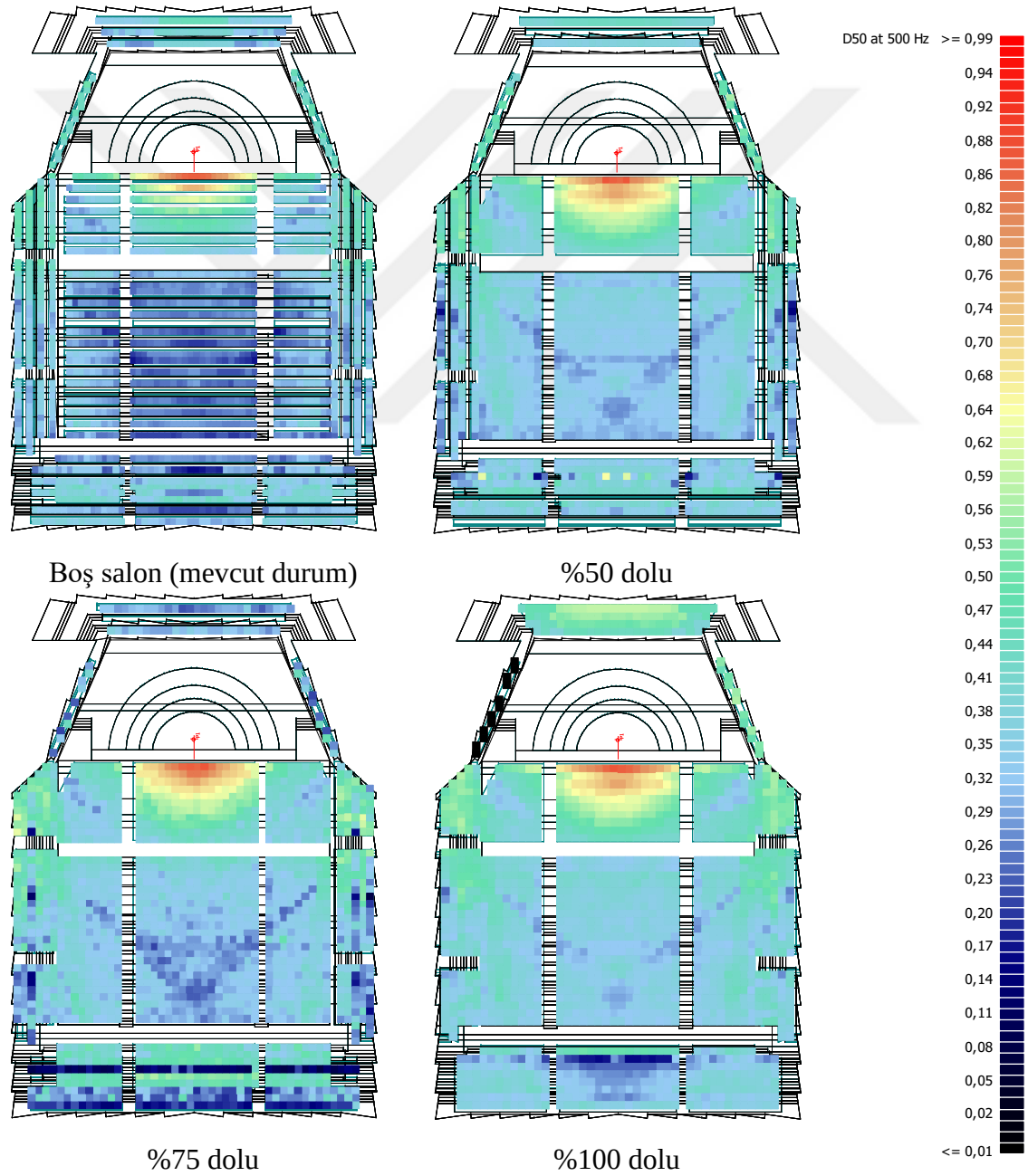
Solunun boş olduğu senaryonun simülasyonundan elde edilen D50 değerleri düşük frekanslarda (250 Hz'e kadar) artış eğilimi gösterirken, 250 Hz ile 2000 Hz frekans aralığında az miktarda bir azalma eğilimi göstermiştir. Buna ek olarak, 2000 Hz'den 8000 Hz'e doğru D50 değerlerinde belirgin bir artış olduğu görülmüştür. Mevcut durumda D50 parametresinin orta frekans bölgesindeki ortalama değeri 0.36 olarak elde edilmiştir. Hesaplanan bu değere göre mekandaki yansıyan ses enerjilerinin dengede ve mekan içinde gerçekleştirilen konuşma faaliyetinin anlaşılabilirliğinin yeterli düzeyde olduğu sonucuna varılmıştır. Salonun %50 dolu olduğu senaryonun simülasyonundan elde edilen D50 değerlerinin, 63 Hz ve 125 Hz frekans aralığında sabit seyrettiği, ancak frekans yükseldikçe belirgin bir artış gösterdiği tespit edilmiştir. %75 ve %100 doluluk oranları için elde edilen simülasyon sonuçları da benzer eğilimler sergilemektedir. Orta frekans bölgesinde D50 değerleri, %50 dolulukta 0.41, %75 dolulukta 0.41 ve %100 dolulukta 0.45 olarak elde edilmiştir.



Şekil 65. Doluluk oranlarına ait senaryoların simülasyonlarından elde edilen D50 değerleri

Konser salonunun doluluk oranlarına ait simülasyonlardan elde edilen D50 değerlerine yönelik yapılan genel değerlendirmede, orta frekans bölgesinde farklı senaryoların simülasyonlarından elde edilen tüm D50 parametre değerlerinin, referans olarak kabul edilen optimum değer aralığını sağladığı belirlenmiştir.

Konser salonunun mevcut durumu ve doluluk oranlarının değişimine bağlı olarak elde edilen D50 değerlerinin grid dağılımı Şekil 66'da verilmiştir.



Şekil 66. Isarphilarmonie Konser Salonunun farklı doluluk oranlarından elde edilen D50 değerlerinin grid dağılımı (500 Hz)

STI Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait farklı doluluk senaryolarının simülasyonlarından elde edilen ortalama STI değerleri Şekil 67'de verilmiştir.

Konser salonundan elde edilen STI parametresine ait ortalama veriler değerlendirilirken, Houtgast vd. (1980) tarafından önerilen optimum değer aralıkları referans alınmıştır. Referans olarak alınan optimum değer aralıkları:

0.00 - 0.30 arasında ise “Kötü”

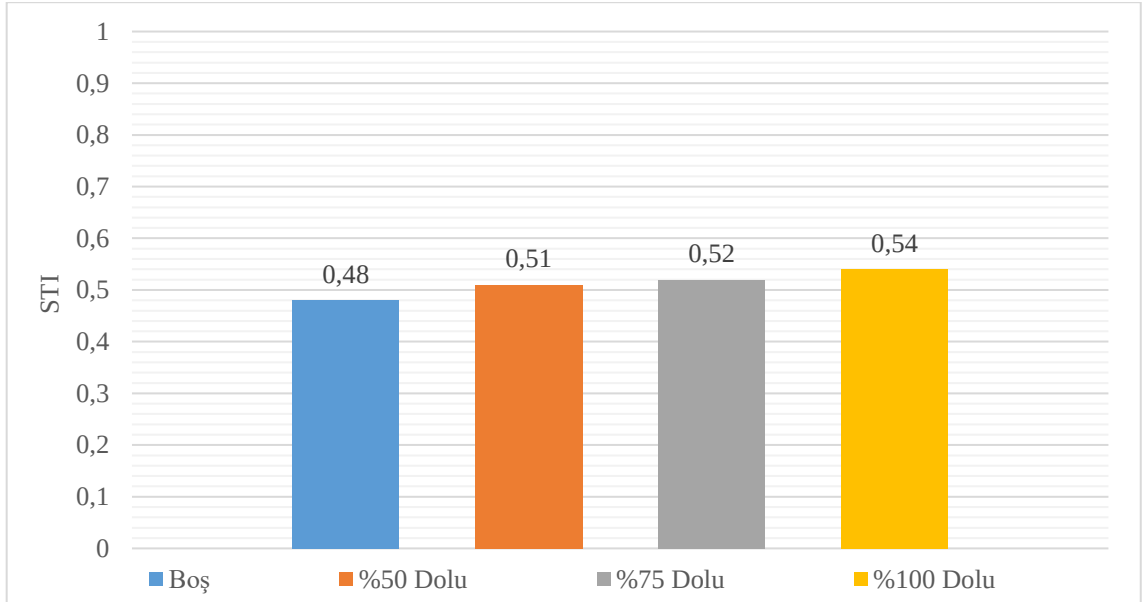
0.30 - 0.45 arasında ise “Zayıf”

0.45 - 0.60 arasında ise “Orta”

0.60 - 0.75 arasında ise “İyi”

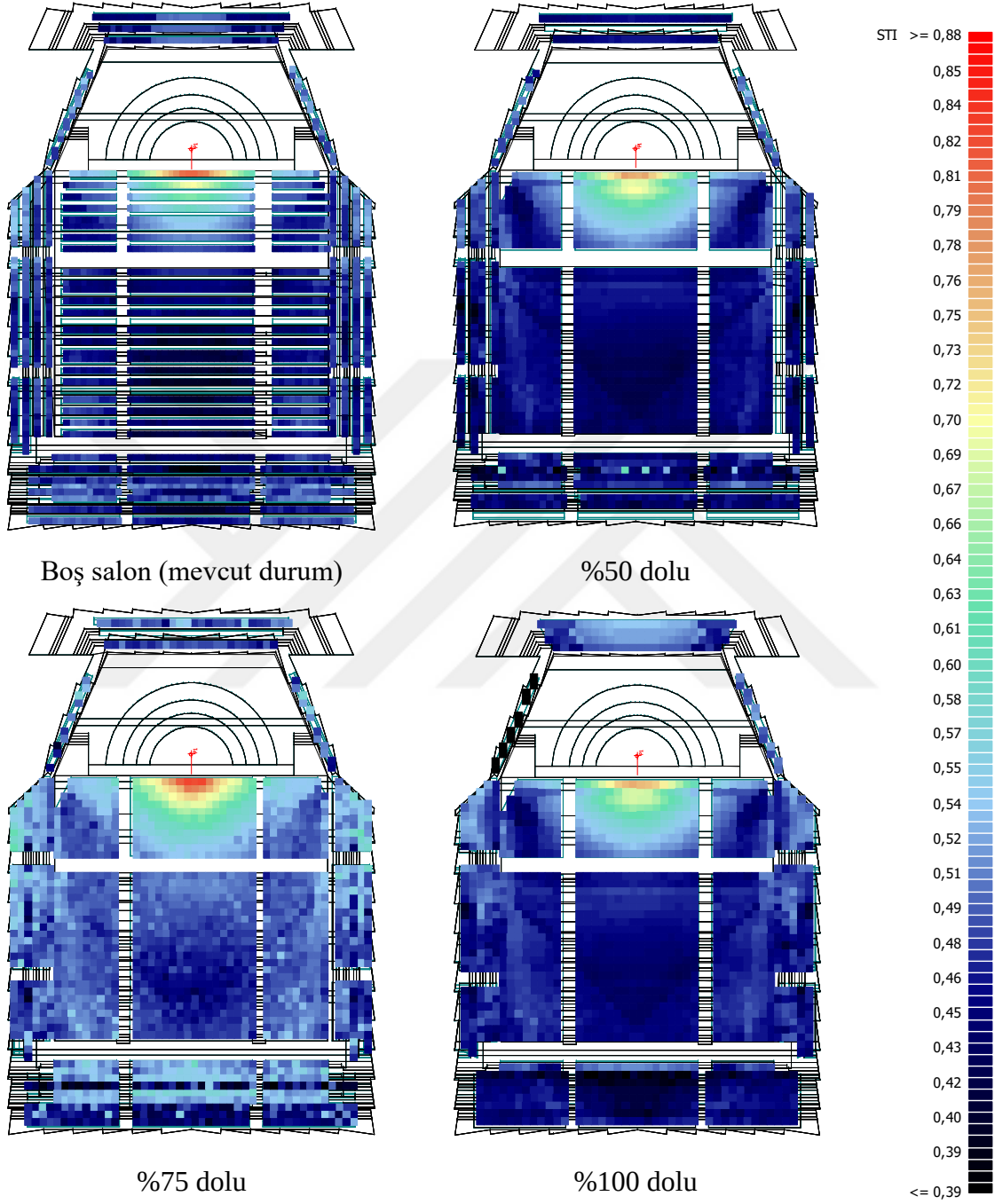
0.75 - 1.00 arasında ise “Çok iyi”, olarak tanımlanmıştır.

Solunun boş olduğu senaryonun simülasyonundan elde edilen ortalama STI değeri 0.48 olup, bu değer “orta” düzeyde bir konuşma anlaşılabilirliğine karşılık gelmektedir. Salonun %50 dolu olduğu senaryoda ortalama STI değeri 0.51, %75 dolulukta 0.52 ve %100 dolulukta ise 0.54 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen tüm bu değerlerden, salondaki ortalama konuşma anlaşılabilirliğinin “orta” düzeyde olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 67. Doluluk oranlarına ait senaryoların simülasyonlarından elde edilen STI değerleri

Konser salonunun mevcut durumu ve doluluk oranlarının değişimine bağlı olarak elde edilen STI değerlerinin grid dağılımı Şekil 68’de verilmiştir.

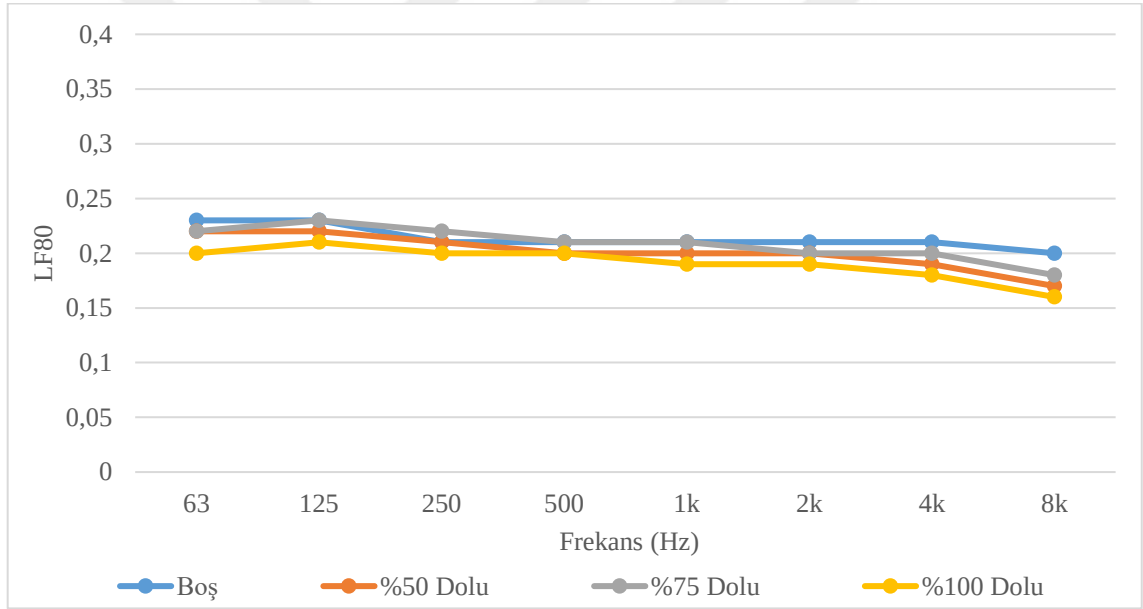


Şekil 68. Isarphilharmonie Konser Salonunun farklı doluluk oranlarından elde edilen STI değerlerinin grid dağılımı (500 Hz)

LF80 Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait farklı doluluk senaryolarının simülasyonlarından elde edilen LF80 değerleri Şekil 69'da verilmiştir.

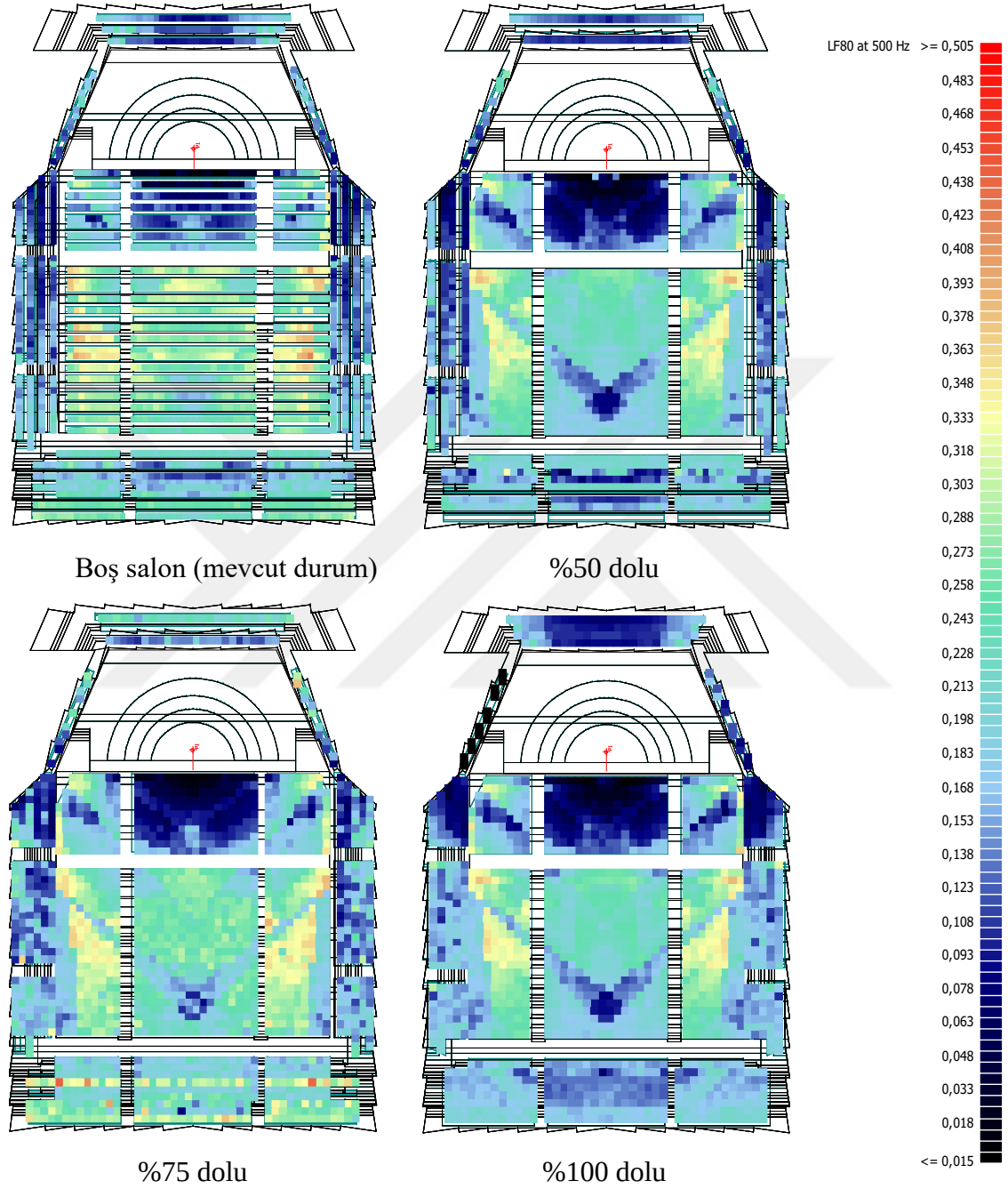
Konser salonunun simülasyonlarından elde edilen LF80 parametresine ait veriler değerlendirilirken, orta frekans bölgesinde ISO 3382-1:2009 tarafından önerilen $0.05 \leq LF80 \leq 0.35$ değer aralığı referans alınmıştır. Referans alınan değer aralığı, Şekil 69'da verilen grafik üzerinde taralı bir şekilde gösterilmiştir.

Simülasyon sonuçlarına göre, tüm doluluk senaryolarında elde edilen LF80 değerlerinin ilgili frekans bantlarında referans aralık içinde kaldığı, ancak frekans yükseldikçe LF80 değerlerinde genel bir azalma eğilimi olduğu belirlenmiştir. Özellikle %100 dolu senaryoda, 8000 Hz'de 0.16 değerine kadar düşüş gerçekleşmiştir. Diğer yandan, boş ve %75 dolu senaryoların daha dengeli bir dağılıma sahip oldukları tespit edilmiştir.



Şekil 69. Doluluk oranlarına ait senaryoların simülasyonlarından elde edilen LF80 değerleri

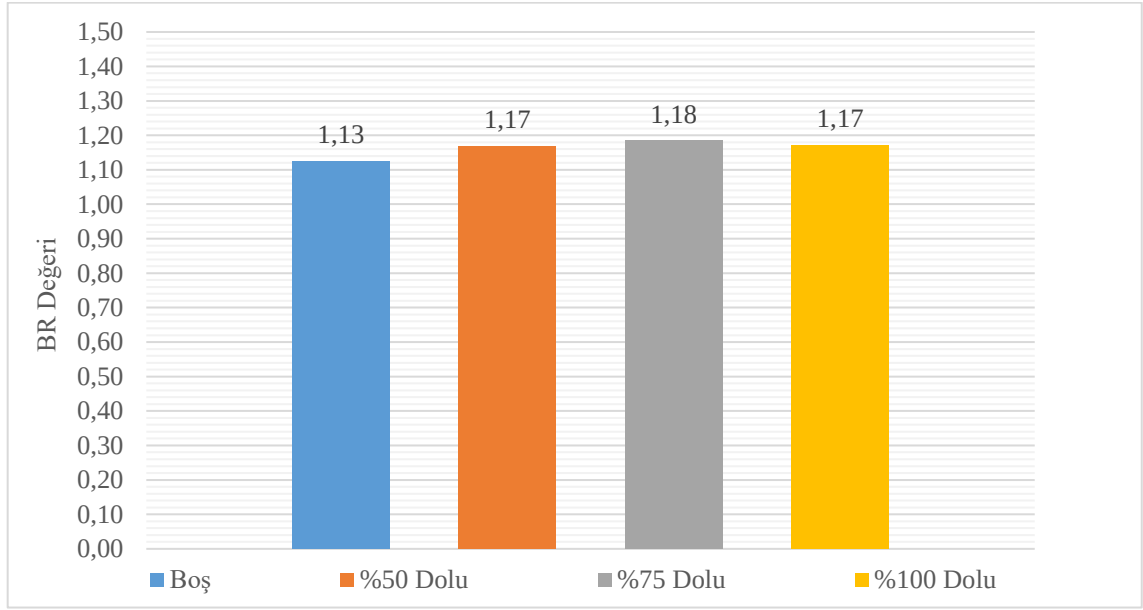
Konser salonunun mevcut durumu ve doluluk oranlarının değişimine bağlı olarak elde edilen LF80 değerlerinin grid dağılımı Şekil 70’te verilmiştir.



Şekil 70. Isarphilarmonie Konser Salonunun farklı doluluk oranlarından elde edilen LF80 değerlerinin grid dağılımı (500 Hz)

BR Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait farklı doluluk senaryolarının simülasyonlarından elde edilen BR değerleri Şekil 71'de verilmiştir.

Konser salonunun simülasyonlarından elde edilen BR parametresine ait veriler değerlendirilirken, Inacio (2022) ve Arau (1999) tarafından önerilen optimum değer aralıkları kullanılmıştır. Bu değer aralıkları, reverberasyon süresinin 1.8 sn'den fazla olduğu mekanlar için 1.1 ile 1.25; 1.8 sn'den az olduğu mekanlar için ise 1 ile 1.45 olarak belirlenmiştir (Inacio, 2022; Arau, 1999).



Şekil 71. Doluluk oranlarına ait senaryoların simülasyonlarından elde edilen BR değerleri

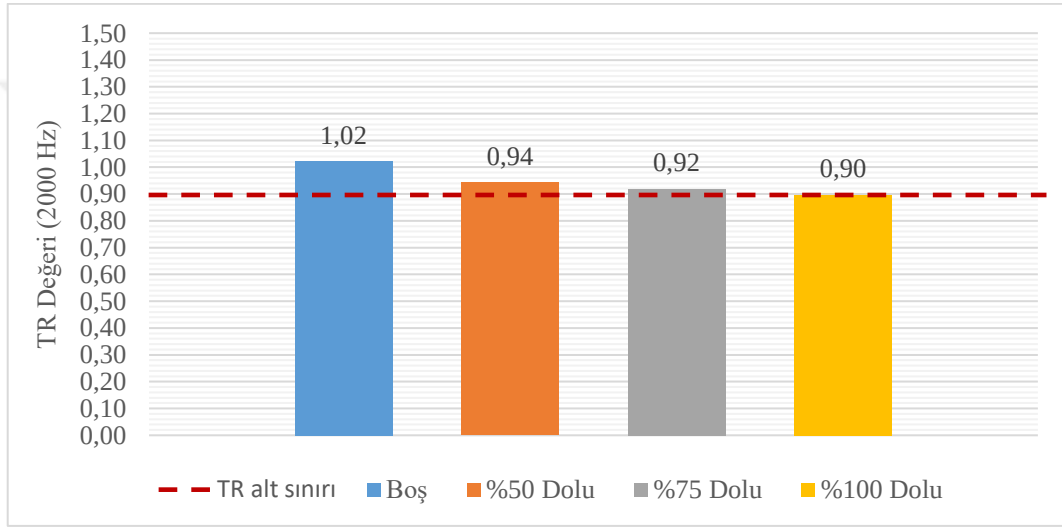
Konser salonunun doluluk oranlarına ait simülasyonlardan elde edilen BR değerlerinin, referans alınan değer aralıklarına göre yapılan analiz sonuçları Tablo 15'te verilmiştir. Farklı senaryoların simülasyonlarından elde edilen reverberasyon sürelerine göre hesaplanan bas oranlarının, referans olarak kabul edilen optimum değer aralıklarını sağladığı belirlenmiştir.

Tablo 15. Ortalama T30 ve BR değerlerinin değerlendirilmesi

Senaryolar	T30 (500 Hz-1000 Hz Ort.) sn	Değer Aralıkları	BR Değerleri
Boş	2.11	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.13
%50 Dolu	1.96	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.17
%75 Dolu	1.85	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.18
%100 Dolu	1.72	$1.0 \leq BR \leq 1.45$	1.17

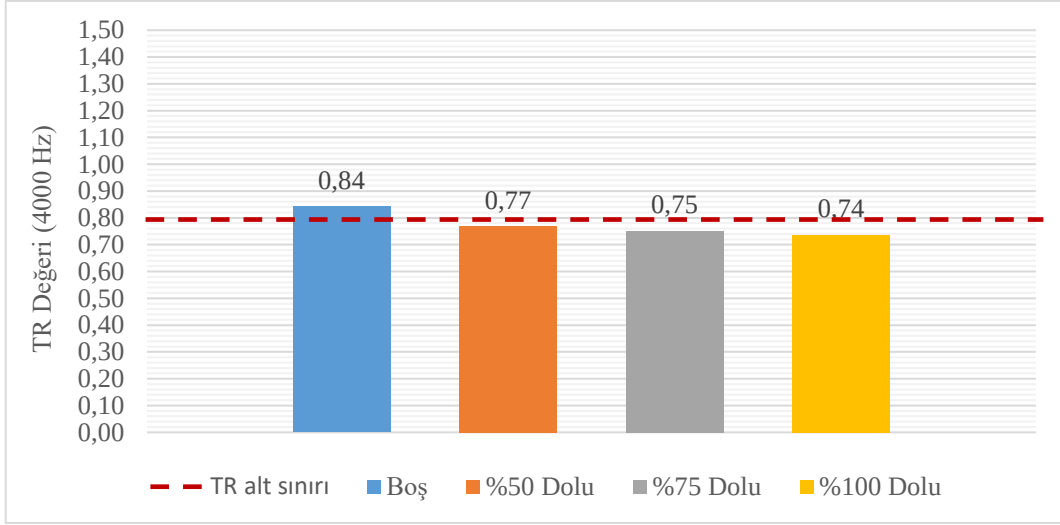
TR Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait farklı doluluk senaryolarının simülasyonlarından elde edilen TR değerleri Şekil 72 ve Şekil 73'te verilmiştir.

Konser salonuna ait simülasyonlardan elde edilen TR (Tiz Oranı) parametresine ilişkin veriler değerlendirilirken, Mehta ve arkadaşları (1999) tarafından önerilen optimum değer aralıkları temel alınmıştır. 2000 Hz için kullanılan $TR = EDT_{2000} / EDT_{mid}$ denklemine göre bu değer 0.9'un üzerinde olması gerektiği; 4000 Hz için kullanılan $TR = EDT_{4000} / EDT_{mid}$ denklemine göre ise 0.8'in üzerinde olması gerektiği belirtilmiştir.



Şekil 72. Doluluk oranlarından elde edilen TR değerleri (2000 Hz)

Konser salonunun farklı doluluk oranlarına ait simülasyon verilerine göre, 2000 Hz'deki EDT değeri kullanılarak elde edilen TR değerlerinin, grafik üzerinde yatay çizgiyle belirtilen minimum TR sınırını karşıladığı ve hatta bazı senaryolarda bu sınırın üzerinde kaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, doluluk oranı arttıkça TR değerlerinde düşüş gözlenirse de, tüm senaryolarda TR değerlerinin önerilen optimum aralığı sağladığı tespit edilmiştir.



Şekil 73. Doluluk oranlarından elde edilen TR değerleri (4000 Hz)

Konser salonunun farklı doluluk oranlarına ait simülasyon verilerine göre, 4000 Hz'deki EDT değeri kullanılarak elde edilen TR değerlerinin yalnızca boş senaryoda, grafik üzerinde yatay çizgiyle belirtilen minimum TR sınırını karşıladığı; diğer doluluk oranlarına sahip senaryolarda ise bu sınırın altında kaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, doluluk oranı arttıkça TR değerlerinde belirgin bir azalma meydana gelmiştir. %50, %75 ve %100 dolu senaryolarda, 4000 Hz'e ait TR değerleri düşük seviyelerde kalmış ve bu durum ilgili frekansta yeterli EDT değerlerinin elde edilemediğini ortaya koymuştur.

3.2. Birleştirilmiş Hacimli Senaryoların Sesin Nesnel Parametreleri Açısından Değerlendirilmesi

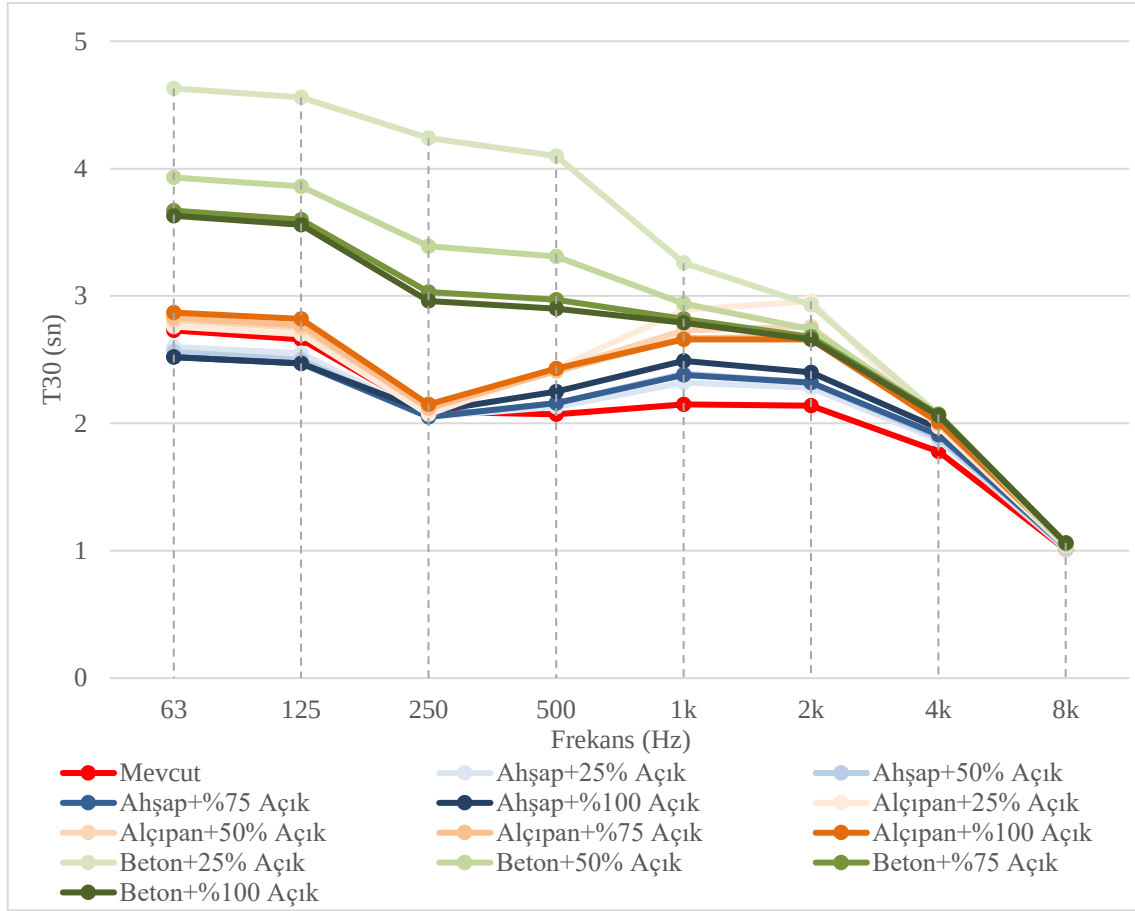
Bu bölümde, Isarphilharmonie Konser Salonu'nda farklı hacim oranları, açıklık düzeyleri ve malzeme türleriyle oluşturulan birleştirilmiş hacim senaryolarının simülasyonlarından elde edilen T30, EDT, D50, C80, LF80, STI, TR ve BR parametrelerine ait veriler ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Senaryolar yalnızca hacim, açıklık ve malzeme değişkenleri değiştirilerek, salonun boş durumu sabit kalacak şekilde oluşturulmuştur.

3.2.1. %20 Birleştirilmiş Hacimli Senaryoların Değerlendirilmesi

Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %20 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ile bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar sonucunda elde edilen T30, EDT, C80, D50, LF80, STI, TR ve BR parametrelerine ait veriler, “2.5. Sesin Nesnel Parametrelerine Yönelik Kabuller” başlığı altında belirtilen kriterlere göre değerlendirilmiştir.

T30 Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %20 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen T30 değerleri Şekil 74'de sunulmuştur.

Konser salonunun genel olarak değerlendirilmesinde T30 parametresine ait değer aralığı olarak, Knudsen ve Harris (1988) tarafından önerilen grafikten elde edilen $1.56 \leq T30 \leq 1.90$ değer aralığı referans olarak kabul edilmiştir (500 Hz). Referans olarak alınan değer aralığı, Şekil 74'te verilen grafik üzerinde taralı bir şekilde gösterilmiştir (Knudsen ve Harris, 1988).



Şekil 74. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen T30 değerleri

%20 Birleştirilmiş hacimli tüm senaryoların simülasyonlarından elde edilen 500 Hz'deki T30 değerleri Tablo 16'da verilmiştir.

Tablo 16. %20 Birleştirilmiş hacimli tüm senaryolardan elde edilen T30 değerleri (500 Hz)

	Mevcut	%20 Birleştirilmiş Hacim											
		Ahşap Malzeme				Alçıpan Malzeme				Beton			
		%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık
T30 (sn) (500 Hz)	2.07 sn	2.13 sn	2.16 sn	2.16 sn	2.25 sn	2.43 sn	2.42 sn	2.41 sn	2.43 sn	4.1 sn	3.31 sn	2.97 sn	2.90 sn

Mevcut durumun simülasyonundan elde edilen T30 değerleri, düşük frekanslarda (250 Hz'e kadar) azalma eğilimi gösterirken; 250 Hz ile 2000 Hz frekans aralığında belirli bir artış göstermektedir. Buna ek olarak, 2000 Hz'den 8000 Hz'e doğru reverberasyon süresinde

belirgin bir azalma görülmektedir. Mevcut durum için 500 Hz oktav bant frekanstaki T30 değeri 2.07 sn olarak elde edilmiştir.

500 Hz’de elde edilen sonuçlar incelendiğinde, mevcut durum için elde edilen T30 değerinin, belirlenen referans aralığın üzerinde kaldığı açıkça görülmektedir. Benzer şekilde, salonun %20 birleştirilmiş hacimli tüm senaryolara ait simülasyon sonuçlarında da T30 değerlerinin referans aralığı aştığı tespit edilmiştir.

%20 Birleştirilmiş hacimli tüm senaryolardan elde edilen değerler incelendiğinde, referans olarak kabul edilen optimum değer aralığına en fazla yaklaşan senaryoların, iç yüzeylerinde ahşap malzeme kullanılan durumlar olduğu belirlenmiştir. Birleştirilmiş hacim senaryolarında, yüzey kaplamalarında ahşap malzeme tercih edilmesi ve açıklık oranlarının artırılmasıyla birlikte T30 değerlerinde yükselme eğilimi tespit edilmiştir. Alçıpan malzemenin kullanıldığı senaryolarda elde edilen T30 değerlerinin, ahşap ve beton ile elde edilen değerler arasında kaldığı belirlenmiştir. Açıklıkların tamamen açıldığı durumlarda bu değerler referans aralığına yaklaşmış olsa da, söz konusu optimum aralık tam olarak sağlanamamıştır.

Beton malzeme kullanılan senaryolarda özellikle düşük frekanslarda elde edilen T30 değerlerinin, diğer senaryolarda kaydedilen değerlere kıyasla oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu değerlerin bazı durumlarda 4 sn’ye kadar ulaştığı tespit edilmiştir. Açıklık oranlarına göre yapılan değerlendirmede, en uzun reverberasyon süresinin %25 açık durumda elde edildiği belirlenmiştir. %100 ve %75 açıklık oranlarına sahip senaryolarda elde edilen T30 değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu, ancak %50 ve %25 açıklık durumlarındaki T30 değerlerinde belirgin farklılıklar ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

%20 Birleştirilmiş hacimli tüm senaryolardan elde edilen değerler incelendiğinde, 2000 Hz ve üzerindeki frekanslarda T30 değerlerinin belirgin biçimde azaldığı ve kullanılan tüm malzeme türlerinde benzer eğilimlerin olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, konser salonunda yüksek frekans aralığındaki seslerin yutululumunun daha etkili gerçekleştiğini göstermektedir.

Birleştirilmiş hacimli konser salonlarında ana hacim ve bu hacme eklenen hacimlerin içinde kullanılan malzemeler ile bu hacimler arasındaki bağlantıyı sağlayan açıklık oranlarının elde edilen T30 değerlerini oldukça etkilediği görülmüştür.

Farklı müzik türleri için orta frekans bölgesinde (500 Hz - 1000 Hz) önerilen optimum değer aralıklarına ait değerlendirmeler Tablo 17’ye göre yapılmıştır.

Tablo 17'nin devamı

Organ	$2.5 \leq T30 \leq 3.5$	(Long, 2006)	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+
	$T30 > 2.5$	(Barron, 1993)	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
	$2 \leq T30 \leq 2.5$	(Mehta vd, 1999)	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
	$2.87 \leq T30 \leq 3.51^*$	Şekil 58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-
Pop müzik	$0.6 \leq T30 \leq 1.2$	(Adelman-Larsen vd., 2010)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rock müzik	$0.6 \leq T30 \leq 1.2$	(Adelman-Larsen vd., 2010)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Klasik Türk Müziği	$1.1 \leq T30 \leq 1.30$	Torun, 2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$0.75 \leq T30 \leq 1.1$	(Ozcevik, 2015)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$0.97 \leq T30 \leq 1.2$	(Ozcevik, 2015)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Piyano Solosu	$1.2 \leq T30 \leq 2.0$	(Hidaka & Nishihara, 2022)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Keman Solosu	$1.8 \leq T30 \leq 2.4$	Hidaka & Nishihara, 2022	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Senfoni	$2.0 \leq T30 \leq 2.4$	(Gade, 2014)	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
	$2.48 \leq T30 \leq 3.03^*$	Şekil 58	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+
Ritmik Müzik	$0.8 \leq T30 \leq 1.5$	Gade, 2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hafif Müzik Konser Salonu	$1.4 \leq T30 \leq 1.8$	Mehta vd, 1999	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$2.16 \leq T30 \leq 2.64^*$	Şekil 58	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-
Orkestra. Konser Salonu	$1.8 \leq T30 \leq 2.2$	Mehta vd, 1999	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elde edilen reverberasyon süresi, önerilen optimum aralığın			Altındadır.					Arasındadır.					Üstündedir.		
* : Şekil 58’de 24000 m ³ için verilen optimum T30 değerinin $\pm\%10$ ’u hesaplanarak belirlenmiştir.															

500 Hz ile 1000 Hz arasındaki orta frekans bölgesi için önerilen optimum reverberasyon süresi aralıkları incelendiğinde, salon akustiğinin her bir müzik türü için farklı düzeyde reverberasyon süresine gereksinim duyduğu tespit edilmiştir. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen verilere bakıldığında, bu değerlerin çoğu durumda akustik alanda farklı otoriteler tarafından önerilen optimum aralıkların üzerinde kaldığı belirlenmiştir.

Tablo 17’de sunulan veriler ve karşılaştırmalar incelendiğinde, özellikle ahşap malzeme kullanılan birleştirilmiş hacim senaryolarından elde edilen verilerin, önerilen optimum değer aralığını sağlama konusunda diğer senaryolara kıyasla daha başarılı olduğu tespit edilmiştir.

Ahşap malzeme kullanılan senaryolardan elde edilen değerler genel olarak incelendiğinde, bu değerlerin önerilen optimum değer aralıklarına, diğer senaryolara kıyasla daha fazla yaklaştığı belirlenmiştir. Özellikle klasik dönem ve romantik dönem müzikleri için belirtilen optimum aralıkların sağlandığı görülmüştür. Bunun yanı sıra, keman solosu ile Gade’nin (2014) senfoni müziği için önerdiği optimum değer aralıklarının ve Şekil 58’de verilen hafif müzik için tanımlanan aralığın da karşılandığı tespit edilmiştir.

Alçıpan malzeme kullanılan senaryolardan elde edilen veriler genel olarak incelendiğinde, organ müziği dışındaki bazı müzik türleri için uygun sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Özellikle Şekil 58’den elde edilen bulgular, senfoni ve hafif müzik türleri için önerilen reverberasyon sürelerinin sağlandığını ortaya koymuştur. Yalnızca %25 açıklığa sahip senaryoda elde edilen T30 değerlerinin, önerilen aralıkların üzerinde kaldığı tespit edilmiştir. Diğer müzik türleri için elde edilen T30 değerlerinin ise çoğunlukla optimum değer aralıklarını aştığı belirlenmiştir.

Beton malzeme kullanılan senaryolar değerlendirildiğinde ise, elde edilen reverberasyon süresi değerlerinin genel olarak önerilen optimum aralıkların oldukça üzerinde olduğu belirlenmiştir. Bu durum, birçok müzik türü için salonda aşırı yankılı bir akustik ortama neden olmuştur. Bununla birlikte, organ müziği ve Şekil 58’den elde edilen bazı optimum reverberasyon aralıklarının beton malzeme kullanılan senaryolarla uyum gösterdiği de tespit edilmiştir.

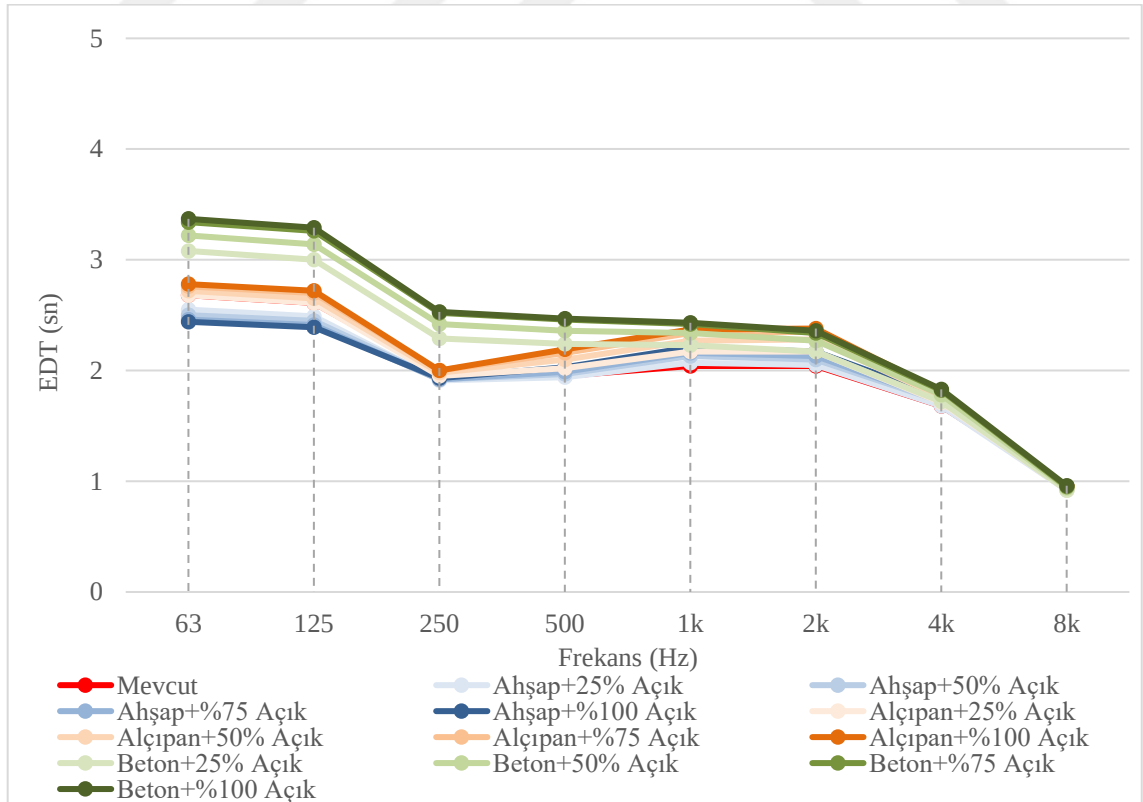
Organ müziği gibi uzun reverberasyon süresine ihtiyaç duyan müzik türü özelinde yapılan değerlendirmelerde, mevcut senaryodan elde edilen T30 değerinin, Mehta ve diğ. (1999) sunduğu değerler hariç, önerilen optimum aralıkların altında kaldığı belirlenmiştir. Benzer bir durum, ahşap malzeme kullanılan dört farklı birleştirilmiş hacim senaryosunda da gerçekleşmiştir. Buna karşın, alçıpan kullanılan senaryolarda farklı bir eğilim ortaya çıkmıştır. Bu senaryolardan elde edilen reverberasyon süresi değerlerinin, Long (2006) ve Barron (1993) tarafından önerilen optimum aralıkları sağladığı, ancak Mehta’nın sunduğu aralığın üzerinde ve Şekil 58’den elde edilen optimum değer aralığının ise altında kaldığı tespit edilmiştir. Beton malzemenin kullanıldığı senaryolarda yüksek reverberasyon süreleri

elde edilmiş olsa da, tüm kaynaklardaki optimum değer aralıkları sağlanamamış; yalnızca dört kaynaktan üçünde belirtilen aralıkların karşılandığı tespit edilmiştir.

EDT Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %20 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen EDT değerleri Şekil 75'de sunulmuştur.

Konser salonunun genel değerlendirilmesinde EDT parametresine ait optimum değer aralığı belirlenirken, öncelikle Şekil 57'den elde edilen T30 değeri ile Gade'nin (1989) önerdiği T30-EDT ilişkisi kullanılmıştır. Daha sonra Abdülrahimov (2005) ve Long (2006)'un önerdiği $\pm\%10$ tolerans dikkate alınarak optimum değer aralığı belirlenmiştir. Bu kapsamda, 500 Hz'de EDT parametresi için önerilen optimum değer aralığı $1.53 \leq \text{EDT} \leq 1.87$ sn. olarak hesaplanmıştır. Referans olarak alınan optimum değer aralığı, Şekil 75'de verilen grafik üzerinde taralı bir şekilde gösterilmiştir.

Farklı müzik türleri için orta frekans bölgesinde (500 Hz - 1000 Hz) önerilen optimum değer aralıklarına ait değerlendirmeler Tablo 19'da verilmiştir.



Şekil 75. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen EDT değerleri

%20 Birleştirilmiş hacimli tüm senaryoların simülasyonlarından elde edilen 500 Hz'deki EDT değerleri Tablo 18'de verilmiştir.

Tablo 18. %20 Birleştirilmiş hacimli tüm senaryolardan elde edilen EDT değerleri (500 Hz)

	Mevcut	%20 Birleştirilmiş Hacim											
		Ahşap Malzeme				Alçıpan Malzeme				Beton			
		%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık
EDT (sn) (500 Hz)	1.95 sn	1.94 sn	1.97 sn	1.99 sn	2.03 sn	2.02 sn	2.1 sn	2.16 sn	2.19 sn	2.24 sn	2.36 sn	2.46 sn	2.47 sn

500 Hz'de elde edilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, mevcut durum için elde edilen EDT değerinin, belirlenen referans aralığın üzerinde kaldığı açıkça görülmektedir.

250 Hz ile 1000 Hz frekans aralığında elde edilen EDT değerlerinin genel olarak belirlenen optimum aralığa yaklaştığı, ancak bu aralığı tam olarak sağlayamadığı tespit edilmiştir.

2000 Hz ve üzeri frekanslara doğru tüm senaryolarda EDT değerlerinde belirgin bir düşüş yaşandığı tespit edilmiştir. 4000 Hz'de elde edilen tüm EDT değerlerinin optimum aralık içerisinde yer aldığı, ancak 8000 Hz'e doğru değerlerde keskin bir düşüş olduğu ve bu değerlerin optimum aralığın oldukça altında kaldığı belirlenmiştir.

Birleştirilmiş hacimli senaryolarda kullanılan farklı malzeme türleri ve açıklık oranlarına bağlı olarak, 500 Hz'de elde edilen EDT değerleri arasında 0.53 sn.'ye varan farklar oluştuğu belirlenmiştir.

Düşük frekanslarda en yüksek EDT değerlerinin sırasıyla beton malzeme kullanılan %100, %75, %50 ve %25 açıklık oranlarına sahip senaryolarda elde edildiği tespit edilmiştir. Bu bulgular, ilgili senaryolarda gözlemlenen T30 değerlerinin grafik eğilimleriyle genel olarak örtüşmektedir. Ancak, T30 parametresinde en yüksek değerler genellikle düşük açıklık oranlarında elde edilirken, EDT parametresinde en yüksek değerlerin en fazla açıklık oranına sahip senaryolarda görülmesi dikkat çekicidir. Bu durum, EDT'nin erken yansımaların karakterine daha duyarlı bir parametre olması nedeniyle, açıklık oranındaki artıştan farklı şekilde etkilendiğini göstermiştir.

Farklı müzik türlerinin ihtiyaç duyduğu optimum EDT değerleri de birbirinden farklılık göstermektedir. Orta frekans bölgesinde (500-1000 Hz) farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıkları ile %20 birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen simülasyon sonuçları arasındaki karşılaştırmalı ilişki Tablo 19’da sunulmuştur. Tabloda yeşil renkle gösterilen hücreler elde edilen EDT değerlerinin önerilen optimum değer aralığında yer aldığını, mavi hücreler bu aralığın üzerinde kalan değerleri, kırmızı hücreler ise optimum aralığın altında kalan değerleri ifade etmektedir.

Tablo 19. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryolarda elde edilen ortalama EDT değerlerinin önerilen optimum aralıklarla karşılaştırılması

			Mevcut	%20 Birleştirilmiş Hacim											
				Ahşap Malzeme				Alçıpan Malzeme				Beton			
				%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık
Müzik Türü	Optimum Değer Aralıkları	EDT (sn) Kaynak	2.00 sn	2.01 sn	2.05 sn	2.08 sn	2.12 sn	2.10 sn	2.19 sn	2.25 sn	2.28 sn	2.24 sn	2.35 sn	2.44 sn	2.45 sn
Romantik Müzik	$1.5 \leq EDT \leq 2.2$ (Bruckner)	Hidaka vd.,2024	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
Klasik Müzik	$1.4 \leq EDT \leq 2.0$ (Mozart)	Hidaka vd.,2024	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$1.5 \leq EDT \leq 2.0$ (Rossini)	Hidaka vd.,2024	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Klasik Türk Müziği	$1.20 \leq EDT \leq 1.4$	Torun, 2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Senfoni	$2.50 \leq EDT \leq 3.1^*$	Şekil 58*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modern Müzik	$1.5 \leq EDT \leq 2.0$ (Stravinsky)	Hidaka vd.,2024	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hafif Müzik Konser Salonu	$2.13 \leq EDT \leq 2.65$	Şekil 58*	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
Organ	$2.90 \leq EDT \leq 3.6$	Şekil 58*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elde edilen reverberasyon süresi, önerilen optimum aralığın				Altındadır.				Arasındadır.				Üstündedir.			
* : Şekil 58’te 24000 m ³ için verilen optimum EDT değerinin $\pm\%10$ ’u hesaplanarak belirlenmiştir.															

500 Hz ile 1000 Hz arasındaki orta frekans bölgesi için önerilen optimum EDT değer aralıkları incelendiğinde, salon akustiğinin her bir müzik türü için farklı EDT düzeylerine

ihtiyaç duyduğu belirlenmiştir. Mevcut durumda elde edilen EDT değerlerinin, klasik müzik ve modern müzik için önerilen tüm optimum değer aralıklarını karşıladığı belirlenmiştir. Elde edilen değer, Klasik Türk müziği için verilen optimum değer aralığının üzerinde, senfoni, hafif müzik ve organ müziği için önerilen aralıkların ise altında kaldığı tespit edilmiştir.

Ahşap malzeme kullanılan senaryolardan elde edilen veriler genel olarak incelendiğinde, yalnızca romantik müzik için önerilen optimum EDT değer aralığının karşılandığı; diğer müzik türleri için ise bu aralıkların tam olarak sağlanamadığı tespit edilmiştir.

Alçıpan malzeme kullanılan senaryolarda çoğu müzik türü için optimum değer aralıkları karşılanamamıştır. Buna karşın, %25 açıklık oranına sahip senaryoda romantik müzik, %50 açıklık oranına sahip senaryoda romantik müzik ve hafif müzik, %75 ve %100 açıklık oranlarına sahip senaryolarda ise yalnızca hafif müzik için önerilen optimum değer aralıklarının sağlandığı belirlenmiştir.

Beton malzeme kullanılan senaryolar değerlendirildiğinde yalnızca hafif müzik için Şekil 58’de önerilen EDT aralığının sağlandığı tespit edilmiştir.

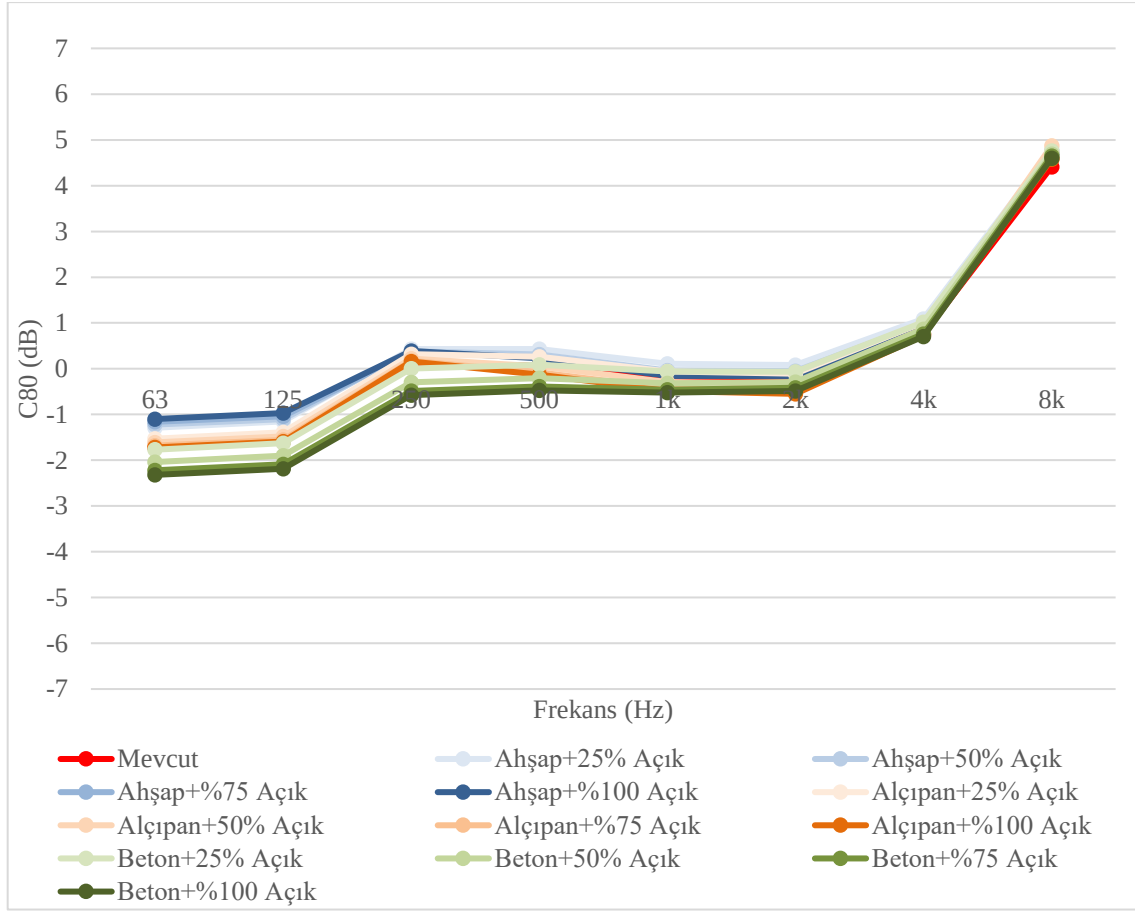
Şekil 58’den elde edilen organ müziğine yönelik optimum değer aralığının, incelenen hiçbir senaryo tarafından sağlanamadığı belirlenmiştir.

C80 Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu’na ait %20 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen C80 değerleri Şekil 76’da sunulmuştur.

Konser salonunun genel değerlendirilmesinde, C80 parametresi için ISO 3382-1:2009 standardında önerilen $-5 \text{ dB} \leq C80 \leq +5 \text{ dB}$ ve Barron (1993) tarafından önerilen $-2 \text{ dB} \leq C80 \leq +2 \text{ dB}$ aralıkları esas alınmıştır. Bu referans değer aralıkları, Şekil 76’deki grafikte taralı alanlarla gösterilmiştir.

Farklı müzik türlerine yönelik olarak, orta frekanslardaki önerilen C80 değer aralıklarına ilişkin değerlendirmeler Tablo 20’ye göre yapılmıştır.

Mevcut durumun simülasyonundan elde edilen C80’in, 63 Hz, 125 Hz, 1000 Hz ve 2000 Hz frekanslarda negatif değerlerdeyken; 250 Hz, 500 Hz, 4000 Hz ve 8000 Hz frekanslarda pozitif değerlerde olduğu görülmüştür. Mevcut durumda C80 parametresinin orta frekans bölgesindeki ortalama değeri -0.06dB olarak tespit edilmiştir.



Şekil 76. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen C80 değerleri

Konser salonunun %20 oranında birleştirilmiş hacimli senaryolarına ait simülasyonlardan elde edilen değerler incelendiğinde, C80 parametresine yönelik genel değerlendirmede, orta frekans bölgesinde elde edilen tüm değerlerin referans olarak kabul edilen her iki optimum aralık içerisinde yer aldığı belirlenmiştir.

Beton malzeme kullanılan %75 ve %100 açıklığa sahip senaryolarda, 63 Hz ve 125 Hz frekanslarında C80 parametresine ilişkin elde edilen verilerin, önerilen optimum değer aralığının altında kaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, düşük frekans bantlarında geç yansımaların daha baskın olduğunu ve söz konusu frekans aralıklarında ses netliğinin azaldığını göstermektedir.

Birleştirilmiş hacimde uygulanan malzeme türü ve açıklık oranındaki değişimin, C80 değerleri üzerinde belirgin bir etki oluşturmadığı açıkça görülmektedir.

Farklı müzik türlerinin ihtiyaç duyduğu optimum C80 değerleri de birbirinden farklılık göstermektedir. Orta frekans bölgesinde (500-1000 Hz) farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıkları ile %20 birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen simülasyon sonuçları arasındaki karşılaştırmalı ilişki Tablo 20’de sunulmuştur. Tabloda yeşil renkle gösterilen hücreler elde edilen C80 değerlerinin önerilen optimum değer aralığında yer aldığını, mavi hücreler bu aralığın üzerinde kalan değerleri, kırmızı hücreler ise optimum aralığın altında kalan değerleri ifade etmektedir.

Tablo 20. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryolarda elde edilen ortalama C80 değerlerinin önerilen optimum aralıklarla karşılaştırılması

			Mevcut	%20 Birleştirilmiş Hacim											
				Ahşap Malzeme				Alçıpan Malzeme				Beton			
				%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık
Müzik Türü	Optimum Değer Aralıkları	C80 (dB) Kaynak	-0.06	0.27	0.14	0.06	0.04	0.10	-0.12	-0.26	-0.31	0.02	-0.27	-0.43	-0.50
Romantik Müzik	$-3 \leq C80 \leq +4$	Ahnert& Tennhardt, 2008	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Klasik ve Modern Müzik	$C80 \geq -3$	Easera, n.d.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	$-2 \leq C80 \leq 0$	Holden, 2016	+	-	-	-	-	-	+	+	+	-	+	+	+
Klasik Türk Müziği	$-4 \leq C80 \leq +4$	Torun, 2019	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Piyano Solosu	$0 \leq C80 \leq 2.4$	Hidaka & Nishihara, 2022	-	+	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-
Keman Solosu	$-1.6 \leq C80 \leq 0.7$	Hidaka & Nishihara, 2022	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Senfoni	$-1 \leq C80 \leq +3$	Gade, 2014	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Elde edilen reverberasyon süresi, önerilen optimum aralığın				Altındadır.				Arasındadır.				Üstündedir.			
* : Şekil 54’te 24000 m ³ için verilen optimum EDT değerinin ±%10’u hesaplanarak belirlenmiştir.															

500 Hz ile 1000 Hz arasındaki orta frekans bölgesine ilişkin önerilen optimum C80 değer aralıkları incelendiğinde, salonda her müzik türü için farklı C80 düzeylerine ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, %20 birleştirilmiş hacimli senaryoların

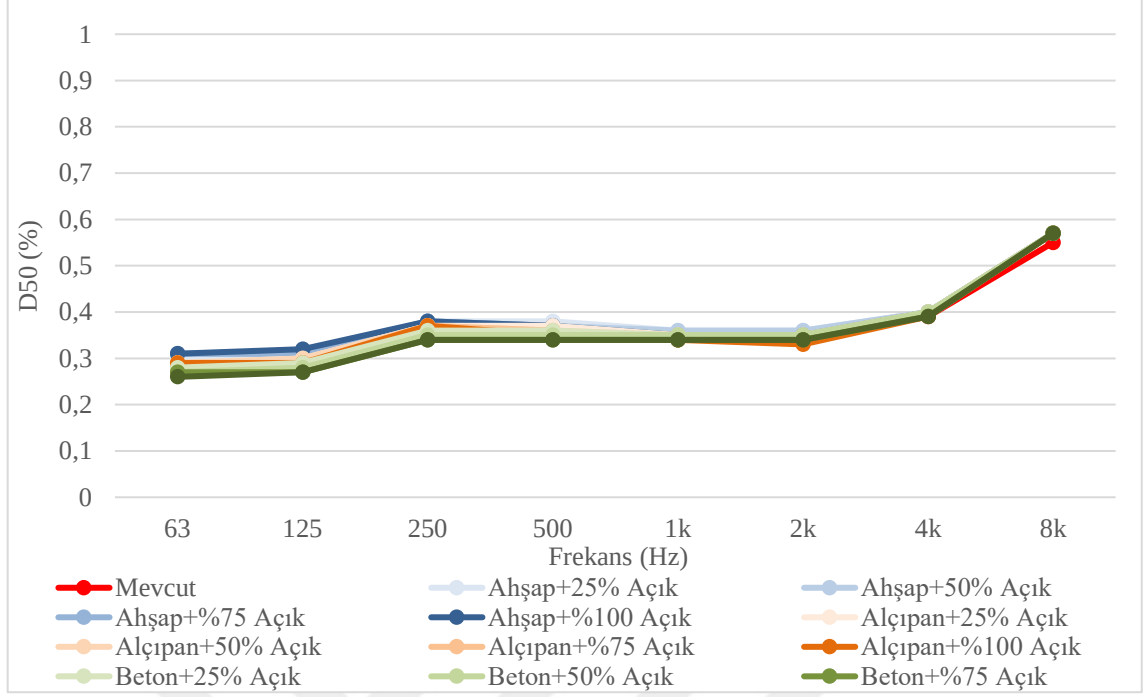
simülasyonlarından elde edilen C80 değerlerinin; klasik müzik, modern müzik, klasik Türk müziği, keman solosu ve senfoni türleri için önerilen optimum değer aralıklarını karşıladığı belirlenmiştir.

Piyano solosu için önerilen optimum C80 değer aralığı $0 \leq C80 \leq 2.4$ dB olarak belirtilmiştir. Bu nedenle, senaryolardan elde edilen negatif C80 değerleri söz konusu aralığın altında kalmıştır. Buna karşılık, klasik müzik için Holden (2016) tarafından önerilen aralık $-2 \leq C80 \leq 0$ dB olduğundan, senaryolarda elde edilen pozitif C80 değerlerinin de bu aralığın üzerinde kaldığı belirlenmiştir.

D50 Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %20 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen D50 değerleri Şekil 77'de sunulmuştur.

Konser salonundan elde edilen D50 parametresine ait veriler değerlendirilirken, orta frekans bölgesinde ISO 3382-1:2009 tarafından önerilen $0.3 \leq D50 \leq 0.7$ değer aralığı referans alınmıştır. Referans olarak alınan optimum değer aralığı, Şekil 77'de verilen grafik üzerinde taralı bir şekilde gösterilmiştir.

Mevcut durumun simülasyonundan elde edilen D50 değerleri, düşük frekanslarda (250 Hz'e kadar) artış eğilimi gösterirken, 250 Hz ile 2000 Hz frekans aralığında düşük miktarda azalma eğilimi göstermiştir. Buna ek olarak, 2000 Hz'den 8000 Hz'e doğru D50 değerlerinde belirgin bir artış gerçekleşmiştir. Mevcut durumda D50 parametresinin orta frekans bölgesindeki ortalama değeri 0.36 olarak elde edilmiştir. Bu değere göre mekandaki yansıyan ses enerjilerinin dengeli ve mekan içinde gerçekleştirilen konuşma faaliyetinin anlaşılabilirliğinin yeterli düzeyde olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 77. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen D50 değerleri

Konser salonuna ait simülasyonlardan elde edilen D50 değerlerine yönelik yapılan genel değerlendirme sonucunda, orta frekans bölgesinde farklı senaryolardan elde edilen tüm D50 değerlerinin referans olarak kabul edilen optimum değer aralığını karşıladığı belirlenmiştir.

Senaryoların simülasyonları sonucunda elde edilen tüm D50 grafiklerinde, 125 Hz'den sonra artış eğilimi gerçekleşmiş, 250 Hz ile 1000 Hz aralığında ise değerler optimum aralığın alt sınırına yaklaşmış olsa da belirlenen optimum değer aralığı sağlanmıştır. Düşük frekanslarda (63-125 Hz), belirginlik seviyeleri oldukça düşük düzeyde kalmıştır. Bu durum geç yansımaların baskın olduğu bu bantlarda sesin anlaşılabilirliğini güçleştirmektedir.

63 Hz için yapılan değerlendirmede, ahşap malzeme kullanılarak oluşturulan senaryolar dışındaki tüm senaryolarda D50 değerlerinin, önerilen optimum aralığın altında kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, düşük frekanslarda geç yansımaların etkisinin arttığını ve 63 Hz'de ses netliğinin salon hacmi içinde zayıfladığını ortaya koymaktadır.

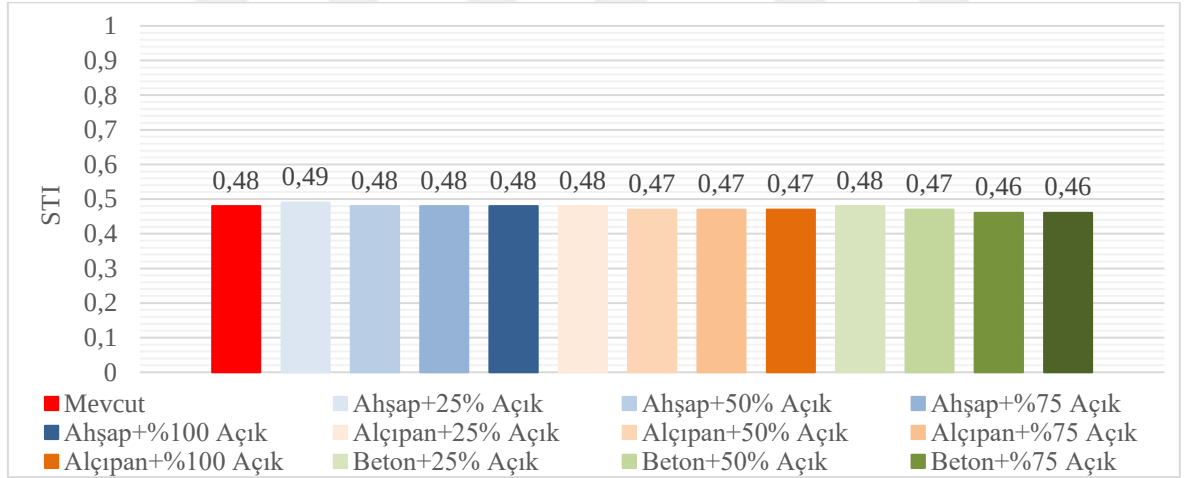
125 Hz için yapılan değerlendirmede, beton malzeme kullanılan tüm senaryolar ile alçıpan malzeme kullanılarak oluşturulan %75 ve %100 açıklığa sahip senaryolardan elde edilen D50 değerlerinin, önerilen optimum aralığın altında kaldığı belirlenmiştir. Bu sonuç,

düşük frekanslarda geç yansımaların etkisinin arttığını ve 125 Hz’de salon içi ses netliğinin zayıfladığını ortaya koymaktadır.

STI Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu’na ait %20 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen STI değerleri Şekil 78’te verilmiştir.

Konser salonu için elde edilen STI parametresi değerlendirilirken, Houtgast vd. (1980) tarafından önerilen optimum değer aralıkları referans alınmıştır. Referans olarak alınan optimum değer aralıkları:

- 0.00 - 0.30 arasında ise “Kötü”
- 0.30 - 0.45 arasında ise “Zayıf”
- 0.45 - 0.60 arasında ise “Orta”
- 0.60 - 0.75 arasında ise “İyi”
- 0.75 - 1.00 arasında ise “Çok iyi”, olarak tanımlanmıştır.



Şekil 78. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen STI değerleri

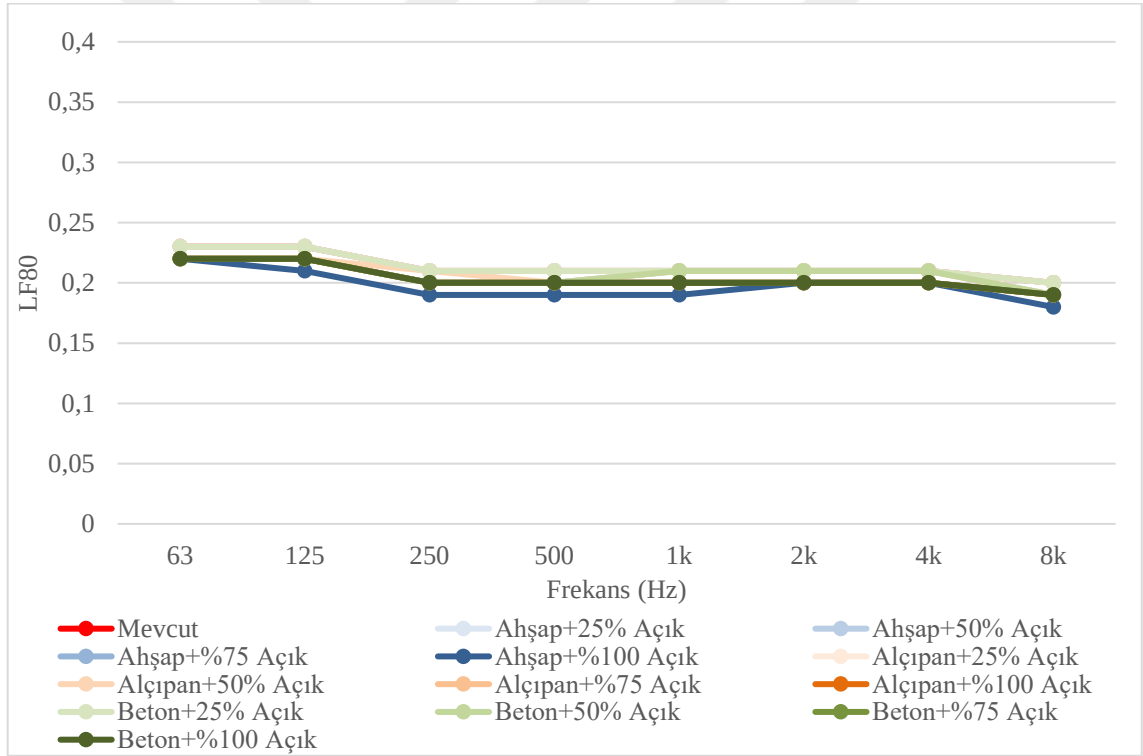
Mevcut durumun simülasyonu sonucu elde edilen ortalama STI değeri 0.48 olup, bu değer “orta” düzeyde bir konuşma anlaşılabilirliğine karşılık gelmektedir.

Tüm senaryolardan elde edilen Konuşma Anlaşılabilirlik İndeksi (STI) değerlerinin genellikle orta düzeye karşılık geldiği tespit edilmiştir. Özellikle beton malzeme kullanılan

senaryolarda, yüksek T30 ve EDT değerlerine rağmen salon içindeki ortalama STI düzeyinin yine orta seviyede kaldığı gözlemlenmiştir.

LF80 Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %20 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen LF80 değerleri Şekil 79'da sunulmuştur.

Konser salonunun simülasyonlarından elde edilen LF80 parametresine ait veriler değerlendirilirken, orta frekans bölgesinde ISO 3382-1:2009 tarafından önerilen $0,05 \leq LF80 \leq 0,35$ değer aralığı referans alınmıştır. Referans alınan değer aralığı, Şekil 79'da verilen grafik üzerinde taralı bir şekilde gösterilmiştir.



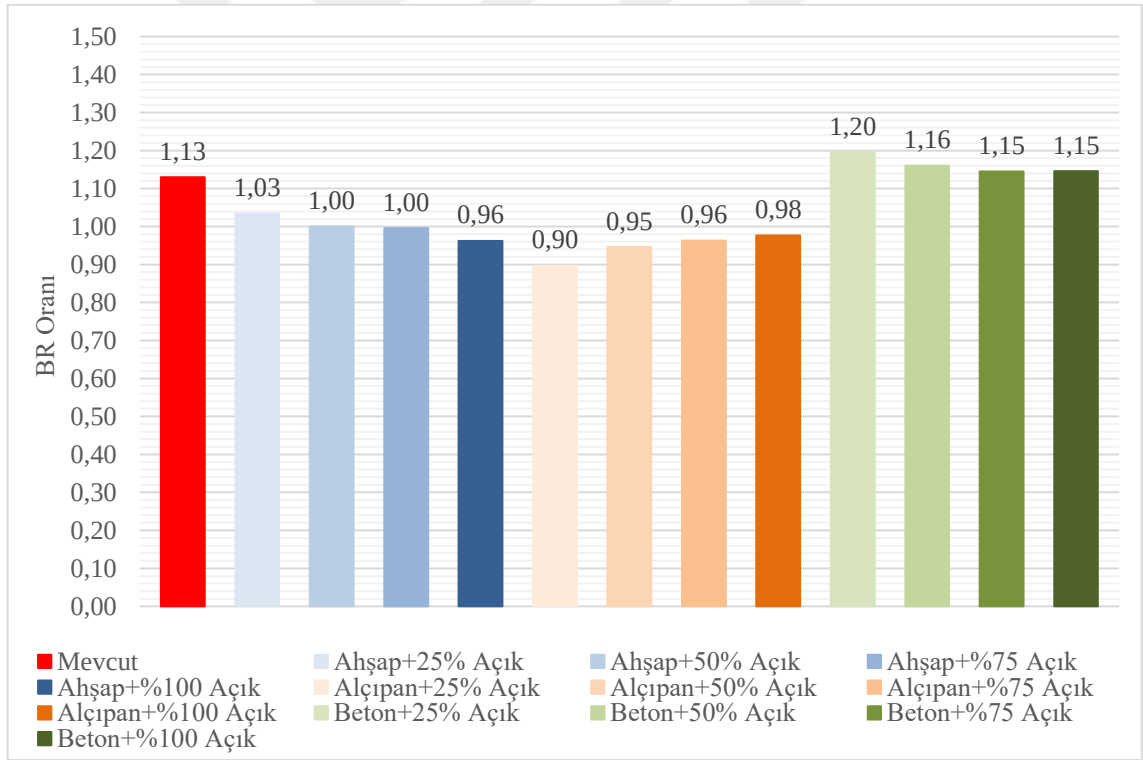
Şekil 79. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen LF80 değerleri

Mevcut durumun simülasyonu sonucunda elde edilen LF80 değerlerinin, ilgili frekans bantlarında referans aralıkları içinde kaldığı; ancak frekans arttıkça bu değerlerde belirgin bir azalma gözlemlendiği belirlenmiştir.

Ayrıca, simülasyonlardan elde edilen tüm verilerin belirlenen optimum değer aralıkları içerisinde yer aldığı tespit edilmiştir.

BR Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %20 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen BR oranları Şekil 80'de sunulmuştur.

Konser salonunun simülasyonlarından elde edilen BR parametresine ait veriler değerlendirilirken, Inacio (2022) ve Arau (1999) tarafından önerilen optimum değer aralıkları kullanılmıştır. Bu değer aralıkları, reverberasyon süresi 1.8 sn'den fazla olduğu mekanlar için 1.1 ile 1.25; 1.8 sn'den az olduğu mekanlar için ise 1 ile 1.45 olarak belirlenmiştir (Inacio, 2022; Arau, 1999).



Şekil 80. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen BR oranları

Orta frekans bölgesinde, konser salonunun simülasyonlarından elde edilen BR değerlerine ilişkin analiz sonuçları, referans alınan değer aralıkları temel alınarak değerlendirilmiş ve Tablo 21'de sunulmuştur.

Tablo 21. Ortalama T30 ve BR değerlerinin değerlendirilmesi

Senaryolar	T30 (500 Hz-1000 Hz Ort.) sn	Değer Aralıkları	BR Değerleri
Mevcut	2.11	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.13
Ahşap+25% Açık	2.23	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.03
Ahşap+50% Açık	2.28	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.00
Ahşap+%75 Açık	2.27	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.00
Ahşap+%100 Açık	2.37	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.96
Alçıpan+25% Açık	2.66	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.90
Alçıpan+50% Açık	2.58	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.95
Alçıpan+%75 Açık	2.54	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.96
Alçıpan+%100 Açık	2.55	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.98
Beton+25% Açık	3.68	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.20
Beton+50% Açık	3.13	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.16
Beton+%75 Açık	2.90	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.15
Beton+%100 Açık	2.85	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.15

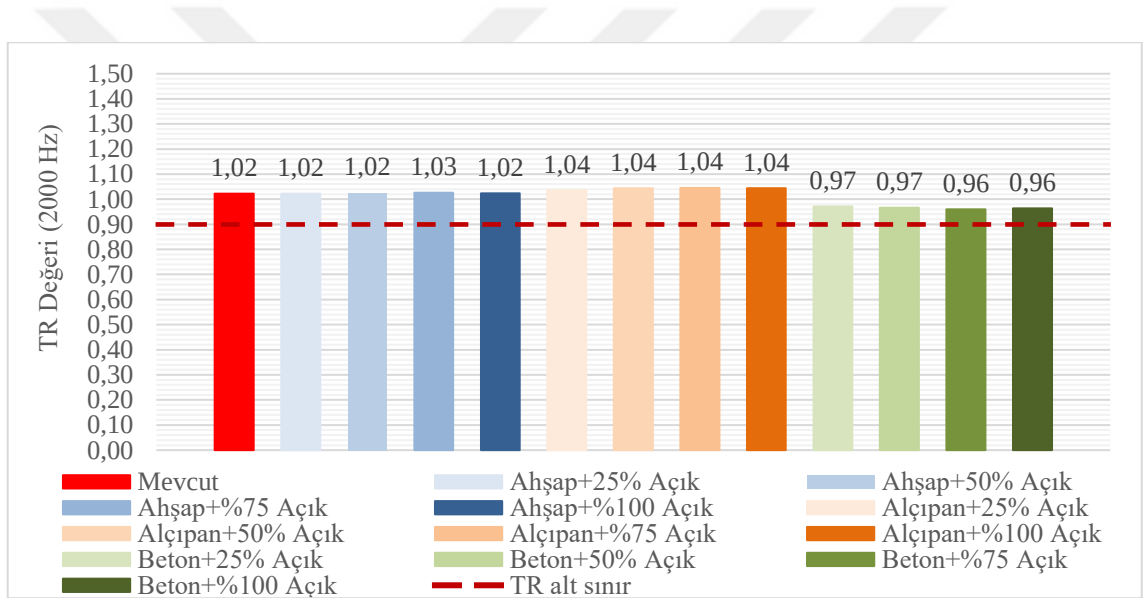
Mevcut duruma ilişkin reverberasyon süresine göre hesaplanan bas oranı 1.13 olup, bu değerin referans olarak kabul edilen optimum aralıkları karşıladığı belirlenmiştir.

Ahşap malzeme uygulanan senaryolarda açıklık oranı arttıkça elde edilen BR (Bas oranı) değerleri azalmıştır. Alçıpan malzeme uygulanan senaryolarda ise BR oranlarında artış gerçekleşmesine rağmen, hiçbir senaryoda belirlenen optimum değer aralıklarının karşılanamadığı tespit edilmiştir. Her ne kadar bazı senaryolarda T30 ve EDT değerleri önerilen aralıklarda olsa da, tüm senaryolardan elde edilen BR değerlerinin optimum aralığın altında kalması, salon içerisindeki bas frekans enerjisinin farklı müzik türleri için yeterli olmadığını göstermektedir.

Ahşap ve alçıpan malzeme uygulanan senaryolardan elde edilen verilerin aksine, beton malzeme kullanılan senaryoların simülasyonlarından elde edilen BR (Bas oranı) değerlerinin belirlenen optimum aralıkları karşıladığı belirlenmiştir. Her ne kadar T30 ve EDT değerleri önerilen aralıkların üzerinde olsa da, salondaki bas frekans enerjisinin farklı müzik türleri açısından ideal seviyeye ulaştığı sonucuna ulaşılmıştır.

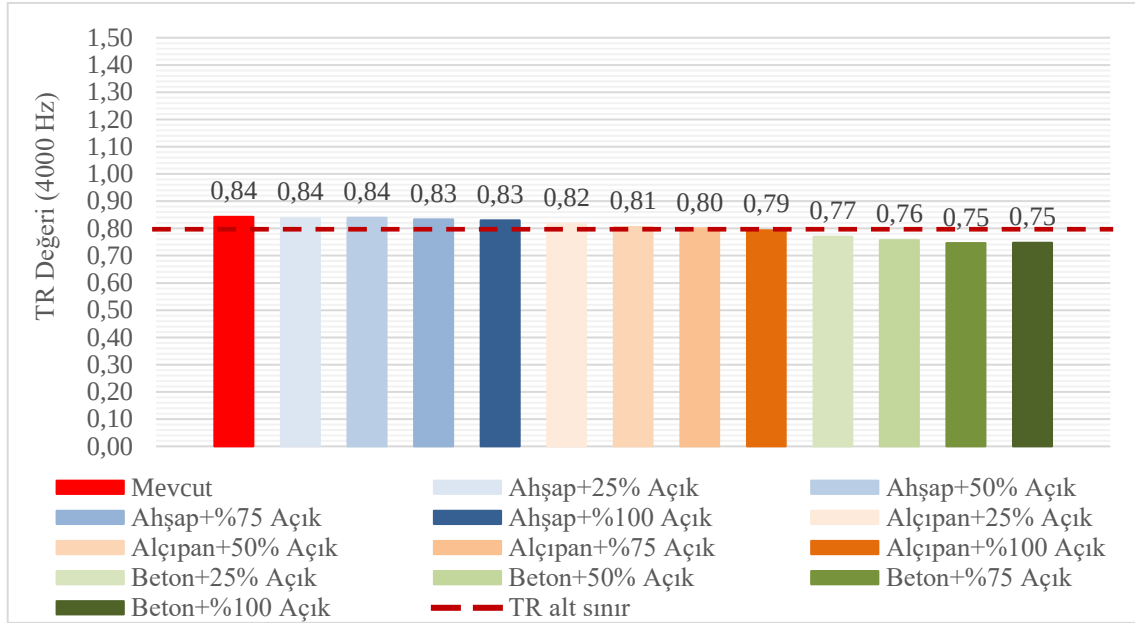
TR Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %20 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen TR değerleri Şekil 81 ve Şekil 82'de verilmiştir.

Konser salonuna ait simülasyonlardan elde edilen TR (Tiz Oranı) parametresine ilişkin veriler değerlendirilirken, Mehta ve arkadaşları (1999) tarafından önerilen optimum değer aralıkları temel alınmıştır. 2000 Hz için kullanılan $TR = EDT_{2000} / EDT_{mid}$ denklemine göre bu değer 0.9'un üzerinde olması gerektiği, 4000 Hz için kullanılan $TR = EDT_{4000} / EDT_{mid}$ denklemine göre ise 0.8'in üzerinde olması gerektiği belirtilmiştir.



Şekil 81. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen TR değerleri (2000 Hz)

Konser salonunun %20 birleştirilmiş hacimli senaryolarına ait simülasyon verileri doğrultusunda 2000 Hz'deki EDT değeri kullanılarak elde edilen TR değerinin, mevcut senaryoda grafik üzerinde yatay çizgiyle belirtilen minimum sınır değeri karşıladığı belirlenmiştir. Buna ek olarak, iç yüzeylerinde ahşap ve alçıpan malzeme kullanılan sekiz farklı senaryoda da bu sınırın aşıldığı ve mevcut senaryoya yakın düzeyde TR değerleri elde edildiği belirlenmiştir. Beton malzeme kullanılan senaryolarda ise TR değerlerinde diğer malzeme türlerine göre bir düşüş meydana gelmiş olsa da, söz konusu sınır değerinin üzerinde kaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 82. %20 Birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen TR değerleri (4000 Hz)

Konser salonunun %20 birleştirilmiş hacimli senaryolarına ait simülasyon verileri doğrultusunda, 4000 Hz'deki EDT değeri kullanılarak elde edilen TR değerinin, mevcut senaryoda grafik üzerinde yatay çizgiyle belirtilen minimum sınır değeri karşıladığı belirlenmiştir. Buna ek olarak, iç yüzeylerinde ahşap malzeme kullanılan dört senaryoda da bu sınırın aşıldığı belirlenmiştir. Alçıpan malzeme kullanılan senaryolarda ise açıklık oranı arttıkça TR değerlerinde düşüş meydana gelmiş, %100 açıklığa sahip senaryoda ilgili sınırın altında kaldığı tespit edilmiştir. Beton malzeme kullanılan senaryolarda ise EDT değerlerine bağlı olarak hesaplanan TR değerlerinin düşük kaldığı ve bu nedenle ilgili frekans aralığında yeterli EDT değerlerinin sağlanamadığı belirlenmiştir.

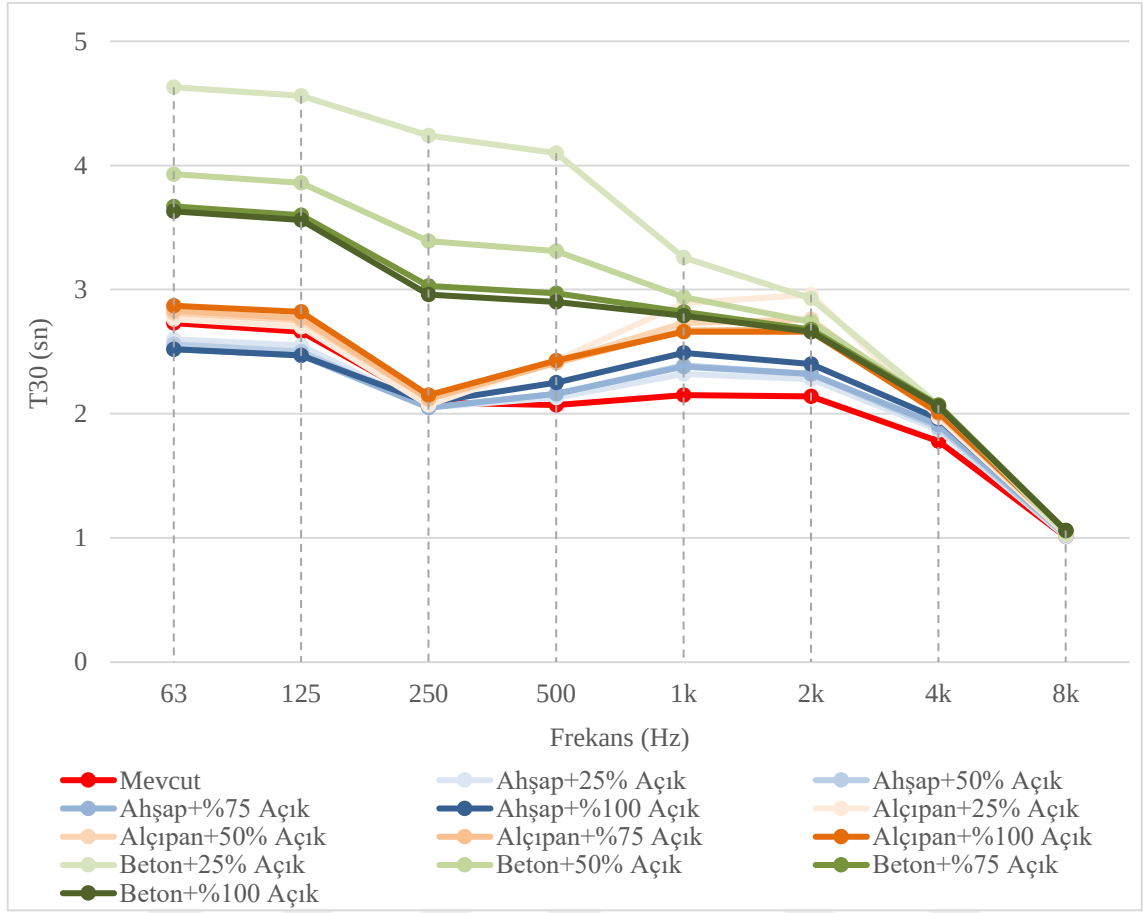
3.2.2. %35 Birleştirilmiş Hacimli Senaryoların Değerlendirilmesi

Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %35 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ile bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar sonucunda elde edilen T30, EDT, C80, D50, LF80, STI, BR ve TR parametrelerine ait veriler, “2.5. Sesin Nesnel Parametrelerine Yönelik Kabuller” başlığı altında belirtilen kriterlere göre değerlendirilmiştir.

T30 Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %35 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen T30 değerleri Şekil 83'te sunulmuştur.

Konser salonunun genel olarak değerlendirilmesinde T30 parametresine ait değer aralığı olarak, Knudsen ve Harris (1988) tarafından önerilen grafikten elde edilen $1.56 \leq T30 \leq 1.90$ değer aralığı referans olarak kabul edilmiştir (500 Hz). Referans olarak alınan değer aralığı, Şekil 83'te verilen grafik üzerinde taralı bir şekilde gösterilmiştir.

Farklı müzik türleri için orta frekans bölgesinde (500 Hz - 1000 Hz) önerilen optimum değer aralıklarına ait değerlendirmeler Tablo 23'e göre yapılmıştır.



Şekil 83. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen T30 değerleri

%35 birleştirilmiş hacimli tüm senaryoların simülasyonlarından elde edilen 500 Hz'deki T30 değerleri Tablo 22'de verilmiştir.

Tablo 22. %35 Birleştirilmiş hacimli tüm senaryolardan elde edilen T30 değerleri (500 Hz)

	Mevcut	%35 Birleştirilmiş Hacim											
		Ahşap Malzeme				Alçıpan Malzeme				Beton			
		%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık
T30 (sn) (500 Hz)	2.07 sn	2.29 sn	2.39 sn	2.44 sn	2.27 sn	3.18 sn	3.12 sn	3.02 sn	3.00 sn	7.00 sn	5.32 sn	4.42 sn	4.10 sn

Mevcut durumun simülasyonundan elde edilen T30 değerleri, alçak frekanslarda (250 Hz'e kadar) azalma eğilimi gösterirken, 250 Hz ile 2000 Hz arasındaki frekans aralığında

belirli bir artış göstermektedir. Buna ek olarak, 2000 Hz'den 8000 Hz'e doğru reverberasyon süresinde belirgin bir azalma görülmektedir. Bu grafiğe göre, mevcut durumun simülasyonu sonucunda 500 Hz'deki T30 değeri 2.07 sn olarak elde edilmiştir.

500 Hz'de elde edilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, mevcut durum için elde edilen T30 değerinin, belirlenen referans aralığın üzerinde kaldığı açıkça görülmektedir. Benzer şekilde, salonun %35 birleştirilmiş hacimli tüm senaryolara ait simülasyon sonuçlarında da T30 değerlerinin referans aralığını aştığı tespit edilmiştir.

%35 Birleştirilmiş hacme sahip tüm senaryolara ait veriler incelendiğinde, referans kabul edilen optimum değer aralığına en yakın sonuçların, iç yüzey kaplamasında ahşap malzeme kullanılan senaryolarda elde edildiği tespit edilmiştir. Bu senaryolarda, açıklık oranı arttıkça T30 değerlerinde yükselme eğilimi olduğu belirlenmiştir. Ancak, açıklık oranının %100 olduğu senaryoda T30 süresi aniden en düşük seviyeye gerilemiştir. Alçıpan malzeme kullanılan senaryolarda ise T30 değerlerinin, ahşap ve beton yüzeyler arasında bir seviyede kaldığı tespit edilmiştir. Açıklıkların tamamen açık olduğu durumlarda bu değerler referans aralığına yaklaşıp da, söz konusu optimum aralık tam olarak sağlanamamıştır.

Beton malzeme kullanılan senaryolarda özellikle alçak frekanslarda elde edilen T30 değerlerinin, diğer senaryolarda kaydedilen değerlere kıyasla oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu değerlerin bazı durumlarda 7.96 sn'ye kadar ulaştığı tespit edilmiştir. Açıklık oranlarına göre yapılan değerlendirmede, en uzun reverberasyon süresinin %25 açık durumda elde edildiği belirlenmiştir. %100 ve %75 açıklık oranlarına sahip senaryolarda elde edilen T30 sürelerinin birbirine oldukça yakın olduğu, ancak %50 ve %25 açıklık durumlarındaki reverberasyon süreleri ile aralarında belirgin farklılıklar ortaya çıktığı görülmüştür.

%35 Birleştirilmiş hacimli tüm senaryolardan elde edilen veriler incelendiğinde, 2000 Hz ve üzerindeki frekanslarda T30 değerlerinin belirgin biçimde azaldığı ve kullanılan tüm malzeme türlerinde benzer eğilimlerin olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, konser salonunda yüksek frekans aralığındaki seslerin etkili bir şekilde yutulduğunu göstermektedir.

Birleştirilmiş hacimli konser salonlarında ana hacim ve bu hacme eklenen hacimlerin içinde kullanılan malzemeler ile bu hacimler arasındaki bağlantıyı sağlayan açıklık oranlarının elde edilen T30 değerlerini oldukça etkilediği tespit edilmiştir.

Orta frekans bölgesinde (500-1000 Hz) farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıkları ile %35 birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen simülasyon sonuçları arasındaki karşılaştırmalı ilişki Tablo 23'te sunulmuştur. Tabloda yeşil renkle gösterilen

hücreler, elde edilen T30 değerlerinin önerilen optimum değer aralığında yer aldığını, mavi hücreler bu aralığın üzerinde kalan değerleri, kırmızı hücreler ise optimum aralığın altında kalan değerleri ifade etmektedir.

Tablo 23. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryolarda elde edilen ortalama T30 değerlerinin önerilen optimum aralıklarla karşılaştırılması

[illegible]

Tablo 23'ün devamı

Rock müzik	$0.6 \leq T_{30} \leq 1.2$	Adelman Larsen vd.,2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Klasik Türk Müziği	$1.1 \leq T_{30} \leq 1.3$	Torun, 2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$0.75 \leq T_{30} \leq 1.1$	Ozcevik, 2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$0.97 \leq T_{30} \leq 1.2$	Ozcevik, 2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Piyano Solosu	$1.2 \leq T_{30} \leq 2.0$	Hidak& Nishihara, 2022	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Keman Solosu	$1.8 \leq T_{30} \leq 2.4$	Hidak& Nishihara, 2022	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Senfoni	$2.0 \leq T_{30} \leq 2.4$	Gade, 2014	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$2.5 \leq T_{30} \leq 3.06$	Şekil 58*	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Ritmik Müzik	$0.8 \leq T_{30} \leq 1.5$	Gade, 2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hafif Müzik Konser Salonu	$1.4 \leq T_{30} \leq 1.8$	Mehta vd, 1999	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$2.2 \leq T_{30} \leq 2.68$	Şekil 58*	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Orkestra Konser Salonu	$1.8 \leq T_{30} \leq 2.2$	Mehta vd, 1999	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elde edilen reverberasyon süresi, önerilen optimum aralığın			Altındadır.					Arasındadır.				Üstündedir			
* : Şekil 58’de 27000 m ³ için verilen optimum T30 değerinin ±%10’u hesaplanarak belirlenmiştir.															

500 Hz ile 1000 Hz arasındaki orta frekans bölgesi için önerilen optimum reverberasyon süresi aralıkları incelendiğinde, salon akustiğinin her bir müzik türü için farklı düzeyde reverberasyon süresine gereksinim duyduğu tespit edilmiştir. %35 birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen verilere bakıldığında, bu değerlerin çoğu durumda akustik alandaki farklı otoriteler tarafından önerilen optimum değer aralıklarının üzerinde kaldığı belirlenmiştir.

Tablo 23'te sunulan veriler ve karşılaştırmalar incelendiğinde, özellikle ahşap malzeme kullanılan birleştirilmiş hacim senaryolarından elde edilen verilerin, önerilen optimum değer aralığını sağlama konusunda diğer senaryolara kıyasla daha başarılı olduğu tespit edilmiştir.

Ahşap malzeme kullanılan senaryolara ait veriler incelendiğinde, bu senaryolarda elde edilen sonuçların, önerilen optimum değer aralıklarına diğer senaryolara kıyasla daha fazla yaklaştığı saptanmıştır. Bununla birlikte, birçok müzik türü açısından bu değerlerin belirtilen

aralıkların üzerinde kaldığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan, Şekil 58’de sunulan verilere göre, hafif müzik ve senfoni türleri için önerilen optimum aralıkların sağlandığı belirlenmiştir.

Alçıpan ve beton malzemelerin kullanıldığı senaryolardan elde edilen değerler genel olarak incelendiğinde, bu değerlerin organ müziği dışındaki tüm müzik türleri için önerilen optimum değer aralıklarının üzerinde kaldığı tespit edilmiştir.

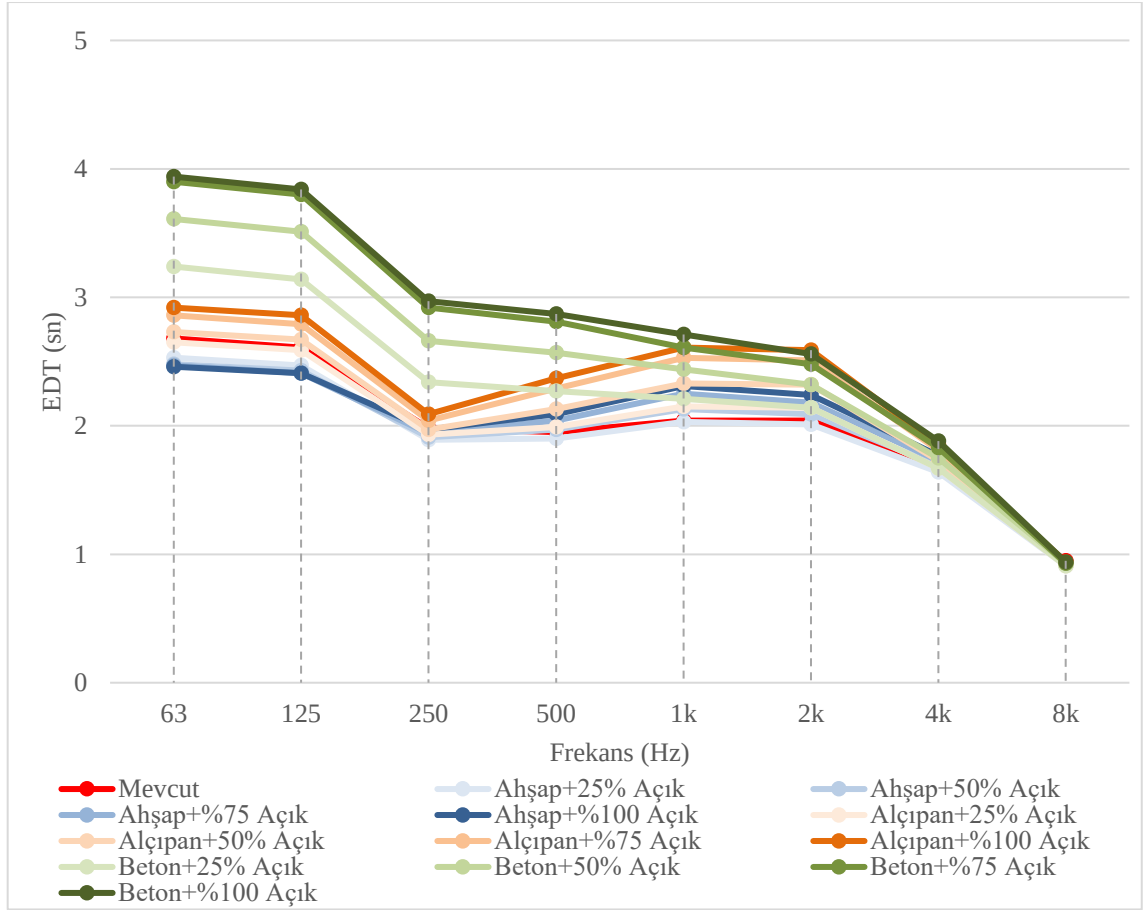
Beton malzeme kullanılan senaryolar değerlendirildiğinde ise, elde edilen reverberasyon süresi değerlerinin genel olarak önerilen optimum aralıkların oldukça üzerinde olduğu belirlenmiştir. Bu durum, birçok müzik türü için salonda aşırı yankılı bir akustik ortam oluşmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, organ müziği için önerilen bazı optimum değer aralıklarının beton malzeme kullanılan senaryolarla uyum gösterdiği de tespit edilmiştir.

Uzun reverberasyon sürelerine ihtiyaç duyan organ müziği özelinde yapılan değerlendirmelerde, mevcut senaryolardan elde edilen T30 değerlerinin, yalnızca Mehta ve diğ. (1999) sunduğu değerler dışında önerilen optimum aralıkların altında kaldığı belirlenmiştir. Diğer taraftan, ahşap malzeme kullanılan senaryolarda elde edilen değerlerin, Long (2006) ve Barron (1993) tarafından önerilen değer aralıklarını her senaryoda karşıladığı, buna karşılık Mehta diğ. (1999) tarafından önerilen değer aralığı ile Şekil 58’den elde edilen aralıkların ise üzerinde kaldığı tespit edilmiştir. Alçıpan kullanılan senaryolar değerlendirildiğinde, %25 açıklığa sahip durumda yalnızca Barron’un (1993) önerdiği optimum değer aralığının sağlandığı, diğer araştırmacılar tarafından önerilen aralıkların ise belirgin şekilde aşıldığı ortaya konulmuştur. Diğer taraftan, %50, %75 ve %100 açıklığa sahip senaryolarda, Mehta ve diğ. (1996) önerdiği aralık dışında; Long (2006), Barron (1996) tarafından sunulan ve Şekil 58’den elde edilen değer aralıklarının karşılandığı tespit edilmiştir. Beton malzemenin kullanıldığı senaryolarda yüksek reverberasyon süreleri elde edilmiş olmakla birlikte, bu değerlerin tüm kaynaklarda önerilen optimum aralıkları karşılamadığı belirlenmiştir. Yalnızca dört kaynaktan birinde belirtilen aralıklara ulaşıldığı tespit edilmiştir.

EDT Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu’na ait %35 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen EDT değerleri, Şekil 84’te sunulmuştur.

Konser salonunun genel değerlendirilmesinde EDT parametresine ait optimum değer aralığı belirlenirken, öncelikle Şekil 56'dan elde edilen T30 değeri ile Gade'nin (1989) önerdiği T30-EDT ilişkisi kullanılmıştır. Daha sonra Abdülrahimov (2005) ve Long (2006)'un önerdiği $\pm\%10$ tolerans dikkate alınarak optimum değer aralığı belirlenmiştir. Bu kapsamda, 500 Hz'de EDT parametresi için önerilen optimum değer aralığı $1.53 \leq \text{EDT} \leq 1.87$ sn olarak hesaplanmıştır. Referans olarak alınan optimum değer aralığı, Şekil 84'te verilen grafik üzerinde taralı bir şekilde gösterilmiştir.

Farklı müzik türleri için orta frekans bölgesinde (500 Hz - 1000 Hz) önerilen optimum değer aralıklarına ait değerlendirmeler Tablo 25'te verilmiştir.



Şekil 84. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen EDT değerleri

%35 Birleştirilmiş hacimli tüm senaryoların simülasyonlarından elde edilen 500 Hz'deki EDT değerleri Tablo 24'te verilmiştir.

Tablo 24. %35 Birleştirilmiş hacimli tüm senaryolardan elde edilen EDT değerleri (500 Hz)

	Mevcut	%35 Birleştirilmiş Hacim											
		Ahşap Malzeme				Alçıpan Malzeme				Beton			
		%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık
EDT (sn) (500 Hz)	1.95 sn	1.90 sn	1.97 sn	2.04 sn	2.09 sn	1.99 sn	2.13 sn	2.29 sn	2.37 sn	2.27 sn	2.57 sn	2.81 sn	2.87 sn

500 Hz’de elde edilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, mevcut durum için hesaplanan EDT değerinin, belirlenen referans aralığın üzerinde kaldığı açıkça görülmektedir.

500 Hz ile 1000 Hz frekans aralığında elde edilen EDT değerlerinin genel olarak belirlenen optimum aralığa yaklaştığı, ancak bu aralığı tam olarak sağlayamadığı belirlenmiştir.

2000 Hz’den yukarı frekanslara doğru, tüm senaryolarda EDT değerlerinde belirgin bir azalma belirlenmiştir. Özellikle 8000 Hz’e yaklaşıldıkça bu azalmanın daha da keskinleştiği tespit edilmiştir.

Birleştirilmiş hacimli senaryolarda kullanılan farklı malzeme türleri ve açıklık oranlarına bağlı olarak, 500 Hz’de elde edilen EDT değerleri arasında 0.97 sn’ye varan farklar oluştuğu belirlenmiştir.

Alçak frekanslarda en yüksek EDT değerlerinin sırasıyla, beton malzeme kullanılan %100, %75, %50 ve %25 açıklık oranlarına sahip senaryolarda elde edildiği tespit edilmiştir.

Her müzik türünün ihtiyaç duyduğu optimum EDT değerleri birbirinden farklılık göstermektedir. Orta frekans bölgesinde (500-1000 Hz) farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıkları ile %35 birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen simülasyon sonuçları arasındaki karşılaştırmalı ilişki Tablo 25’te sunulmuştur. Tabloda yeşil renkle gösterilen hücreler elde edilen EDT değerlerinin önerilen optimum değer aralığında yer aldığını, mavi hücreler bu aralığın üzerinde kalan değerleri, kırmızı hücreler ise optimum aralığın altında kalan değerleri ifade etmektedir.

Tablo 25. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryolarda elde edilen ortalama EDT değerlerinin önerilen optimum aralıklarla karşılaştırılması

			%35 Birleştirilmiş Hacim												
			Mevcut	Ahşap Malzeme				Alçıpan Malzeme				Beton			
				%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık
Müzik Türü	Optimum Değer Aralıkları	EDT (sn) Kaynak	2.00 sn	1.97 sn	2.05 sn	2.15 sn	2.20 sn	2.07 sn	2.23 sn	2.15 sn	2.49 sn	2.24 sn	2.51 sn	2.71 sn	2.79 sn
Romantik Müzik	1.5≤EDT≤2.2 (Bruckner)	Hidaka vd., 2024	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-
Klasik Müzik	1.4≤EDT≤2.0 (Mozart)	Hidaka vd., 2024	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.5≤EDT≤2.0 (Rossini)	Hidaka vd., 2024	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Klasik Türk Müziği	1.20≤EDT≤1.4	Torun, 2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Senfoni	2.57≤EDT≤3.14	Şekil 58*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+
Modern Müzik	1.5≤EDT≤2.0 (Stravinsky)	Hidaka vd., 2024	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hafif Müzik (Konser Salonları)	2.24≤EDT≤2.73	Şekil 58*	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-
Organ	3.03≤EDT≤3.70	Şekil 58*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elde edilen reverberasyon süresi, önerilen optimum aralığın				Altındadır.				Arasındadır.				Üstündedir			
* : Şekil 54’te 27000 m ³ için verilen optimum EDT değerinin ±%10’u hesaplanarak belirlenmiştir.															

500 Hz ile 1000 Hz arasındaki orta frekans bölgesi için önerilen optimum EDT değer aralıkları incelendiğinde, salon akustiğinin her bir müzik türü için farklı EDT düzeylerine ihtiyaç duyduğu tespit edilmiştir. Mevcut durumda elde edilen EDT değerlerinin, klasik müzik ve modern müzik için önerilen tüm optimum değer aralıklarını karşıladığı belirlenmiştir. Elde edilen değer, Klasik Türk müziği için verilen optimum değer aralığının üzerinde; senfoni, hafif müzik ve organ müziği için önerilen aralıkların altında kaldığı tespit edilmiştir.

Ahşap malzeme kullanılan senaryolardan elde edilen değerler genel olarak değerlendirildiğinde, %25 açıklığa sahip senaryonun simülasyon sonuçlarının; romantik, klasik ve modern müzik türleri için önerilen optimum EDT aralıklarını karşıladığı

belirlenirken, diğer müzik türleri açısından ise optimum aralıkların tam olarak karşılanmadığı belirlenmiştir. %50 açıklığa sahip senaryoda ise romantik ve modern müzik türleri için önerilen aralıkların karşılandığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan, %75 ve %100 açıklığa sahip senaryoların yalnızca romantik müzik için belirtilen optimum EDT aralığını sağladığı tespit edilmiştir.

Alçıpan malzeme kullanılan senaryolarda, birçok müzik türü için önerilen optimum EDT değer aralıklarının sağlanamadığı belirlenmiştir. Ancak, %25 ve %75 açıklık oranına sahip senaryolarda romantik müzik için önerilen optimum aralıkların karşılandığı tespit edilmiştir. Ayrıca, %100 açıklığa sahip senaryodan elde edilen verilerin, hafif müzik için Şekil 58’de belirtilen optimum EDT aralığını karşıladığı belirlenmiştir.

Beton malzeme kullanılan senaryolar değerlendirildiğinde, hafif müzik için Şekil 58’de önerilen EDT aralığının yalnızca %25, %50 ve %75 açıklık oranlarına sahip senaryolardan elde edilen verilerle sağlandığı belirlenmiştir. Ayrıca, senfoni müziği için önerilen optimum EDT aralığının %75 ve %100 açıklığa sahip senaryolarla karşılandığı tespit edilmiştir. Bunun dışında kalan tüm senaryolardan elde edilen EDT değerlerinin, ilgili müzik türleri için önerilen optimum aralıkları karşılamadığı belirlenmiştir.

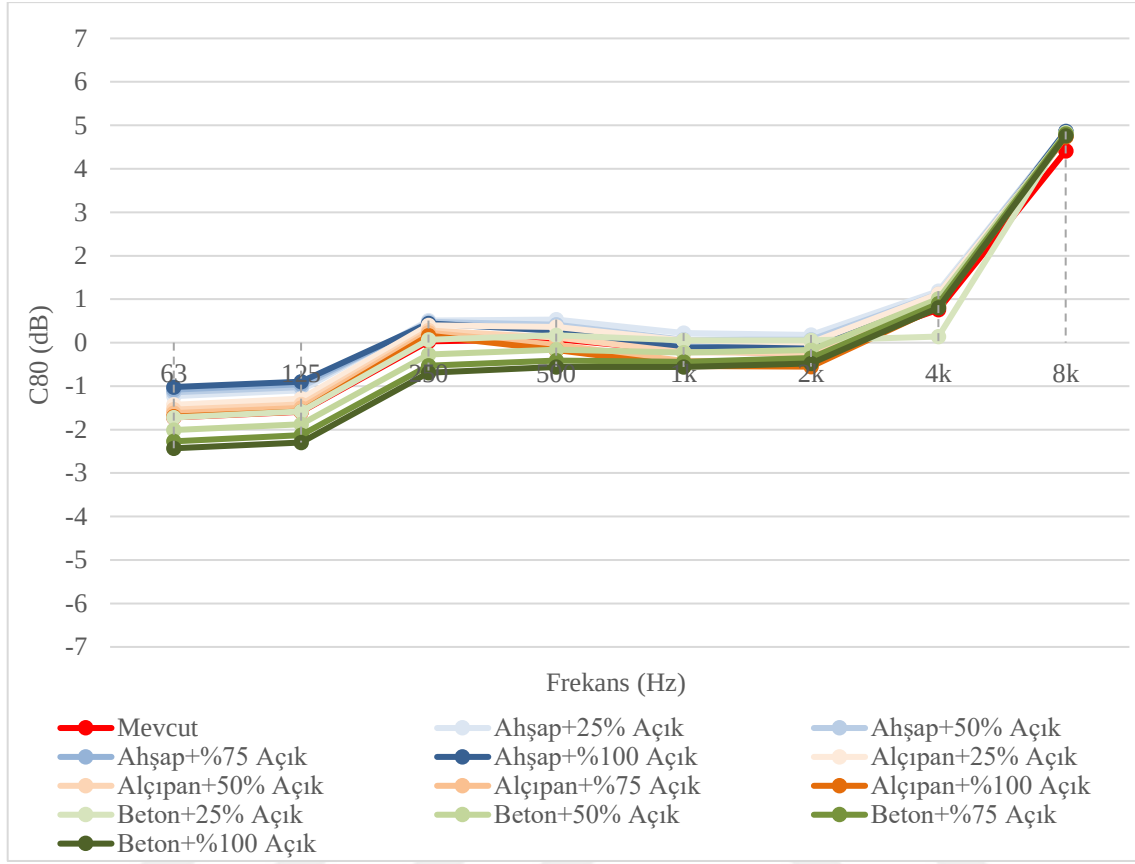
Şekil 58’den elde edilen organ müziğine yönelik optimum değer aralığının, incelenen hiçbir senaryo tarafından sağlanamadığı tespit edilmiştir.

C80 Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu’na ait %35 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen C80 değerleri Şekil 85’te sunulmuştur.

Konser salonunun genel değerlendirilmesinde, C80 parametresi için ISO 3382-1:2009 standardında önerilen $-5 \text{ dB} \leq C80 \leq +5 \text{ dB}$ ve Barron (1993) tarafından önerilen $-2 \text{ dB} \leq C80 \leq +2 \text{ dB}$ aralıkları esas alınmıştır. Bu referans değer aralıkları, Şekil 85’teki grafikte taralı alanlarla gösterilmiştir.

Farklı müzik türlerine yönelik olarak, orta frekanslardaki önerilen C80 değer aralıklarına ilişkin değerlendirmeler Tablo 26’ya göre yapılmıştır.

Mevcut durumun simülasyonundan elde edilen C80 değerlerinin, 63 Hz, 125 Hz, 1000 Hz ve 2000 Hz frekanslarda negatif değerlerdeyken; 250 Hz, 500 Hz, 4000 Hz ve 8000 Hz frekanslarda pozitif değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Mevcut durumda C80 parametresinin orta frekans bölgesindeki ortalama değeri -0.06 dB olarak hesaplanmıştır.



Şekil 85. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen C80 değerleri

Konser salonunun %35 oranında birleştirilmiş hacimli senaryolarına ait simülasyonlarından elde edilen grafikler incelendiğinde, C80 parametresine yönelik genel değerlendirmede, orta frekans bölgesinde elde edilen tüm değerlerin referans olarak kabul edilen her iki optimum aralık içerisinde yer aldığı belirlenmiştir.

Özellikle beton malzemenin kullanıldığı %75 ve %100 açıklığa sahip senaryolarda, 63 Hz ve 125 Hz frekanslarında elde edilen C80 verilerinin, alçak frekans bantlarında geç yansımaların daha baskın olduğunu ortaya koyduğu ve bu nedenle söz konusu frekans aralıklarında ses netliğinin azaldığı belirlenmiştir.

Birleştirilmiş hacimde uygulanan malzeme türü ve açıklık oranındaki değişimin, C80 değerleri üzerinde belirgin bir etki oluşturmadığı açıkça gözlemlenmiştir.

Her müzik türünün ihtiyaç duyduğu optimum C80 değerleri birbirinden farklılık göstermektedir. Orta frekans bölgesinde (500-1000 Hz) farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıkları ile %35 birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen simülasyon

sonuçları arasındaki karşılaştırmalı ilişki Tablo 26’da sunulmuştur. Tabloda yeşil renkle gösterilen hücreler elde edilen C80 değerlerinin önerilen optimum değer aralığında yer aldığını, mavi hücreler bu aralığın üzerinde kalan değerleri, kırmızı hücreler ise optimum aralığın altında kalan değerleri ifade etmektedir.

Tablo 26. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryolarda elde edilen ortalama C80 değerlerinin önerilen optimum aralıklarla karşılaştırılması

			Mevcut	%35 Birleştirilmiş Hacim											
				Ahşap Malzeme				Alçıpan Malzeme				Beton			
				%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık
Müzik Türü	Optimum Değer Aralıkları	C80 (dB) Kaynak	-0.06	0.38	0.24	0.13	0.08	0.21	-0.05	-0.24	-0.36	0.11	-0.20	-0.43	-0.56
Romantik Müzik	$-3 \leq C80 \leq +4$	Ahnert & Tennhardt, 2008	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Klasik ve Modern Müzik	$C80 \geq -3$	Easera, n.d.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	$-2 \leq C80 \leq 0$	Holden, 2016	+	-	-	-	-	-	+	+	+	-	+	+	+
Klasik Türk Müziği	$-4 \leq C80 \leq +4$	Torun, 2019	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Piyano Solosu	$0 \leq C80 \leq 2.4$	Hidaka & Nishihara, 2022	-	+	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-
Keman Solosu	$-1.6 \leq C80 \leq 0.7$	Hidaka & Nishihara, 2022	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Senfoni	$-1 \leq C80 \leq +3$	Gade, 2014	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Elde edilen reverberasyon süresi, önerilen optimum aralığın			Altındadır.				Arasındadır.				Üstündedir				

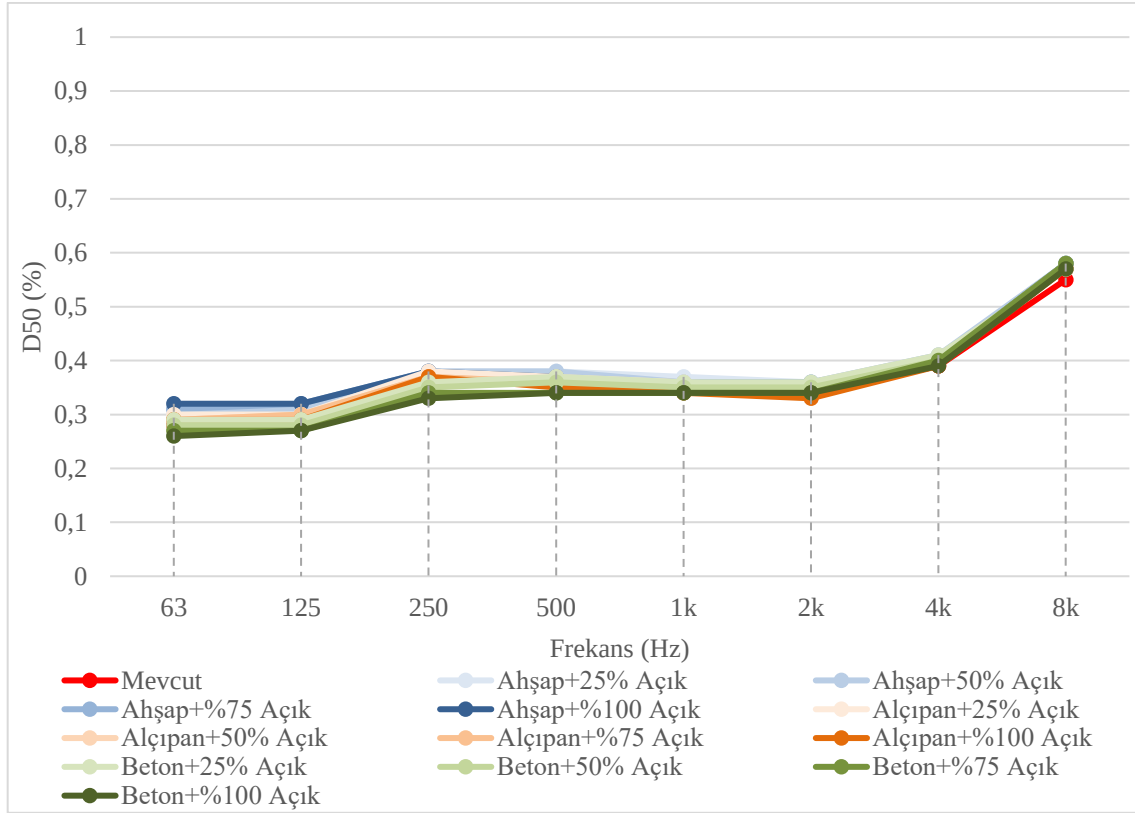
500 Hz ile 1000 Hz arasındaki orta frekans bölgesine ilişkin önerilen optimum C80 değer aralıkları incelendiğinde, salon akustiğinin her bir müzik türü için farklı C80 düzeylerine ihtiyaç duyduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, %35 birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen C80 değerlerinin; romantik müzik, modern müzik, klasik Türk müziği, keman solosu ve senfoni türleri için önerilen optimum değer aralıklarını karşıladığı belirlenmiştir.

Piyano solosu için önerilen optimum C80 değeri aralığı $0 \leq C80 \leq 2.4$ dB olarak belirtilmiştir. Bu doğrultuda, senaryolarda elde edilen negatif C80 değerlerinin, söz konusu aralığı karşılamadığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan, klasik müzik için Holden (2016) tarafından önerilen aralık $-2 \leq C80 \leq 0$ dB olarak verildiği için pozitif C80 değerlerinin bu aralığın üzerinde kaldığı belirlenmiştir.

D50 Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %35 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen D50 değerleri Şekil 86'da sunulmuştur.

Konser salonundan elde edilen D50 parametresine ait veriler değerlendirilirken, orta frekans bölgesinde ISO 3382-1:2009 tarafından önerilen $0.3 \leq D50 \leq 0.7$ değeri aralığı referans alınmıştır. Referans olarak alınan optimum değeri aralığı, Şekil 86'da verilen grafik üzerinde taralı bir şekilde gösterilmiştir.

Mevcut durumun simülasyonundan elde edilen D50 değerleri, alçak frekanslarda (250 Hz'e kadar) artış eğilimi gösterirken; 250 Hz ile 2000 Hz frekans aralığında düşük miktarda azalma eğilimi göstermiştir. Buna ek olarak, 2000 Hz'den 8000 Hz'e doğru gidildikçe D50 değerlerinde belirgin bir artış gerçekleşmiştir. Mevcut durumda D50 parametresinin orta frekans bölgesindeki ortalama değeri 0.36 olarak elde edilmiştir. Hesaplanan bu değere göre mekandaki yansıyan ses enerjilerinin dengeli ve mekan içinde gerçekleştirilen konuşma faaliyetinin anlaşılabilirliğinin yeterli düzeyde olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 86. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen D50 değerleri

Konser salonuna ait simülasyonlardan elde edilen D50 değerlerine yönelik yapılan genel değerlendirme sonucunda, orta frekans bölgesinde farklı senaryolardan elde edilen tüm D50 değerlerinin referans olarak kabul edilen optimum değer aralığını karşıladığı belirlenmiştir.

Senaryoların simülasyonları sonucunda elde edilen tüm D50 grafiklerinde, 125 Hz'den itibaren belirgin bir artış eğilimi tespit edilmiştir. 250 Hz ile 1000 Hz frekans aralığında, değerlerin optimum aralığın alt sınırına yaklaşmasına rağmen, önerilen düzeyin sağlandığı tespit edilmiştir.

63 Hz için yapılan değerlendirmede, ahşap malzeme kullanılarak oluşturulan tüm senaryolardan ve alçıpan malzeme kullanılarak oluşturulan %25 açıklığa sahip senaryodan elde edilen veriler dışındaki tüm senaryolarda, D50 değerlerinin önerilen optimum aralığın altında kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, alçak frekanslarda geç yansıyan enerjinin baskın olduğunu ve 63 Hz'de ana salon hacminde ses netliğinin zayıfladığını göstermiştir.

125 Hz için yapılan değerlendirmede, beton malzeme kullanılan tüm senaryolar ile alçıpan malzeme kullanılarak oluşturulan %100 açıklığa sahip senaryodan elde edilen D50

değerlerinin, önerilen optimum aralığın altında kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, alçak frekanslarda geç yansımaların etkisinin arttığını ve 125 Hz’de ses netliğinin salon hacmi içinde zayıfladığını ortaya koymaktadır.

STI Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu’na ait %35 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen STI değerleri Şekil 87’de verilmiştir.

Konser salonundan elde edilen STI parametresine ait ortalama veriler değerlendirilirken, Houtgast vd. (1980) tarafından önerilen optimum değer aralıkları referans alınmıştır. Referans olarak alınan optimum değer aralıkları:

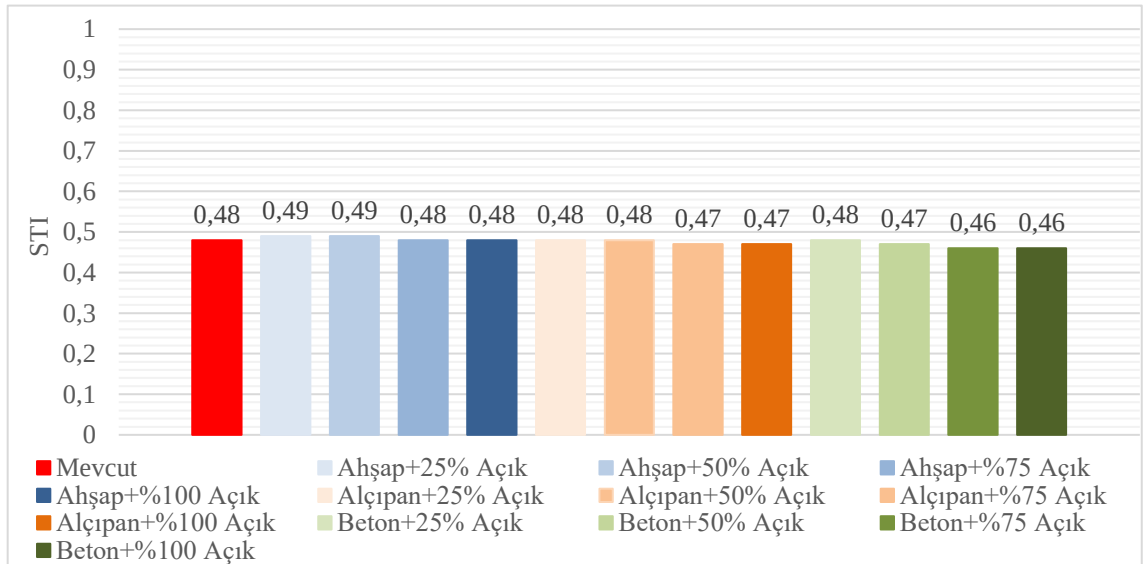
0.00 - 0.30 arasında ise “Kötü”

0.30 - 0.45 arasında ise “Zayıf”

0.45 - 0.60 arasında ise “Orta”

0.60 - 0.75 arasında ise “İyi”

0.75 - 1.00 arasında ise “Çok iyi”, olarak tanımlanmıştır.



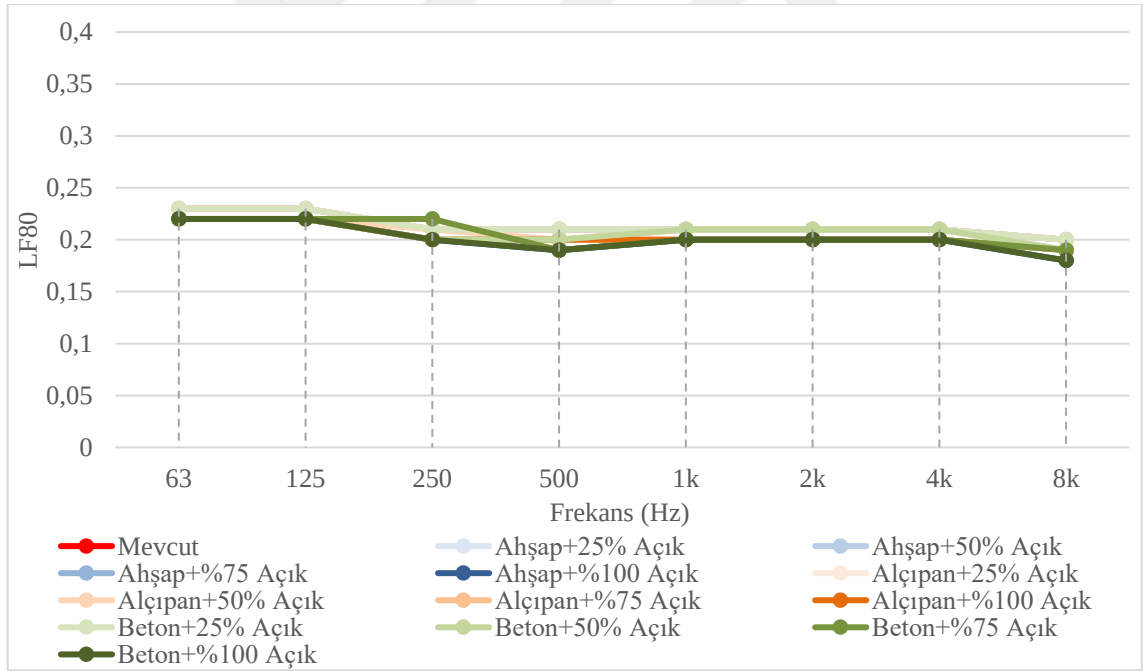
Şekil 87. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen STI değerleri

Mevcut durumun simülasyonu sonucu elde edilen ortalama STI değeri 0,48 olup, bu değer “orta” düzeyde bir konuşma anlaşılabilirliğine karşılık gelmektedir.

Tüm senaryolardan elde edilen Konuşma Anlaşılabilirlik İndeksi (STI) değerlerinin genellikle orta düzeye karşılık geldiği tespit edilmiştir. Özellikle beton malzeme kullanılan senaryolarda, yüksek T30 ve EDT değerlerine rağmen salon içindeki ortalama STI düzeyinin yine orta seviyede kaldığı tespit edilmiştir.

LF80 Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %35 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen LF80 değerleri Şekil 88'de sunulmuştur.

Konser salonunun simülasyonlarından elde edilen LF80 parametresine ait veriler değerlendirilirken, orta frekans bölgesinde ISO 3382-1:2009 tarafından önerilen $0.05 \leq LF80 \leq 0.35$ değer aralığı referans alınmıştır. Referans alınan değer aralığı, Şekil 88'de verilen grafik üzerinde taralı bir şekilde gösterilmiştir.



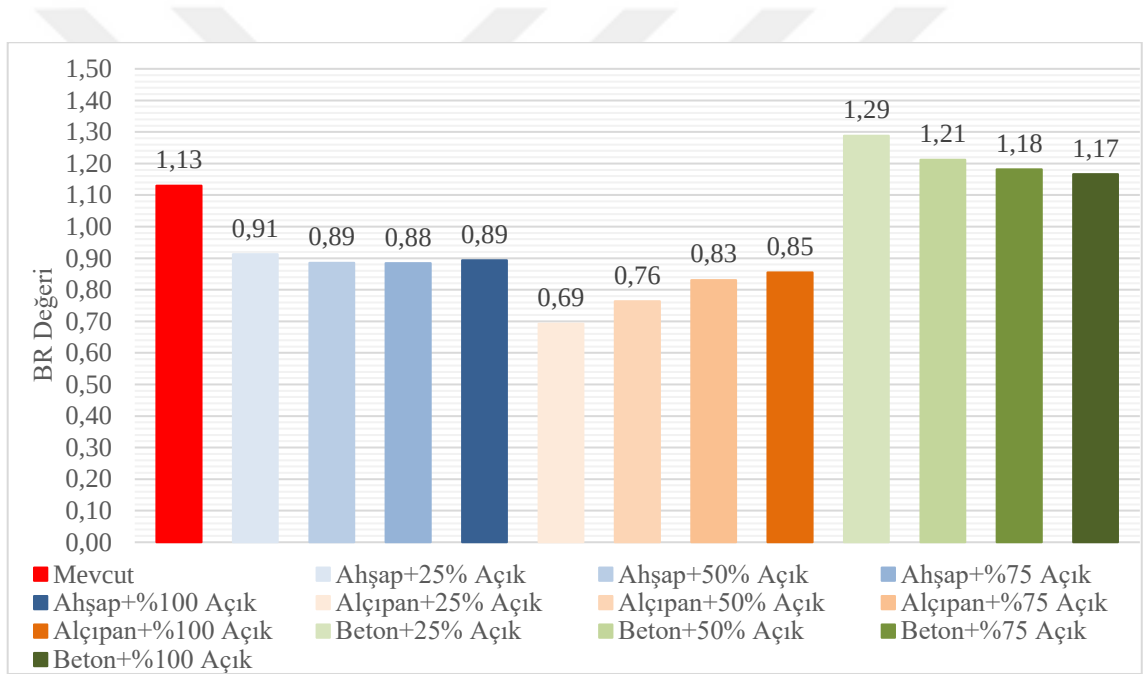
Şekil 88. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen LF80 değerleri

Mevcut durumun simülasyonu sonucunda elde edilen LF80 değerlerinin, ilgili frekans bantlarında referans aralık içinde kaldığı, ancak frekans arttıkça bu değerlerde azalma gözlemlendiği belirlenmiştir.

Ayrıca, simülasyonlardan elde edilen tüm verilerin belirlenen optimum değer aralıkları içerisinde yer aldığı tespit edilmiştir.

BR Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %35 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen BR oranları Şekil 89'da sunulmuştur.

Konser salonunun simülasyonlarından elde edilen BR parametresine ait veriler değerlendirilirken, Inacio (2022) ve Arau (1999) tarafından önerilen optimum değer aralıkları kullanılmıştır. Bu değer aralıkları, reverberasyon süresinin 1.8 sn'den fazla olduğu mekanlar için 1.1 ile 1.25 aralığı; 1.8 sn'den az olduğu mekanlar için ise 1 ile 1.45 aralığı olarak belirlenmiştir.



Şekil 89. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen BR oranları

Orta frekans bölgesinde, konser salonunun simülasyonlarından elde edilen BR değerlerine ilişkin analiz sonuçları, referans alınan değer aralıkları temel alınarak değerlendirilmiş ve Tablo 27'de verilmiştir.

Tablo 27. Ortalama T30 ve BR değerlerinin değerlendirilmesi

Senaryolar	T30 (500 Hz-1000 Hz Ort.) sn	Değer Aralıkları	BR Değerleri
Mevcut	2.11	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.13
Ahşap+25% Açık	2.53	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.91
Ahşap+50% Açık	2.61	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.89
Ahşap+%75 Açık	2.64	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.88
Ahşap+%100 Açık	2.64	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.89
Alçıpan+25% Açık	3.66	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.69
Alçıpan+50% Açık	3.45	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.76
Alçıpan+%75 Açık	3.26	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.83
Alçıpan+%100 Açık	3.21	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.85
Beton+25% Açık	6.01	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.29
Beton+50% Açık	4.81	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.21
Beton+%75 Açık	4.13	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.18
Beton+%100 Açık	3.88	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.17

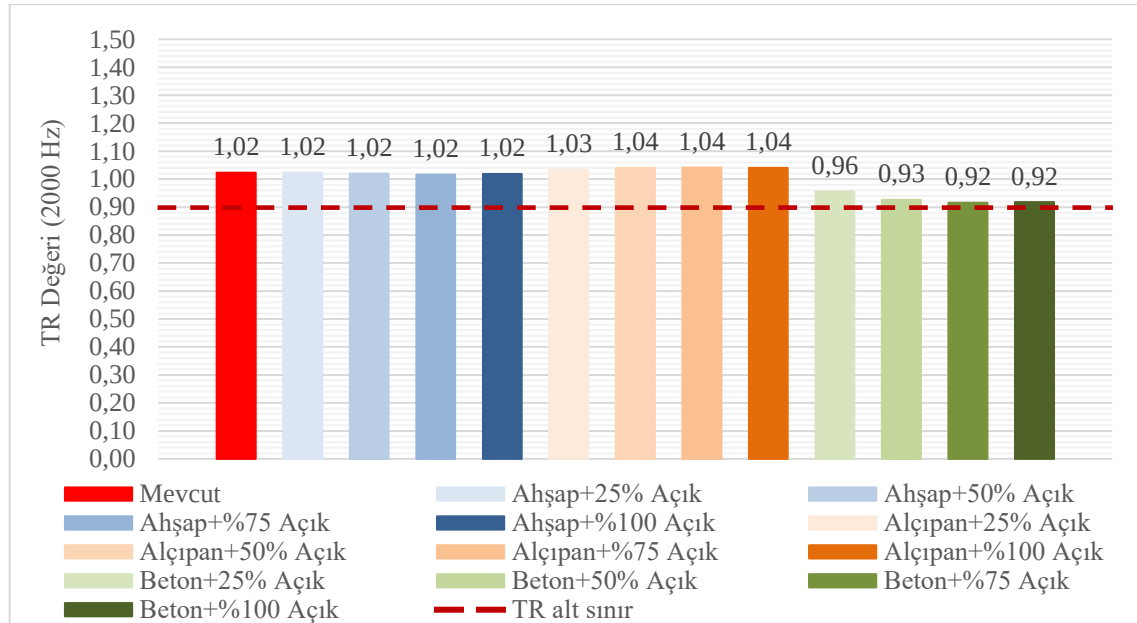
Mevcut duruma ilişkin reverberasyon süresine göre hesaplanan bas oranı 1.13 olup, bu değer referans olarak kabul edilen optimum aralığı karşıladığı belirlenmiştir.

Ahşap malzeme kullanılan senaryolarda, açıklık oranı arttıkça elde edilen BR (Bas Oranı) değerlerinde azalma belirlenmiştir. Alçıpan malzeme uygulanan senaryolarda ise BR değerlerinde artış eğilimi görülmesine rağmen, hiçbir senaryoda önerilen optimum değer aralıklarının karşılanamadığı tespit edilmiştir. En düşük BR değeri, alçıpan malzeme kullanılan ve %25 açıklığa sahip senaryodan elde edilmiş olup 0.69 olarak ölçülmüştür. Diğer taraftan, bazı senaryolarda T30 ve EDT değerleri optimum aralıkta yer alsa da, tüm senaryolarda BR değerlerinin bu aralığın altında kalması, salon içerisindeki alçak frekanslardaki enerjinin yeterli düzeyde sağlanamadığını ortaya koymaktadır.

Ahşap ve alçıpan malzeme kullanılan senaryolardan elde edilen verilerin aksine, beton malzeme kullanılan senaryoların simülasyonlarında, %25 açıklığa sahip senaryo dışında kalan tüm senaryolarda BR (Bas Oranı) değerlerinin önerilen optimum aralıkları karşıladığı belirlenmiştir. T30 ve EDT değerleri bazı durumlarda önerilen aralıkların üzerinde yer almasına rağmen, beton malzeme kullanılan senaryolarda alçak frekanslardaki enerjinin salon içinde kabul edilebilir düzeylerde olduğu tespit edilmiştir.

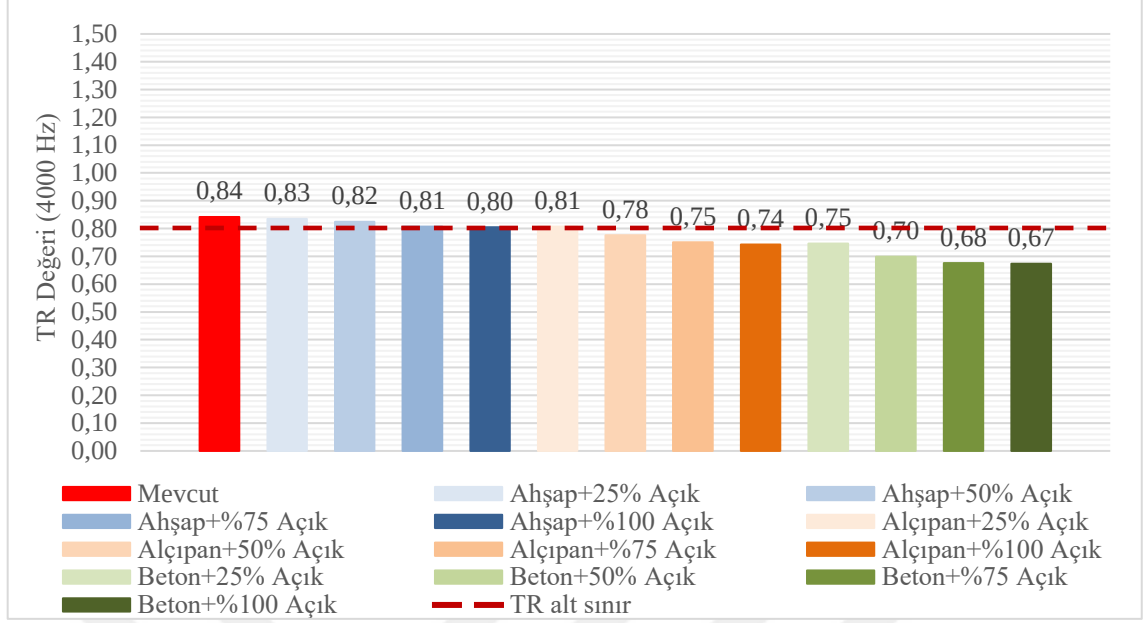
TR Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %35 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen TR oranları Şekil 90 ve Şekil 91'de verilmiştir.

Konser salonuna ait simülasyonlardan elde edilen TR (Tiz Oranı) parametresine ilişkin veriler değerlendirilirken, Mehta ve arkadaşları (1999) tarafından önerilen optimum değer aralıkları temel alınmıştır. 2000 Hz için kullanılan $TR = EDT_{2000} / EDT_{mid}$ denklemine göre bu değerin 0.9'un üzerinde olması gerektiği; 4000 Hz için kullanılan $TR = EDT_{4000} / EDT_{mid}$ denklemine göre ise 0.8'in üzerinde olması gerektiği belirtilmiştir.



Şekil 90. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen TR değerleri (2000 Hz)

Konser salonunun %35 birleştirilmiş hacimli senaryolarına ait simülasyon verileri doğrultusunda, 2000 Hz'deki EDT değeri kullanılarak elde edilen TR değerinin, mevcut senaryoda grafik üzerinde yatay çizgiyle belirtilen minimum sınır değeri karşıladığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak, iç yüzeylerinde ahşap ve alçıpan malzeme kullanılan sekiz farklı senaryoda da bu sınırın aşıldığı ve mevcut senaryoya yakın düzeyde TR değerleri elde edildiği belirlenmiştir. Beton malzeme kullanılan senaryolarda ise TR değerlerinde diğer malzeme türlerine göre düşüş meydana gelmiş olsa da, bu değerin söz konusu sınır değerinin üzerinde kaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 91. %35 Birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen TR değerleri (4000 Hz)

Konser salonunun %35 birleştirilmiş hacimli senaryolarına ait simülasyon verilerine göre, 4000 Hz'deki EDT değeriyle hesaplanan TR değerinin, mevcut senaryoda grafik üzerinde yatay çizgiyle gösterilen minimum sınır değeri karşıladığı tespit edilmiştir. İç yüzeylerinde ahşap malzeme kullanılan dört senaryoda da bu sınırın aşıldığı belirlenmiştir. Alçıpan malzeme kullanılan senaryolarda ise açıklık oranının artmasıyla birlikte TR değerlerinde azalma meydana gelmiş olduğu, yalnızca %25 açıklığa sahip senaryoda sınır değerin üzerinde kalmış olduğu, diğer senaryolarda ise bu sınırın altında kalmış olduğu tespit edilmiştir. Beton malzeme kullanılan senaryolarda ise EDT değerlerine bağlı olarak hesaplanan TR değerlerinin düşük düzeyde olduğu ve bu nedenle ilgili frekans aralığında yeterli erken yansıyan seslerin sağlanamadığı belirlenmiştir.

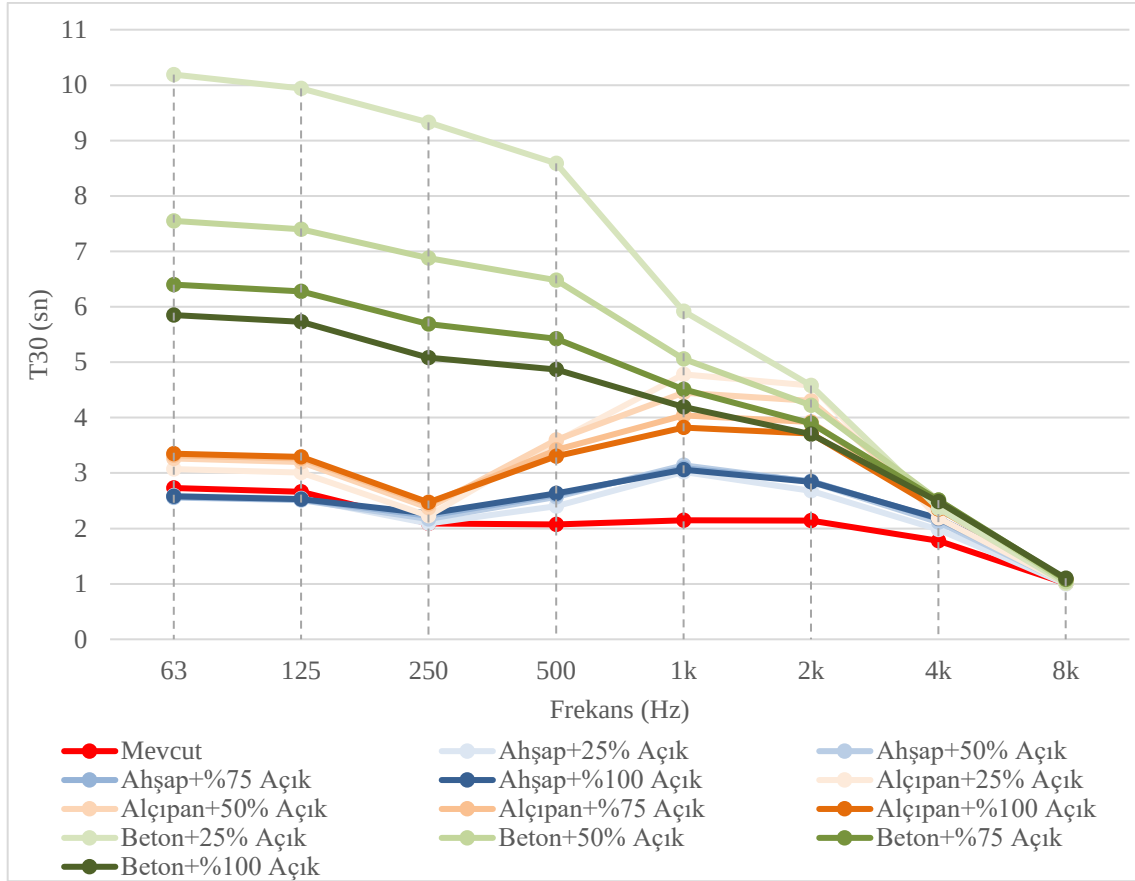
3.2.3. %50 Birleştirilmiş Hacimli Senaryoların Değerlendirilmesi

Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %50 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ile bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar sonucunda elde edilen T30, EDT, C80, D50, LF80, STI, TR ve BR parametrelerine ait veriler, “2.5. Sesin Nesnel Parametrelerine Yönelik Kabuller” başlığı altında belirtilen kriterlere göre değerlendirilmiştir.

T30 Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %50 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen T30 değerleri Şekil 92'de sunulmuştur.

Konser salonunun genel olarak değerlendirilmesinde T30 parametresine ait değer aralığı olarak, Knudsen ve Harris (1988) tarafından önerilen grafikten elde edilen $1.56 \leq T30 \leq 1.90$ değer aralığı referans olarak kabul edilmiştir (500 Hz). Referans olarak alınan değer aralığı, Şekil 92'de verilen grafik üzerinde taralı bir şekilde gösterilmiştir (Knudsen ve Harris, 1988).

Farklı müzik türleri için orta frekans bölgesinde (500 Hz - 1000 Hz) önerilen optimum değer aralıklarına ait değerlendirmeler Tablo 29'a göre yapılmıştır.



Şekil 92. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen T30 değerleri

%50 birleştirilmiş hacimli tüm senaryoların simülasyonlarından elde edilen 500 Hz'deki T30 değerleri Tablo 28'de verilmiştir.

Tablo 28. %50 Birleştirilmiş hacimli tüm senaryolardan elde edilen T30 değerleri (500 Hz)

	Mevcut	%50 Birleştirilmiş Hacim											
		Ahşap Malzeme				Alçıpan Malzeme				Beton			
		%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık
T30 (sn) (500 Hz)	2.07 sn	2.40 sn	2.57 sn	2.61 sn	2.63 sn	3.57 sn	3.60 sn	3.42 sn	3.30 sn	8.59 sn	6.48 sn	5.42 sn	4.87 sn

Mevcut durumun simülasyonundan elde edilen T30 değerleri, alçak frekanslarda (250 Hz'e kadar) azalma eğilimi gösterirken, 250 Hz ile 2000 Hz arasındaki frekans aralığında belirli bir artış göstermektedir. Buna ek olarak, 2000 Hz'den 8000 Hz'e doğru reverberasyon

süresinde belirgin bir azalma görülmektedir. Bu grafiğe göre, mevcut durumun simülasyonu sonucunda 500 Hz'deki T30 değeri 2.07 sn. olarak elde edilmiştir.

500 Hz'de elde edilen simülasyon değerleri incelendiğinde, mevcut durum için elde edilen T30 değerinin, belirlenen referans aralığın üzerinde kaldığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, salonun %50 birleştirilmiş hacimli tüm senaryolarına ait simülasyon sonuçlarında da T30 değerlerinin referans aralığını aştığı belirlenmiştir.

%50 birleştirilmiş hacimli tüm senaryolardan elde edilen veriler incelendiğinde, referans olarak kabul edilen optimum değer aralığına en fazla yaklaşan senaryoların, iç yüzeylerinde ahşap malzeme kullanılan durumlar olduğu belirlenmiştir. Ahşap yüzey kaplamalarının kullanıldığı ve açıklık oranlarının artırıldığı birleştirilmiş hacimli senaryolarda, T30 değerlerinin yükseldiği tespit edilmiştir. Alçıpan malzemenin kullanıldığı senaryolarda ise T30 değerlerinin, ahşap ve beton arasında bir aralıkta kaldığı belirlenmiştir. Açıklıkların tamamen açıldığı durumlarda bu değerler referans aralığına yaklaşmış olsa da, söz konusu optimum aralık tam olarak sağlanamamıştır.

Beton malzeme kullanılan senaryolarda özellikle alçak frekanslarda elde edilen T30 değerlerinin, diğer senaryolarda kaydedilen değerlere kıyasla oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlerin bazı durumlarda 10.19 sn'ye kadar ulaştığı belirlenmiştir. Açıklık oranlarına göre yapılan değerlendirmede, en uzun reverberasyon süresinin %25 açık durumda elde edildiği tespit edilmiştir. %100 ve %75 açıklık oranlarına sahip senaryolarda elde edilen T30 sürelerinin birbirine yakın olduğu, ancak %50 ve %25 açıklık durumlarındaki reverberasyon süreleri ile aralarında belirgin farklılıklar ortaya çıktığı görülmüştür.

%50 Birleştirilmiş hacimli tüm senaryolardan elde edilen veriler incelendiğinde, 2000 Hz ve üzerindeki frekanslarda T30 değerlerinin belirgin biçimde azaldığı ve kullanılan tüm malzeme türlerinde benzer eğilimlerin gözlemlendiği tespit edilmiştir. Bu durum, konser salonunda yüksek frekans aralığındaki seslerin yutulmasının daha etkili gerçekleştiğini göstermektedir.

Birleştirilmiş hacimli konser salonlarında ana hacim ve bu hacme eklenen hacimlerin içinde kullanılan malzemeler ile bu hacimler arasındaki bağlantıyı sağlayan açıklık oranlarının elde edilen T30 değerlerini oldukça etkilediği görülmüştür.

Orta frekans bölgesinde (500-1000 Hz) farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıkları ile %50 birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen simülasyon sonuçları arasındaki karşılaştırmalı ilişki Tablo 29'da sunulmuştur. Tabloda yeşil renkle gösterilen

hücreler elde edilen T30 değerlerinin önerilen optimum değer aralığında yer aldığını, mavi hücreler bu aralığın üzerinde kalan değerleri, kırmızı hücreler ise optimum aralığın altında kalan değerleri ifade etmektedir.

Tablo 29. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryolarda elde edilen ortalama T30 değerlerinin önerilen optimum aralıklarla karşılaştırılması

			Mevcut	%50 Birleştirilmiş Hacim											
				Ahşap Malzeme				Alçıpan Malzeme				Beton			
				%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık
Müzik Türü	Optimum Değer Aralıkları	T30 (sn) Kaynak	2.11 sn	2.71 sn	2.86 sn	2.85 sn	2.85 sn	4.18 sn	4.03 sn	3.73 sn	3.56 sn	7.26 sn	5.77 sn	4.97 sn	4.53 sn
Barok dönemi	1.6≤T30≤1.8	Barron, 1993	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Klasik Dönem	1.2≤T30≤1.5 (Mozart)	Long, 2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.5≤T30≤2.2 (Mozart)	Hidaka vd., 2024	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.6≤T30≤2.3 (Rossini)	Hidaka vd., 2024	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Romantik Dönem	1.5≤T30≤1.6 (Wagner)	Long, 2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.7≤T30≤2.5	Long, 2006	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.0≤T30≤1.2 (Sullivan ve Gilbert)	Long, 2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.8≤T30≤2.2	Barron, 1993	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.6≤T30≤2.5 (Bruckner)	Hidaka vd., 2024	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Oda Müziği	1.4≤T30≤1.7	Barron, 1993	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Modern Müzik	1.7≤T30≤2.2 (Stravinsky)	Hidaka vd., 2024	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Organ	2.5≤T30≤3.5	Long, 2006)	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
	T30 >2.5	Barron, 1993	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	2≤T30≤2.5	Mehta vd, 1999	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.96≤T30≤3.62*	Şekil 58	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-

Tablo 29'un devamı

Pop müzik	$0.6 \leq T30 \leq 1.2$	Adelma-Larsen vd.,2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rock müzik	$0.6 \leq T30 \leq 1.2$	Adelman-Larsen vd.,2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Klasik Türk Müziği	$1.1 \leq T30 \leq 1.30$	Torun, 2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$0.75 \leq T30 \leq 1.1$	Ozcevik, 2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$0.97 \leq T30 \leq 1.2$	Ozcevik, 2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Piyano Solosu	$1.2 \leq T30 \leq 2.0$	Hidaka& Nishihara, 2022	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Keman Solosu	$1.8 \leq T30 \leq 2.4$	Hidaka & Nishihara, 2022	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Senfoni	$2.0 \leq T30 \leq 2.4$	Gade, 2014	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$2.54 \leq T30 \leq 3.10^*$	Şekil 58	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Ritmik Müzik	$0.8 \leq T30 \leq 1.5$	Gade, 2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hafif Müzik Konser Salonu	$1.4 \leq T30 \leq 1.8$	Mehta vd, 1999	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$2.22 \leq T30 \leq 2.72^*$	Şekil 58	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Orkestra Konser Salonu	$1.8 \leq T30 \leq 2.2$	Mehta vd, 1999	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elde edilen reverberasyon süresi, önerilen optimum aralığın			Altındadır.						Arasındadır.			Üstündedir			
* : Şekil 58’de 30000 m ³ için verilen optimum T30 değerinin ±%10’u hesaplanarak belirlenmiştir.															

500 Hz ile 1000 Hz arasındaki orta frekans bölgesi için önerilen optimum reverberasyon süresi aralıkları incelendiğinde, salon akustiğinin her müzik türü için farklı düzeyde reverberasyon süresine gereksinim duyduğu tespit edilmiştir. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen değerlerin çoğu durumda akustik alandaki farklı otoriteler tarafından önerilen optimum aralıkların üzerinde kaldığı tespit edilmiştir.

Tablo 29'da sunulan veriler ve karşılaştırmalar incelendiğinde, özellikle ahşap malzeme kullanılan birleştirilmiş hacim senaryolarından elde edilen değerlerin, önerilen optimum değer aralığını sağlama konusunda diğer senaryolara kıyasla daha başarılı olduğu tespit edilmiştir.

Ahşap malzeme kullanılan senaryolarda elde edilen değerlerin optimum değer aralıklarına diğer senaryolara göre daha fazla yaklaştığı belirlenmiştir. Yalnızca, Şekil 58'de

senfoni müziği için belirtilen optimum aralığın tüm senaryolarda karşılandığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak, hafif müzik türü için yine Şekil 58’de verilen aralık yalnızca %25 açıklığa sahip senaryo tarafından sağlanabilmiştir.

Alçıpan malzeme kullanılan senaryolarda, T30 değerlerinin organ müziği hariç tüm müzik türleri için önerilen optimum aralıkların üzerinde kaldığı tespit edilmiştir.

Beton malzeme kullanılan senaryolar değerlendirildiğinde ise, elde edilen reverberasyon süresi değerlerinin genel olarak önerilen optimum aralıkların oldukça üzerinde olduğu belirlenmiştir. Bu durum, birçok müzik türü için salonda aşırı yankılı bir akustik ortam oluşmasına neden olmuştur.

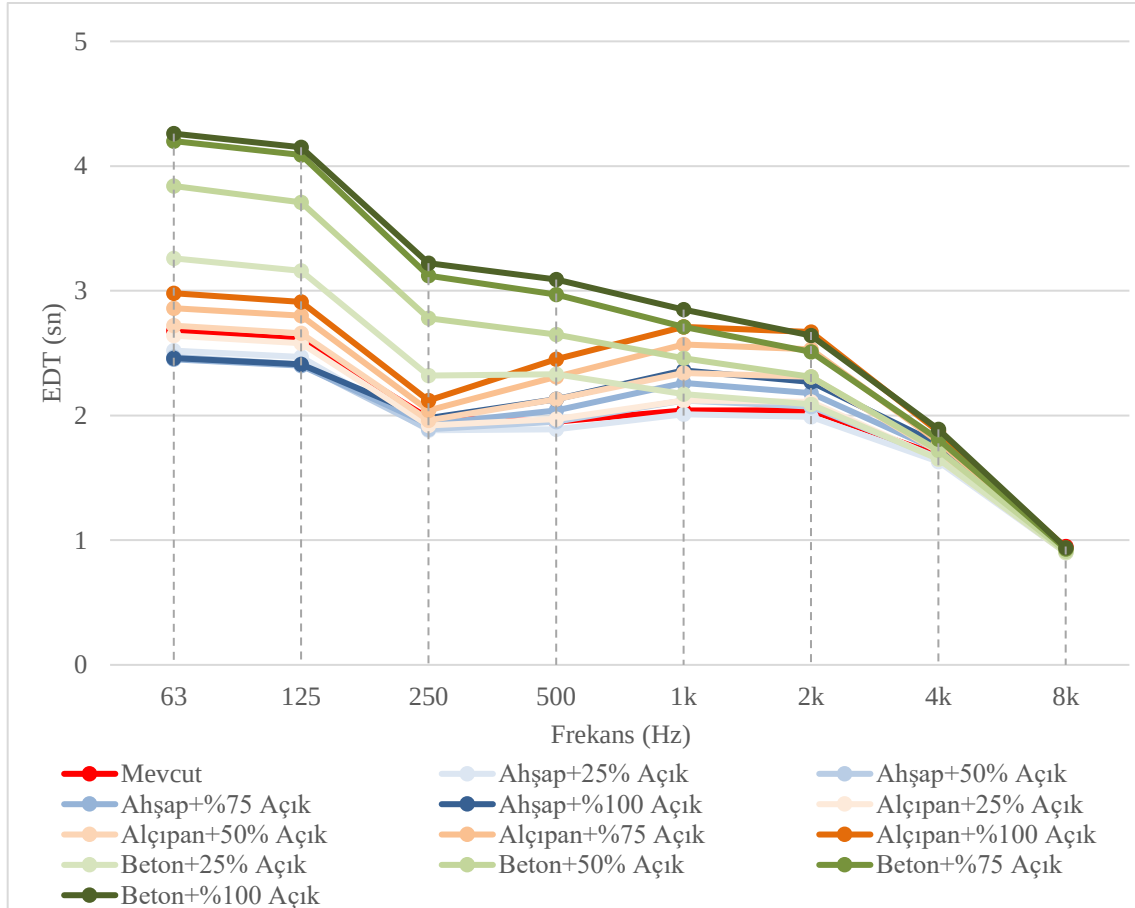
Uzun reverberasyon süresine ihtiyaç duyan organ müziği özelinde yapılan değerlendirmelerde, mevcut senaryodan elde edilen T30 değerinin, Mehta ve diğ. (1999)’nin sunduğu değerler dışında, önerilen optimum aralıkların altında kaldığı belirlenmiştir. Diğer taraftan, ahşap malzeme kullanılan dört farklı birleştirilmiş hacim senaryosunda, Barron (1993) ve Long (2006) tarafından önerilen optimum aralıklar sağlanmış olup, Mehta ve diğ. (1999)’nin belirttiği optimum değer aralığının üzerinde ve Şekil 58’den elde edilen optimum aralığın ise altında kalan sonuçlar elde edilmiştir. Buna karşın, alçıpan malzeme kullanılan senaryolarda Barron (1993) tarafından önerilen optimum aralıkların sağlandığı, Şekil 58’den elde edilen aralığın ise yalnızca %100 açıklığa sahip senaryoda karşılandığı belirlenmiştir. Diğer alçıpan senaryolarında elde edilen reverberasyon süresi değerlerinin ise önerilen aralıkların üzerinde kaldığı tespit edilmiştir. Beton malzemenin kullanıldığı senaryolarda yüksek reverberasyon süreleri elde edilmiş olup, tüm kaynaklardaki optimum değer aralıkları sağlanamamış, yalnızca dört kaynaktan üçünde belirtilen aralıkların karşılandığı tespit edilmiştir.

EDT Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu’na ait %50 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen EDT değerleri Şekil 94’te sunulmuştur.

Konser salonunun genel değerlendirilmesinde EDT parametresine ait optimum değer aralığı belirlenirken, öncelikle Şekil 56’dan elde edilen T30 değeri ile Gade’nin (1989) önerdiği T30-EDT ilişkisi kullanılmıştır. Daha sonra Abdülrahimov (2005) ve Long (2006)’un önerdiği $\pm\%10$ tolerans dikkate alınarak optimum değer aralığı belirlenmiştir. Bu kapsamda, 500 Hz’deki EDT parametresi için önerilen optimum değer aralığı $1.53 \leq EDT \leq$

1.87 sn olarak hesaplanmıştır. Referans olarak alınan optimum değer aralığı Şekil 94’te verilen grafik üzerinde taralı bir şekilde gösterilmiştir.

Farklı müzik türleri için orta frekans bölgesinde (500 Hz - 1000 Hz) önerilen optimum değer aralıklarına ait değerlendirmeler Tablo 31’de verilmiştir.



Şekil 93. %50 birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen EDT değerleri

%50 Birleştirilmiş hacimli tüm senaryoların simülasyonlarından elde edilen 500 Hz’deki EDT değerleri Tablo 30’da verilmiştir.

Tablo 30. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen EDT değerleri (500 Hz)

	Mevcut	%50 Birleştirilmiş Hacim											
		Ahşap Malzeme				Alçıpan Malzeme				Beton			
		%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık
EDT (sn) (500 Hz)	1.95 sn	1.89 sn	1.95 sn	2.04 sn	2.13 sn	1.97 sn	2.13 sn	2.31 sn	2.45 sn	2.33 sn	2.65 sn	2.97 sn	3.09 sn

500 Hz’de elde edilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, mevcut durum için hesaplanan EDT değerinin, belirlenen referans aralığın üzerinde kaldığı görülmektedir.

500 Hz’de elde edilen EDT değerlerinin genel olarak belirlenen optimum aralığa yaklaştığı, ancak bu aralığı tam olarak sağlayamadığı belirlenmiştir.

2000 Hz ve üzeri frekanslara çıkıldıkça tüm senaryolarda EDT değerlerinde belirgin bir düşüş yaşandığı tespit edilmiştir. 4000 Hz’de elde edilen tüm EDT değerlerinin optimum aralık içerisinde yer aldığı, ancak 8000 Hz’e doğru ilerledikçe değerlerde keskin bir düşüş olduğu ve bu değerlerin optimum aralığın oldukça altında kaldığı belirlenmiştir.

Birleştirilmiş hacimli senaryolarda kullanılan farklı malzeme türleri ve açıklık oranlarına bağlı olarak, 500 Hz oktav bant frekansta elde edilen T30 değerleri arasında 1.2 sn’ye varan farklar oluştuğu belirlenmiştir.

Alçak frekanslarda en yüksek EDT değerlerinin sırasıyla, beton malzeme kullanılan %100, %75, %50 ve %25 açıklık oranlarına sahip senaryolarda elde edilmiştir.

Orta frekans bölgesinde (500-1000 Hz) farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıkları ile %50 birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen simülasyon sonuçları arasındaki karşılaştırmalı ilişki Tablo 31’de sunulmuştur. Tabloda yeşil renkle gösterilen hücreler elde edilen EDT değerlerinin önerilen optimum değer aralığında yer aldığını, mavi hücreler bu aralığın üzerinde kalan değerleri, kırmızı hücreler ise optimum aralığın altında kalan değerleri ifade etmektedir.

Tablo 31. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryolarda elde edilen ortalama EDT değerlerinin önerilen optimum aralıklarla karşılaştırılması

			Mevcut	%50 Birleştirilmiş Hacim											
				Ahşap Malzeme				Alçıpan Malzeme				Beton			
				%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık
Müzik Türü	Optimum Değer Aralıkları	EDT (sn) Kaynak	2.00 sn	1.95 sn	2.04 sn	2.15 sn	2.25 sn	2.05 sn	2.24 sn	2.44 sn	2.58 sn	2.25 sn	2.56 sn	2.84 sn	2.97 sn
Romantik Müzik	$1.5 \leq EDT \leq 2.2$ (Bruckner)	Hidaka vd.,2024	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Klasik Müzik	$1.4 \leq EDT \leq 2.0$ (Mozart)	Hidaka vd.,2024	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$1.5 \leq EDT \leq 2.0$ (Rossini)	Hidaka vd.,2024	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Klasik Türk Müziği	$1.20 \leq EDT \leq 1.4$	Torun, 201	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Senfoni	$2.61 \leq EDT \leq 3.19$ *	Şekil 58*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+
Modern Müzik	$1.5 \leq EDT \leq 2.0$ (Stravinsky)	Hidaka vd.,2024	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hafif Müzik Konser Salonu	$2.27 \leq EDT \leq 2.77$	Şekil 58*	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	+	-	-
Organ	$3.08 \leq EDT \leq 3.76$	Şekil 58*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elde edilen reverberasyon süresi, önerilen optimum aralığın				Altındadır.				Arasındadır.				Üstündedir			
* : Şekil 58’te 30000 m ³ için verilen optimum EDT değerinin $\pm\%10$ ’u hesaplanarak belirlenmiştir.															

500 Hz ile 1000 Hz arasındaki orta frekans bölgesi için önerilen optimum EDT değer aralıkları incelendiğinde, salon akustiğinin her bir müzik türü için farklı EDT düzeylerine ihtiyaç duyduğu tespit edilmiştir. Mevcut durumda elde edilen EDT değerlerinin, romantik müzik ve modern müzik için önerilen tüm optimum değer aralıklarını karşıladığı belirlenmiştir. Elde edilen değer, klasik Türk müziği için verilen optimum değer aralığının üzerinde kaldığı, senfoni, hafif müzik ve organ müziği için ise önerilen aralıkların altında kaldığı tespit edilmiştir.

Ahşap malzeme kullanılan senaryolardan elde edilen veriler incelendiğinde, yalnızca romantik müzik için önerilen optimum EDT değer aralığının %25, %50 ve %75 açıklığa sahip senaryolarda sağlandığı belirlenmiştir. Buna ek olarak, %25 açıklığa sahip senaryoda

modern müzik için önerilen değer aralığının da karşılandığı tespit edilmiştir. Diğer müzik türleri açısından ise önerilen EDT aralıklarının tam olarak sağlanamadığı tespit edilmiştir.

Alçıpan malzeme kullanılan senaryolarda, birçok müzik türü için önerilen optimum değer aralıklarının karşılanamadığı belirlenmiştir. Buna karşın, %25 açıklık oranına sahip senaryoda yalnızca romantik müzik için, %75 ve %100 açıklığa sahip senaryolarda ise sadece hafif müzik türü için önerilen aralıkların sağlandığı tespit edilmiştir.

Beton malzeme kullanılan senaryolar değerlendirildiğinde, %75 ve %100 açıklık oranına sahip senaryolarda senfoni müziği için önerilen optimum EDT aralıklığının sağlandığı belirlenmiştir. %50 Açıklık oranına sahip senaryoda ise yalnızca hafif müzik için önerilen optimum değer aralığının karşılandığı tespit edilmiştir.

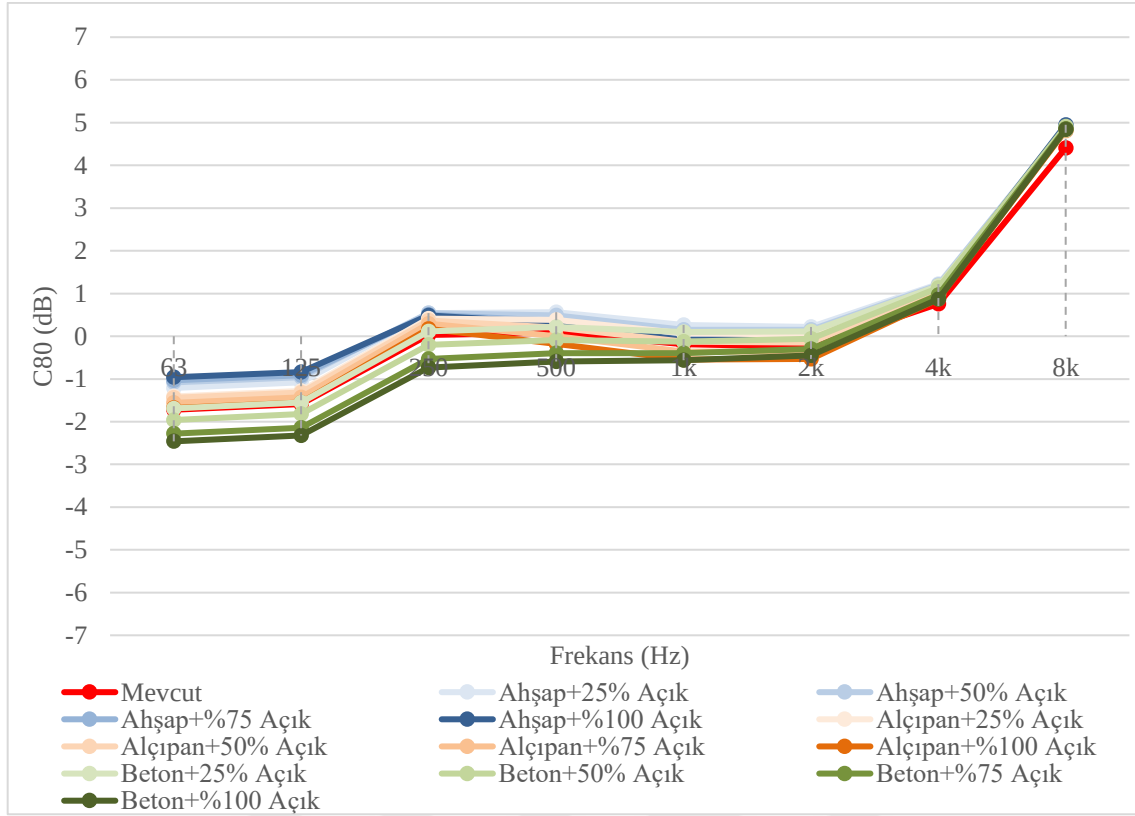
Şekil 58'den elde edilen organ müziğine yönelik optimum değer aralığının, incelenen hiçbir senaryo tarafından sağlanamadığı belirlenmiştir.

C80 Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %50 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen C80 değerleri Şekil 95'te sunulmuştur.

Konser salonunun genel değerlendirilmesinde, C80 parametresi için ISO 3382-1:2009 standardında önerilen $-5 \text{ dB} \leq C80 \leq +5 \text{ dB}$ ve Barron (1993) tarafından önerilen $-2 \text{ dB} \leq C80 \leq +2 \text{ dB}$ aralıkları esas alınmıştır. Bu referans değer aralıkları, Şekil 95'teki grafikte taralı alanlarla gösterilmiştir.

Farklı müzik türlerine yönelik olarak, orta frekanslardaki önerilen C80 değer aralıklarına ilişkin değerlendirmeler Tablo 32'ye göre yapılmıştır.

Mevcut durumun simülasyonundan elde edilen C80 değerlerinin, 63 Hz, 125 Hz, 1000 Hz ve 2000 Hz frekanslarda negatif değerlerdeyken; 250 Hz, 500 Hz, 4000 Hz ve 8000 Hz frekanslarda pozitif değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Mevcut durumda C80 parametresinin orta frekans bölgesindeki ortalama değeri -0.06 dB olarak hesaplanmıştır.



Şekil 94. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen C80 değerleri

Konser salonunun %50 oranında birleştirilmiş hacimli senaryolarına ait simülasyonlardan elde edilen grafikler incelendiğinde, C80 parametresine yönelik genel değerlendirmede, orta frekans bölgesinde elde edilen tüm değerlerin referans olarak kabul edilen her iki optimum aralık içerisinde yer aldığı belirlenmiştir.

Özellikle beton malzeme kullanılan, %75 ve %100 açıklığa sahip senaryolarda, 63 Hz ve 125 Hz frekanslarına ait C80 parametresi değerlerinin, Barron (1993) tarafından önerilen optimum aralıkların altında kaldığı belirlenmiştir. Bu sonuç, alçak frekans bantlarında geç yansımaların baskın olduğunu ve bu frekanslarda ses netliğinin azaldığını ortaya koymaktadır.

Birleştirilmiş hacimde uygulanan malzeme türü ve açıklık oranındaki değişimin, C80 değerleri üzerinde belirgin bir etki oluşturmadığı tespit edilmiştir.

Orta frekans bölgesinde (500-1000 Hz) farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıkları ile %50 birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen simülasyon sonuçları arasındaki karşılaştırmalı ilişki Tablo 32’de sunulmuştur. Tabloda yeşil renkle gösterilen hücreler elde edilen C80 değerlerinin önerilen optimum değer aralığında yer aldığını, mavi

hücreler bu aralığın üzerinde kalan değerleri, kırmızı hücreler ise optimum aralığın altında kalan değerleri ifade etmektedir.

Tablo 32. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryolarda elde edilen ortalama C80 değerlerinin önerilen optimum aralıklarla karşılaştırılması

			Mevcut	%50 Birleştirilmiş Hacim											
				Ahşap Malzeme				Alçıpan Malzeme				Beton			
				%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık	%25 Açık	%50 Açık	%75 Açık	%100 Açık
Müzik Türü	Optimum Değer Aralıkları	C80 (dB) Kaynak	-0.06	0.41	0.32	0.18	0.11	0.23	0.04	-0.18	-0.37	0.16	-0.11	-0.40	-0.58
Romantik Müzik	$-3 \leq C80 \leq +4$	Ahnert & Tennhardt, 2008	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Klasik ve Modern Müzik	$C80 \geq -3$	Easera, n.d.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	$-2 \leq C80 \leq 0$	Holden, 2016	+	-	-	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+
Klasik Türk Müziği	$-4 \leq C80 \leq +4$	Torun, 2019	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Piyano Solosu	$0 \leq C80 \leq 2.4$	Hidaka & Nishihara, 2022	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-
Keman Solosu	$-1.6 \leq C80 \leq 0.7$	Hidaka & Nishihara, 2022	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Senfoni	$-1 \leq C80 \leq +3$	Gade, 2014	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Elde edilen reverberasyon süresi, önerilen optimum aralığın			Altındadır.				Arasındadır.				Üstündedir				

500 Hz ile 1000 Hz arasındaki orta frekans bölgesine ilişkin önerilen optimum C80 değer aralıkları incelendiğinde, salon akustiğinin her bir müzik türü için farklı C80 düzeylerine ihtiyaç duyduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, %50 birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen C80 değerlerinin; romantik müzik, modern müzik, klasik Türk müziği, keman solosu ve senfoni türleri için önerilen optimum değer aralıklarını karşıladığı belirlenmiştir.

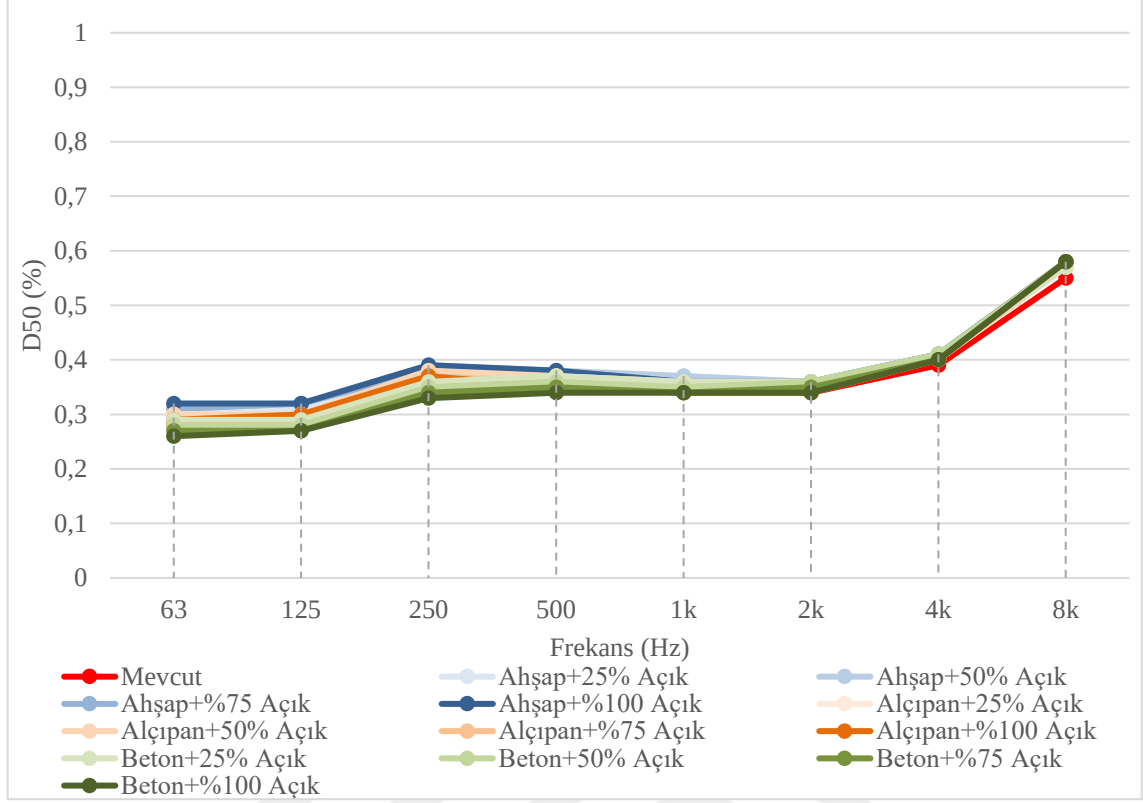
Piyano solosu için önerilen optimum C80 değer aralığı $0 \leq C80 \leq 2.4$ dB olarak ifade edilmiştir. Bu doğrultuda, senaryolardan elde edilen negatif C80 değerlerinin söz konusu

aralığın altında kaldığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan, klasik müzik için Holden (2016) tarafından önerilen aralık $-2 \leq C80 \leq 0$ dB olduğundan, senaryolarda elde edilen pozitif C80 değerlerinin bu aralığın üzerinde kaldığı belirlenmiştir.

D50 Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %50 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen D50 değerleri Şekil 96'da sunulmuştur.

Konser salonundan elde edilen D50 parametresine ait veriler değerlendirilirken, orta frekans bölgesinde ISO 3382-1:2009 tarafından önerilen $0.3 \leq D50 \leq 0.7$ değer aralığı referans alınmıştır. Referans olarak alınan optimum değer aralığı, Şekil 96'da verilen grafik üzerinde taralı bir şekilde gösterilmiştir.

Mevcut durumun simülasyonundan elde edilen D50 değerleri, alçak frekanslarda (250 Hz'e kadar) artış eğilimi gösterirken, 250 Hz ile 2000 Hz frekans aralığında düşük miktarda bir azalma eğilimi göstermiştir. Buna ek olarak, 2000 Hz'den 8000 Hz'e doğru gidildikçe D50 değerlerinde belirgin bir artış görülmüştür. Mevcut durumda D50 parametresinin orta frekans bölgesindeki ortalama değeri 0.36 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değere göre, mekandaki yansıyan ses enerjilerinin dengede olduğu ve mekan içinde gerçekleştirilen konuşma faaliyetinin anlaşılabilirliğinin yeterli düzeyde olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 95. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen D50 değerleri

Konser salonuna ait simülasyonlardan elde edilen D50 değerlerine yönelik yapılan genel değerlendirme sonucunda, orta frekans bölgesinde farklı senaryolardan elde edilen tüm D50 değerlerinin referans olarak kabul edilen optimum değer aralığını karşıladığı belirlenmiştir.

Senaryoların simülasyonları sonucunda elde edilen tüm D50 grafiklerinde, 125 Hz sonrasında belirgin bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. 500 Hz ile 1000 Hz frekans aralığında ise, değerlerin optimum aralığın alt sınırına yaklaşmasına rağmen önerilen düzeyin sağlandığı tespit edilmiştir.

63 Hz için yapılan değerlendirmede, ahşap malzeme kullanılan tüm senaryolar ile alçıpan malzeme kullanılarak oluşturulan %25 ve %50 açıklığa sahip senaryolar dışında kalan tüm senaryolarda D50 değerlerinin, önerilen optimum aralığın altında kaldığı belirlenmiştir. Bu bulgular, alçak frekanslarda geç yansıyan enerjinin baskın olduğunu ve 63 Hz’de salon içi ses netliğinin zayıfladığını ortaya koymaktadır.

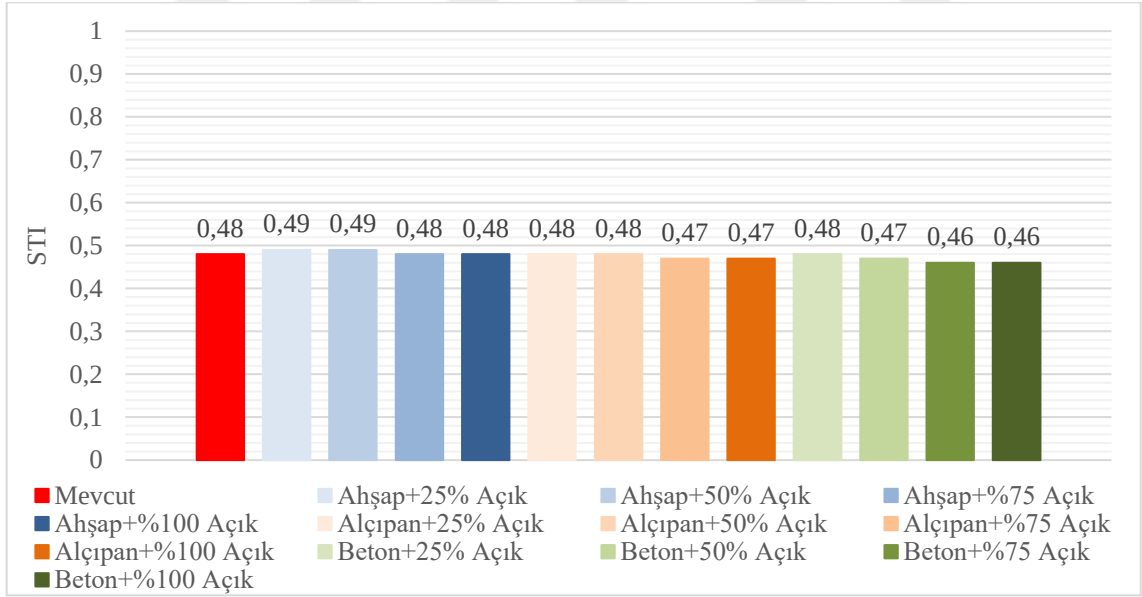
125 Hz için yapılan değerlendirmede, beton malzeme kullanılan tüm senaryolardan elde edilen D50 değerlerinin, önerilen optimum aralığın altında kaldığı belirlenmiştir. Bu

bulgular, alçak frekanslarda geç yansımaların etkisinin arttığını ve 125 Hz’de salon içi ses netliğinin zayıfladığını göstermektedir.

STI Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu’na ait %50 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen STI değerleri Şekil 97’de verilmiştir.

Konser salonundan elde edilen STI parametresine ait ortalama değerler değerlendirilirken, Houtgast vd. (1980) tarafından önerilen optimum değer aralıkları referans alınmıştır. Referans olarak alınan optimum değer aralıkları:

- 0.00 - 0.30 arasında ise “Kötü”
- 0.30 - 0.45 arasında ise “Zayıf”
- 0.45 - 0.60 arasında ise “Orta”
- 0.60 - 0.75 arasında ise “İyi”
- 0.75 - 1.00 arasında ise “Çok iyi”, olarak tanımlanmıştır.



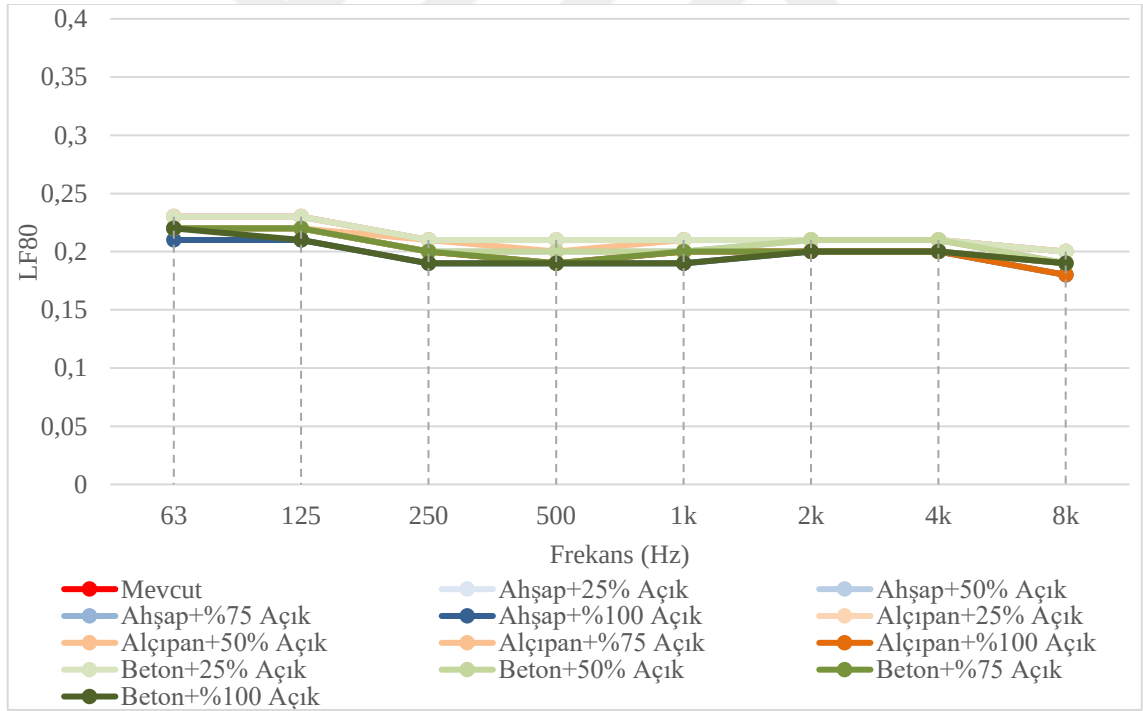
Şekil 96. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen STI değerleri

Mevcut durumun simülasyonu sonucu elde edilen ortalama STI değeri 0.48 olup, bu değer “orta” düzeyde konuşma anlaşılabilirliğine karşılık gelmektedir.

Tüm senaryolardan elde edilen Konuşma Anlaşılabilirlik İndeksi (STI) değerlerinin orta düzeye karşılık geldiği tespit edilmiştir. Özellikle beton malzeme kullanılan senaryolarda, yüksek T30 ve EDT değerlerine rağmen salon içindeki ortalama STI düzeyinin yine orta seviyede kaldığı belirlenmiştir.

LF80 Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %50 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen LF80 değerleri Şekil 98'de sunulmuştur.

Konser salonunun simülasyonlarından elde edilen LF80 parametresine ait veriler değerlendirilirken, orta frekans bölgesinde ISO 3382-1:2009 tarafından önerilen $0.05 \leq LF80 \leq 0.35$ değer aralığı referans alınmıştır. Referans alınan değer aralığı, Şekil 98'de verilen grafik üzerinde taralı bir şekilde gösterilmiştir.



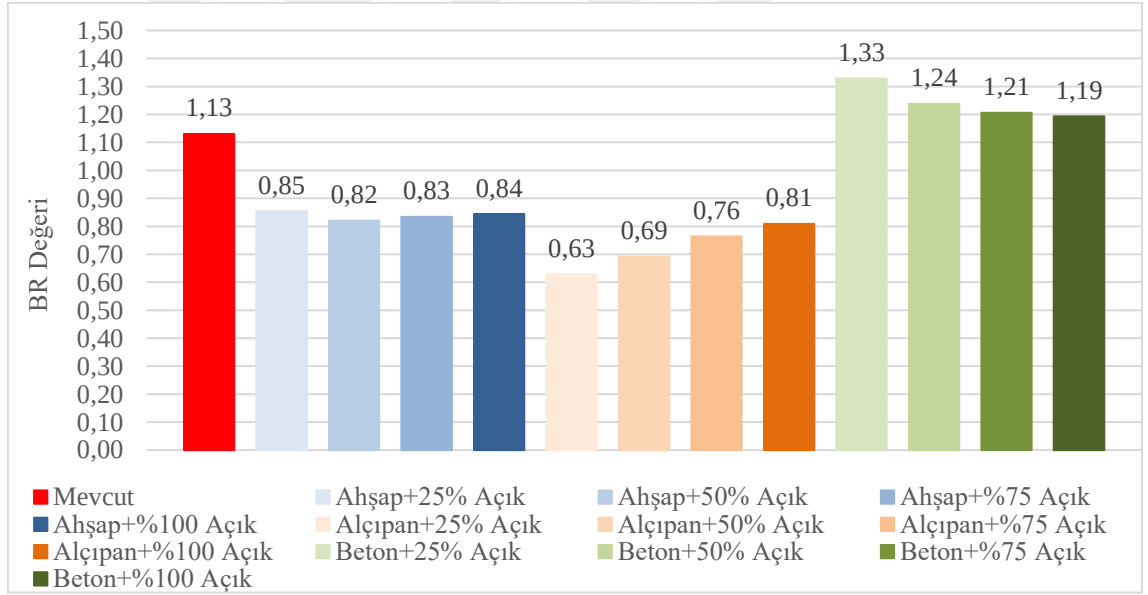
Şekil 97. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen LF80 değerleri

Mevcut durumun simülasyonu sonucunda elde edilen LF80 değerlerinin, ilgili frekans bantlarında referans aralıkları içinde kaldığı ancak frekans arttıkça bu değerlerde azalma olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca, simülasyonlardan elde edilen tüm verilerin belirlenen optimum değer aralıkları içerisinde yer aldığı tespit edilmiştir.

BR Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %50 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen BR oranları Şekil 99'da sunulmuştur.

Konser salonunun simülasyonlarından elde edilen BR parametresine ait veriler değerlendirilirken, Inacio (2022) ve Arau (1999) tarafından önerilen optimum değer aralıkları kullanılmıştır. Bu değer aralıkları, reverberasyon süresinin 1.8 sn'den fazla olduğu mekanlar için 1.1 ile 1.25; 1.8 sn'den az olduğu mekanlar için ise 1 ile 1.45 olarak belirlenmiştir.



Şekil 98. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryoların simülasyonlarından elde edilen BR oranları

Orta frekans bölgesinde, konser salonunun simülasyonlarından elde edilen BR değerlerine ilişkin analiz sonuçları, referans alınan değer aralıkları temel alınarak değerlendirilmiştir (Tablo 33).

Tablo 33. Ortalama T30 ve BR değerlerinin değerlendirilmesi

Senaryolar	T30 (500 Hz-1000 Hz Ort.) sn	Değer Aralıkları	BR Değerleri
Mevcut	2.11	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.13
Ahşap+25% Açık	2.71	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.85
Ahşap+50% Açık	2.86	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.82
Ahşap+%75 Açık	2.85	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.83
Ahşap+%100 Açık	2.85	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.84
Alçıpan+25% Açık	4.18	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.63
Alçıpan+50% Açık	4.03	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.69
Alçıpan+%75 Açık	3.73	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.76
Alçıpan+%100 Açık	3.56	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	0.81
Beton+25% Açık	7.26	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.33
Beton+50% Açık	5.77	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.24
Beton+%75 Açık	4.97	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.21
Beton+%100 Açık	4.53	$1.1 \leq BR \leq 1.25$	1.19

Mevcut duruma ilişkin reverberasyon süresine göre hesaplanan bas oranı 1.13 olup bu değerin referans olarak kabul edilen optimum aralıkları karşıladığı belirlenmiştir.

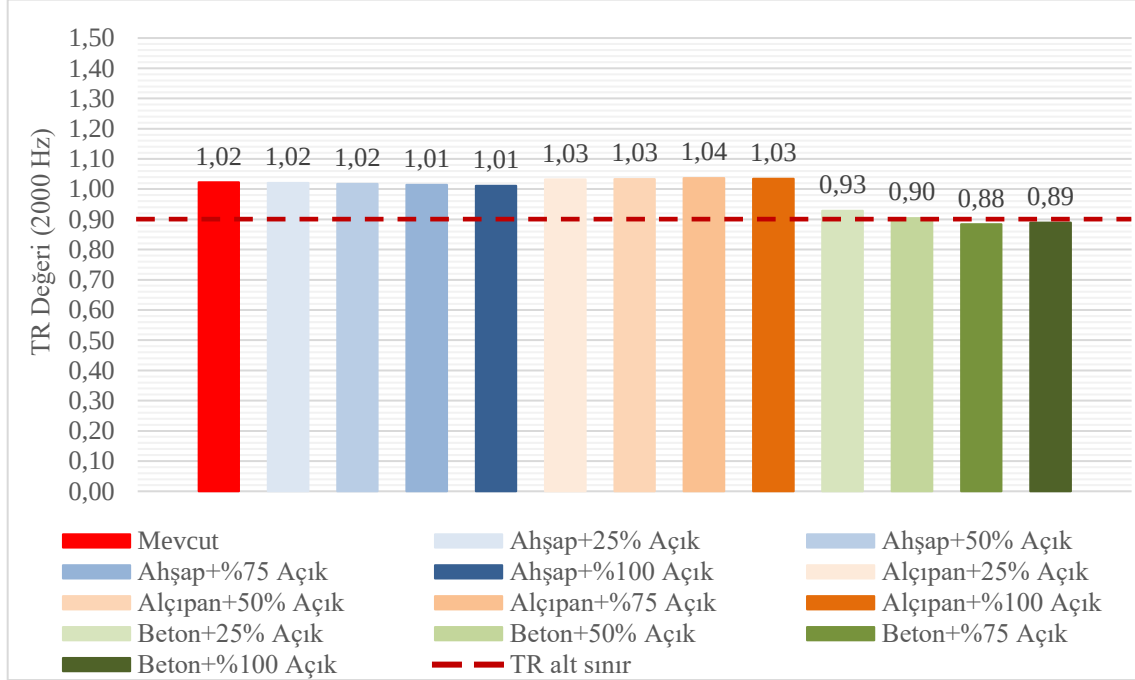
Ahşap malzeme kullanılan senaryolarda, açıklık oranı arttıkça elde edilen BR değerlerinde artış eğilimi olmasına rağmen en yüksek BR değeri, %25 açıklığa sahip senaryoda elde edilmiştir. Diğer taraftan, alçıpan malzeme kullanılan senaryolarda BR değerlerinde bir artış gözlense de hiçbir senaryoda önerilen optimum değer aralıklarına ulaşamamıştır. Bazı senaryolarda T30 ve EDT değerleri önerilen aralıklarla uyumlu olsa da tüm senaryolarda elde edilen BR değerlerinin optimum seviyelerin altında kalması salon içerisindeki bas ses enerjisinin hacim için yetersiz olduğunu ortaya koymaktadır.

Ahşap ve alçıpan malzeme uygulanan senaryolardan elde edilen verilerin aksine, beton malzeme kullanılan senaryoların simülasyonlarından elde edilen BR değerlerinin belirlenen optimum aralıkların %25 açıklığa sahip senaryo hariç karşılandığı görülmüştür. Her ne kadar T30 ve EDT değerleri önerilen aralıkların üzerinde olsa da, salondaki bas ses enerjisinin önerilen ideal seviyeye ulaştığı sonucuna varılmıştır.

TR Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %50 oranında birleştirilmiş hacim ile oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen TR oranları Şekil 100 ve Şekil 101'de sunulmuştur.

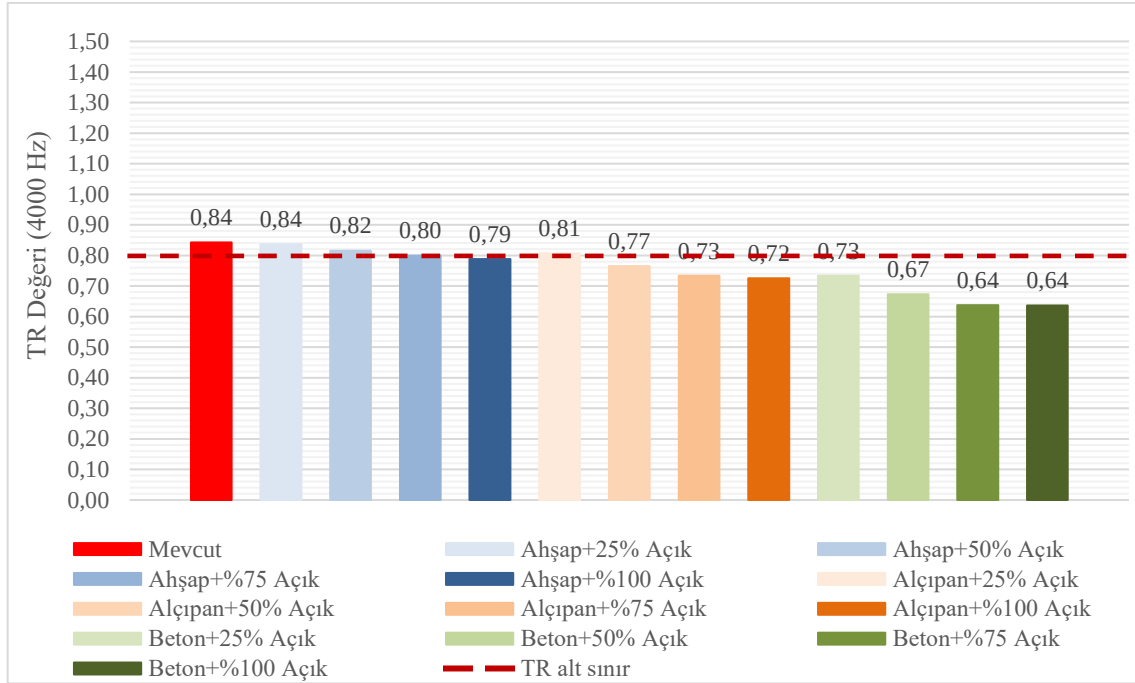
Konser salonuna ait simülasyonlardan elde edilen TR (Tiz Oranı) parametresine ilişkin veriler değerlendirilirken, Mehta ve diğ. (1999) tarafından önerilen optimum değer aralıkları temel alınmıştır. 2000 Hz için kullanılan $TR = EDT_{2000} / EDT_{mid}$ denkleminde göre bu değerin

0.9'un üzerinde olması gerektiği, 4000 Hz için kullanılan $TR = EDT_{4000} / EDT_{mid}$ denklemine göre ise 0.8'in üzerinde olması gerektiği belirtilmiştir.



Şekil 99. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen TR değerleri (2000 Hz)

Konser salonunun %50 birleştirilmiş hacimli senaryolarına ait simülasyon verilerine göre, 2000 Hz'deki EDT değeri kullanılarak elde edilen TR değerinin, mevcut senaryoda grafik üzerinde yatay çizgiyle belirtilen minimum sınır değeri karşıladığı belirlenmiştir. İç yüzeylerinde ahşap ve alçıpan malzeme kullanılan sekiz farklı senaryoda da bu sınırın aşıldığı ve mevcut senaryoya yakın TR değerlerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Beton malzeme kullanılan senaryolarda ise TR değerlerinin diğer malzeme türlerine kıyasla daha düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür. %25 ve %50 açıklık oranına sahip senaryolarda söz konusu sınır değeri karşılanırken, %75 ve %100 açıklığa sahip senaryolarda bu değerin altında kaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, 2000 Hz'de bazı senaryolarda yeterli reverberasyon süresinin sağlanamadığını göstermiştir.



Şekil 100. %50 Birleştirilmiş hacimli senaryolardan elde edilen TR değerleri (4000 Hz)

Konser salonunun %50 birleştirilmiş hacimli senaryolarına ait simülasyon verilerine göre, 4000 Hz'deki EDT değeri kullanılarak hesaplanan TR değerinin, mevcut senaryoda grafik üzerinde yatay çizgiyle gösterilen minimum sınır değeri karşıladığı gözlemlenmiştir. İç yüzeylerinde ahşap malzeme kullanılan dört senaryoda, açıklık oranı arttıkça TR değerlerinde azalma meydana gelmiş olup %100 açıklığa sahip senaryoda ise söz konusu sınırın altında kaldığı belirlenmiştir. Alçıpan malzeme kullanılan senaryolarda da benzer bir eğilim gözlenmiş olup yalnızca %25 açıklığa sahip senaryoda sınır değerin aşıldığı, diğer senaryolarda ise bu değerin altında kaldığı tespit edilmiştir. Beton malzeme kullanılan senaryolarda ise EDT değerlerine bağlı olarak hesaplanan TR değerlerinin düşük seviyelerde kaldığı ve bu nedenle 4000 Hz'de yeterli EDT değerlerinin sağlanamadığı belirlenmiştir.

3.2.4. Birleştirilmiş Hacimli Senaryolara Ait Genel Değerlendirme

Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %20, %35 ve %50 oranlarında birleştirilmiş hacimlerle oluşturulan senaryolarda, üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan ve beton) ile bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75 ve %100) kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar sonucunda elde edilen T30, EDT, C80, D50, LF80, STI, BR ve TR parametrelerine ait veriler, “3.1. Birleştirilmiş Hacimli Senaryoların Sesin Nesnel Parametreleri Açısından Değerlendirilmesi” başlığı altında ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Özellikle T30 ve EDT değerlerinde, hacim, malzeme ve açıklık değişimiyle birlikte belirgin ölçüde farklılıklar tespit edilmiştir. Bundan dolayı, bu başlık altında söz konusu parametreler oktav bant frekanslarda karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

T30 Değerlerinin Analizi: Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait %20, %35 ve %50 birleştirilmiş hacim senaryolarında; üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak senaryolar oluşturulmuş ve bu senaryolara ait simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Belirlenen değişkenler doğrultusunda elde edilen T30 değerleri, salonun akustik performansı açısından oktav bant frekanslarda incelendiğinde anlamlı farklılıklar göstermektedir. Daha detaylı bir analiz yapılabilmesi amacıyla, ISO 3382-1:2009 standardı doğrultusunda frekanslar üç temel aralıkta sınıflandırılmıştır. 63-250 Hz aralığı; düşük frekans bölgesi, 500-1000 Hz aralığı; orta frekans bölgesi, 2000-8000 Hz aralığı ise yüksek frekans bölgesi olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, elde edilen T30 değerleri mevcut senaryo ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş; ISO 3382-1 standardında belirtilen şekilde, 5% JND (en küçük fark edilebilir değişim) eşiği esas alınarak, hangi senaryolarda anlamlı farklılıkların ortaya çıktığı frekansa bağlı olarak belirlenmiştir.

Düşük frekans bölgesinde (63-250 Hz) ses dalga boylarının uzun olması nedeniyle reverberasyon süresi artmakta, bu da kullanılan malzeme türü ile hacim özelliklerinin daha belirleyici hale gelmesine neden olmaktadır. Orta frekans bölgesi (500-1000 Hz) ise hem müzikal etki hem de konuşma anlaşılabilirliği açısından salonun genel akustik konforunu belirleyen en önemli aralıklardan biridir. Yüksek frekans bölgesindeki (2000-8000 Hz) sesler ise, yüzey dokularına, açıklıklara ve detay tasarım unsurlarına karşı daha duyarlıdır. Bu nedenle bu bölgeler akustik performans değerlendirmelerinde özel öneme sahiptir. Her

frekans bölgesi salon akustiği açısından farklı özellikleri temsil ettiğinden, elde edilen veriler bu bölgeler özelinde ayrı ayrı yorumlanmıştır. Düşük frekans bölgesine ait T30 değerleri Şekil 101’de yer almaktadır.



Şekil 101. Birleştirilmiş hacimli senaryoların tamamı için düşük frekans bölgesinde (63-250 Hz) elde edilen T30 değerleri

Şekil 101'de yer alan grafik incelendiğinde, düşük frekans aralığında (63-250 Hz) elde edilen T30 değerlerinin, hem kullanılan malzeme türüne hem de hacimsel düzenlemelere bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu frekans aralığında her bir frekans için elde edilen değerler ayrı ayrı dikkate alındığında, T30 parametresine ait en yüksek değer, %50 birleştirilmiş hacim ve %25 açıklık oranının olduğu senaryoda gerçekleştiği tespit edilmiştir.

63 Hz'de en yüksek T30 değeri “%50 beton %25 açık” senaryosunda 10.19 sn. olarak elde edilmiş, bunu “%35 beton %25 açık” senaryosunda elde edilen 8.14 sn.'lik T30 değeri takip etmiştir. 125 Hz'de ise yine en yüksek T30 değeri “%50 beton %25 açık” senaryosunda 9.94 sn. olarak elde edilmiş, bunu “%35 beton %25 açık” senaryosunda elde edilen 7.96 sn.'lik değer takip etmiştir. Her iki frekansta da tüm senaryolar kıyaslandığında, 63 Hz'de elde edilen T30 değerlerinin genellikle daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak en yüksek reverberasyon süresinden en düşük süreye doğru sıralama yapıldığında, her iki frekansta aynı senaryo sıralamasının olduğu dikkat çekmektedir (Tablo 34). 250 Hz'de de benzer bir eğilim devam etmiş, en yüksek T30 değeri yine “%50 beton %25 açık” senaryosunda 9.33 sn. olarak elde edilmiş, bunu “%35 beton %25 açık” senaryosunda elde edilen 7.51 sn.'lik değer takip etmiştir. Bu durum, düşük frekanslarda açıklık oranının ve kullanılan malzeme türünün reverberasyon süresi üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Düşük frekans bölgesine ait tüm senaryolar genelinde, beton malzeme kullanılan senaryolardan elde edilen T30 değerlerinin, diğer malzeme türlerine göre önemli ölçüde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

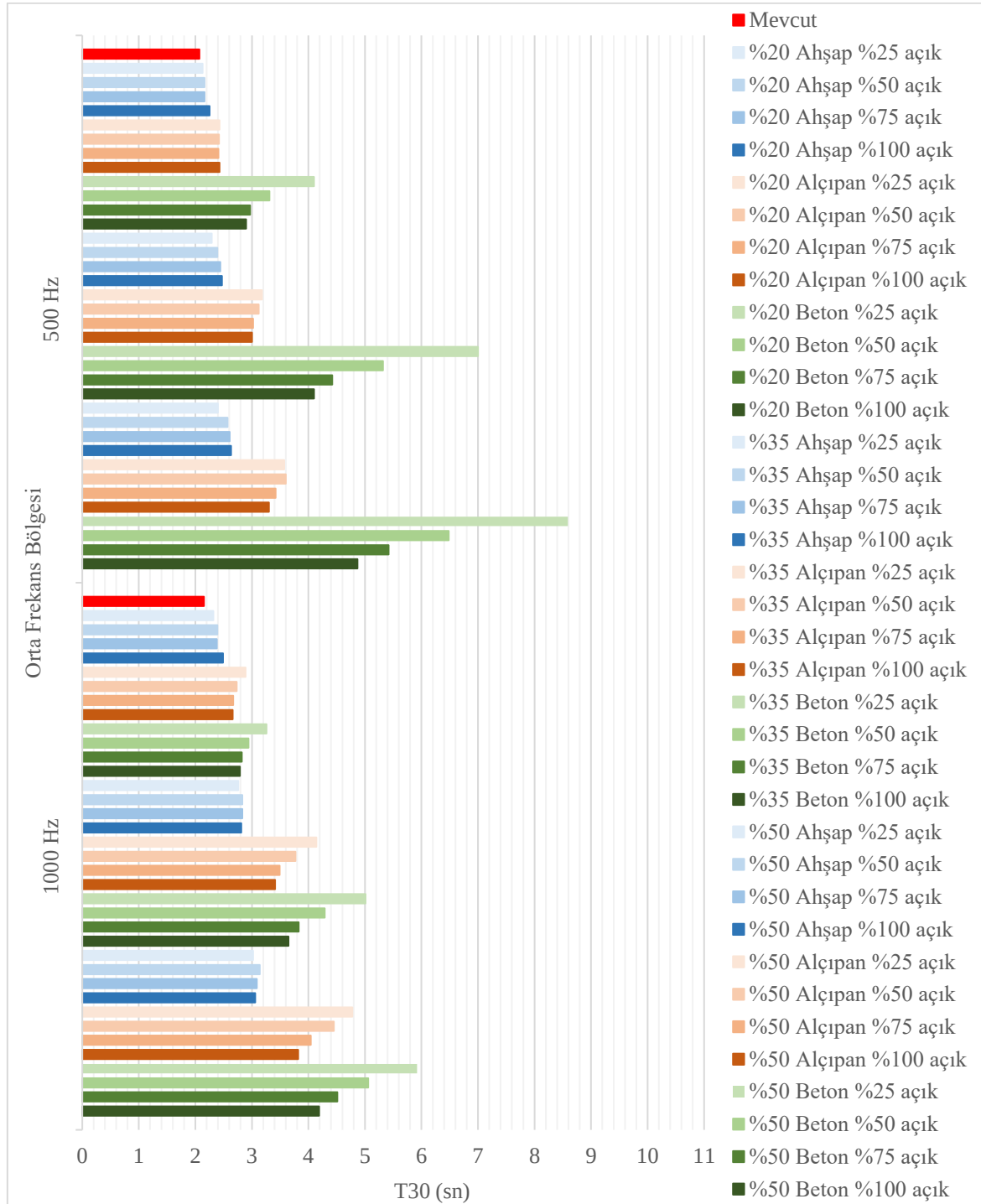
ISO 3382-1:2009 standardına göre T30 parametresi için fark edilebilir değişim sınırı 5% (JND) olarak tanımlanmıştır. Mevcut senaryonun 63 Hz için 2.73 sn., 125 Hz için 2.66 ve 250 Hz için 2.09 sn. olan T30 değerleri dikkate alındığında, bu değerlerin 5% üzerinde ya da altında kalan senaryolarda elde edilen reverberasyon sürelerinin, insan kulağı tarafından algılanabilecek düzeyde farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır. Üç farklı frekansta da Tablo 34'te belirtilen “%20 beton %100 açık” senaryosundan elde edilen değerlerin üzerindeki senaryolar, yankılanmanın dinleyici tarafından fark edilebilir düzeyde arttığını göstermektedir. Özellikle beton malzeme kullanılan ve düşük açıklığa sahip senaryolarda bu durum belirginleşmektedir.

Birleştirilmiş hacim senaryolarının simülasyonları sonucunda elde edilen düşük frekans bölgesine (63-250 Hz) ait T30 değerleri, her oktav bant frekans için en yüksekten en düşüğe doğru sıralanmış ve bu sıralamalar Tablo 34'te sunulmuştur.

Tablo 34. Düşük frekans bölgesindeki T30 değerlerinin büyüktten küçüğe sıralanması

	63 Hz		125 Hz		250 Hz	
1.	%50 Beton %25 açık	10.19	%50 Beton %25 açık	9.94	%50 Beton %25 açık	9.33
2.	%35 Beton %25 açık	8.14	%35 Beton %25 açık	7.96	%35 Beton %25 açık	7.51
3.	%50 Beton %50 açık	7.55	%50 Beton %50 açık	7.4	%50 Beton %50 açık	6.88
4.	%50 Beton %75 açık	6.4	%50 Beton %75 açık	6.28	%50 Beton %75 açık	5.69
5.	%35 Beton %50 açık	6.19	%35 Beton %50 açık	6.08	%35 Beton %50 açık	5.57
6.	%50 Beton %100 açık	5.85	%50 Beton %100 açık	5.73	%50 Beton %100 açık	5.08
7.	%35 Beton %75 açık	5.25	%35 Beton %75 açık	5.15	%35 Beton %75 açık	4.6
8.	%35 Beton %100 açık	4.9	%35 Beton %100 açık	4.81	%20 Beton %25 açık	4.24
9.	%20 Beton %25 açık	4.63	%20 Beton %25 açık	4.56	%35 Beton %100 açık	4.23
10.	%20 Beton %50 açık	3.93	%20 Beton %50 açık	3.86	%20 Beton %50 açık	3.39
11.	%20 Beton %75 açık	3.67	%20 Beton %75 açık	3.6	%20 Beton %75 açık	3.03
12.	%20 Beton %100 açık	3.63	%20 Beton %100 açık	3.56	%20 Beton %100 açık	2.96
13.	%50 Alçıpan %100 açık	3.35	%50 Alçıpan %100 açık	3.29	%50 Alçıpan %100 açık	2.47
14.	%50 Alçıpan %75 açık	3.32	%50 Alçıpan %75 açık	3.26	%50 Alçıpan %75 açık	2.44
15.	%50 Alçıpan %50 açık	3.26	%50 Alçıpan %50 açık	3.2	%50 Alçıpan %50 açık	2.37
16.	%35 Alçıpan %100 açık	3.18	%35 Alçıpan %100 açık	3.12	%35 Alçıpan %100 açık	2.36
17.	%35 Alçıpan %75 açık	3.14	%35 Alçıpan %75 açık	3.08	%35 Alçıpan %75 açık	2.33
18.	%50 Alçıpan %25 açık	3.07	%50 Alçıpan %25 açık	3.01	%50 Ahşap %100 açık	2.27
19.	%35 Alçıpan %50 açık	3.05	%35 Alçıpan %50 açık	3	%35 Alçıpan %50 açık	2.26
20.	%35 Alçıpan %25 açık	2.94	%35 Alçıpan %25 açık	2.89	%50 Ahşap %75 açık	2.23
21.	%20 Alçıpan %100 açık	2.87	%20 Alçıpan %100 açık	2.82	%50 Alçıpan %25 açık	2.23
22.	%20 Alçıpan %75 açık	2.83	%20 Alçıpan %75 açık	2.77	%35 Ahşap %100 açık	2.2
23.	%20 Alçıpan %50 açık	2.81	%20 Alçıpan %50 açık	2.75	%35 Alçıpan %25 açık	2.18
24.	%20 Alçıpan %25 açık	2.76	%20 Alçıpan %25 açık	2.7	%50 Ahşap %50 açık	2.17
25.	Mevcut	2.73	Mevcut	2.66	%35 Ahşap %75 açık	2.16
26.	%20 Ahşap %25 açık	2.6	%20 Ahşap %25 açık	2.55	%20 Alçıpan %100 açık	2.15
27.	%35 Ahşap %25 açık	2.59	%35 Ahşap %25 açık	2.54	%20 Alçıpan %50 açık	2.12
28.	%50 Ahşap %25 açık	2.59	%50 Ahşap %25 açık	2.54	%20 Alçıpan %75 açık	2.12
29.	%50 Ahşap %100 açık	2.58	%50 Ahşap %100 açık	2.53	%35 Ahşap %50 açık	2.12
30.	%35 Ahşap %100 açık	2.57	%35 Ahşap %100 açık	2.52	Mevcut	2.09
31.	%50 Ahşap %75 açık	2.57	%50 Ahşap %75 açık	2.52	%20 Ahşap %100 açık	2.09
32.	%20 Ahşap %50 açık	2.56	%50 Ahşap %50 açık	2.51	%50 Ahşap %25 açık	2.09
33.	%50 Ahşap %50 açık	2.56	%20 Ahşap %50 açık	2.5	%20 Alçıpan %25 açık	2.07
34.	%35 Ahşap %50 açık	2.55	%35 Ahşap %50 açık	2.5	%35 Ahşap %25 açık	2.07
35.	%35 Ahşap %75 açık	2.55	%35 Ahşap %75 açık	2.5	%20 Ahşap %25 açık	2.05
36.	%20 Ahşap %75 açık	2.52	%20 Ahşap %75 açık	2.47	%20 Ahşap %50 açık	2.05
37.	%20 Ahşap %100 açık	2.52	%20 Ahşap %100 açık	2.47	%20 Ahşap %75 açık	2.05

Konser salonlarında akustik konforu belirleyen en kritik frekans aralığı, orta frekans bölgesi (500-1000 Hz) olarak kabul edilmektedir. Senaryolara ait simülasyonlar sonucunda elde edilen bu frekans aralığındaki T30 değerleri Şekil 102’de yer almaktadır.



Şekil 102. Birleştirilmiş hacimli senaryoların tamamı için orta frekans bölgesinde (500-1000 Hz) elde edilen T30 değerleri

Şekil 102'de sunulan grafik incelendiğinde, orta frekans bölgesinde (500 Hz-1000 Hz) elde edilen T30 değerlerinin, hem kullanılan malzeme türüne hem de hacimsel düzenlemelere bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu frekans aralığında her bir frekans için elde edilen değerler ayrı ayrı dikkate alındığında, T30 parametresindeki en yüksek değer %50 birleştirilmiş hacim ve %25 açıklık oranına sahip senaryoda gerçekleştiği tespit edilmiştir.

500 Hz'de en yüksek T30 değeri, “%50 beton %25 açık” senaryosunda 8.59 sn. olarak elde edilmiş, bunu “%35 beton %25 açık” senaryosunda elde edilen 7.00 sn.'lik değer takip etmiştir. Tablo 35'te frekansa bağlı yapılan sıralama incelendiğinde, 500 Hz'de elde edilen ilk on en yüksek T30 değerinin neredeyse tamamında malzeme türünün beton, açıklık oranının ise genellikle %25 veya %50 olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, beton kullanılan senaryolarda orta frekans bölgesinde reverberasyon süresinin artırdığını göstermektedir.

1000 Hz'de de en yüksek T30 değeri yine “%50 beton %25 açık” senaryosunda 5.92 sn. olarak elde edilmiş, bunu “%35 beton %25 açık” senaryosunda elde edilen 5.01 sn.'lik değer takip etmiştir. Aynı tabloda 1000 Hz için elde edilen sıralama incelendiğinde, ilk on sırada yer alan senaryoların büyük çoğunluğunun beton malzeme kullanılan ve düşük açıklığa sahip senaryolar olduğu dikkat çekmektedir.

Her iki frekansta elde edilen T30 değerleri karşılaştırıldığında, 500 Hz'deki değerlerin genel olarak daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

ISO 3382-1:2009 standardına göre T30 parametresi için fark edilebilir değişim sınırı %5 (JND) olarak tanımlanmıştır. Mevcut senaryonun 500 Hz için 2.07 sn. ve 1000 Hz için 2.15 sn. olan T30 değerleri dikkate alındığında, bu değerlerin 5% üzerinde ya da altında kalan senaryolarda elde edilen reverberasyon sürelerinin, insan kulağı tarafından algılanabilecek düzeyde farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır. 500 Hz'de Tablo 35'te belirtilen “%50 ahşap %75 açık” ve 1000 Hz için “%20 alçıpan %50 açık” senaryolarından elde edilen değerlerin üzerindeki senaryolar, yankılanmanın dinleyici tarafından fark edilebilir düzeyde arttığını göstermektedir. Bu durum özellikle beton malzeme kullanılan ve düşük açıklığa sahip senaryolarda belirginleşmektedir.

Birleştirilmiş hacim senaryolarına ait simülasyonlar sonucunda elde edilen orta frekans bölgesi (500-1000 Hz) T30 değerleri, her oktav bant frekans için büyükten küçüğe sıralanarak Tablo 35'te sunulmuştur.

Tablo 35. Orta frekans bölgesindeki T30 değerlerinin büyükten küçüğe sıralanması

	500 Hz		1000 Hz	
1.	%50 Beton %25 açık	8.59	%50 Beton %25 açık	5.92
2.	%35 Beton %25 açık	7	%50 Beton %50 açık	5.06
3.	%50 Beton %50 açık	6.48	%35 Beton %25 açık	5.01
4.	%50 Beton %75 açık	5.42	%50 Alçıpan %25 açık	4.78
5.	%35 Beton %50 açık	5.32	%50 Beton %75 açık	4.51
6.	%50 Beton %100 açık	4.87	%50 Alçıpan %50 açık	4.45
7.	%35 Beton %75 açık	4.42	%35 Beton %50 açık	4.29
8.	%20 Beton %25 açık	4.1	%50 Beton %100 açık	4.19
9.	%35 Beton %100 açık	4.1	%35 Alçıpan %25 açık	4.14
10.	%50 Alçıpan %50 açık	3.6	%50 Alçıpan %75 açık	4.04
11.	%50 Alçıpan %25 açık	3.57	%35 Beton %75 açık	3.83
12.	%50 Alçıpan %75 açık	3.42	%50 Alçıpan %100 açık	3.82
13.	%20 Beton %50 açık	3.31	%35 Alçıpan %50 açık	3.77
14.	%50 Alçıpan %100 açık	3.3	%35 Beton %100 açık	3.65
15.	%35 Alçıpan %25 açık	3.18	%35 Alçıpan %75 açık	3.49
16.	%35 Alçıpan %50 açık	3.12	%35 Alçıpan %100 açık	3.41
17.	%35 Alçıpan %75 açık	3.02	%20 Beton %25 açık	3.26
18.	%35 Alçıpan %100 açık	3	%50 Ahşap %50 açık	3.14
19.	%20 Beton %75 açık	2.97	%50 Ahşap %75 açık	3.09
20.	%20 Beton %100 açık	2.9	%50 Ahşap %100 açık	3.06
21.	%50 Ahşap %100 açık	2.63	%50 Ahşap %25 açık	3.02
22.	%50 Ahşap %75 açık	2.61	%20 Beton %50 açık	2.94
23.	%50 Ahşap %50 açık	2.57	%20 Alçıpan %25 açık	2.89
24.	%35 Ahşap %100 açık	2.47	%35 Ahşap %50 açık	2.83
25.	%35 Ahşap %75 açık	2.44	%35 Ahşap %75 açık	2.83
26.	%20 Alçıpan %25 açık	2.43	%20 Beton %75 açık	2.82
27.	%20 Alçıpan %100 açık	2.43	%35 Ahşap %100 açık	2.81
28.	%20 Alçıpan %50 açık	2.42	%20 Beton %100 açık	2.79
29.	%20 Alçıpan %75 açık	2.41	%35 Ahşap %25 açık	2.76
30.	%50 Ahşap %25 açık	2.4	%20 Alçıpan %50 açık	2.73
31.	%35 Ahşap %50 açık	2.39	%20 Alçıpan %75 açık	2.67
32.	%35 Ahşap %25 açık	2.29	%20 Alçıpan %100 açık	2.66
33.	%20 Ahşap %100 açık	2.25	%20 Ahşap %100 açık	2.49
34.	%20 Ahşap %50 açık	2.16	%20 Ahşap %50 açık	2.39
35.	%20 Ahşap %75 açık	2.16	%20 Ahşap %75 açık	2.38
36.	%20 Ahşap %25 açık	2.13	%20 Ahşap %25 açık	2.32
37.	Mevcut	2.07	Mevcut	2.15

Konser salonlarının detay tasarımlarında oldukça önemli olan frekans aralığı, yüksek frekans bölgesi (2000 Hz - 8000 Hz) olarak kabul edilmektedir. Senaryolara ait simülasyonlar sonucunda elde edilen bu frekans aralığındaki T30 değerleri Şekil 103’de yer almaktadır.



Şekil 103. Birleştirilmiş hacimli senaryoların tamamı için yüksek frekans bölgesinde (2000-8000 Hz) elde edilen T30 değerleri

Şekil 103'te sunulan grafik incelendiğinde, yüksek frekans aralığında (2000-8000 Hz) elde edilen T30 değerlerinin, hem kullanılan malzeme türüne hem de hacimsel düzenlemelere bağlı olarak frekanslara göre önemli ölçüde farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.

Ahşap malzeme kullanılan senaryolar değerlendirildiğinde, bu senaryolarda 2000 Hz ve 4000 Hz frekanslarında açıklık oranı ve hacim değişimlerinin T30 değerleri üzerinde belirgin bir etki oluşturmadığı tespit edilmiştir. Ancak, iki hacmi birbirine bağlayan açıklıkların oranı artırıldığında T30 değerlerinde artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. 2000 Hz frekansında, alçıpan ve beton malzeme kullanılan senaryolarda ise, düşük ve orta frekans bölgelerinde olduğu gibi açıklık oranı azaldıkça T30 değerlerinin yükseldiği belirlenmiştir. Ayrıca, hacimsel artışla birlikte T30 değerlerinde genel bir yükselme eğilimi gözlenmiş; bu artış, açıklık oranının azalmasıyla daha belirgin hale gelmiştir.

2000 Hz'de en yüksek T30 değeri, “%50 alçıpan %25 açık” ve “%50 beton %25 açık” senaryolarında 4.58 sn. olarak elde edilmiştir. Bu senaryoları, “%50 alçıpan %50 açık (4.30 sn)” ve “%50 beton %50 açık (4.22 sn)” senaryoları takip etmiştir. İlk sıralarda; alçıpan, beton yüzeyli ve düşük açıklık oranına sahip senaryoların yer aldığı dikkat çekmektedir. 4000 Hz'de ise en yüksek T30 değeri “%50 beton %50 açık” ve “%50 beton %75 açık” senaryolarında 2.51 sn. olarak elde edilmiş, bunu “%50 beton %100 açık (2.48 sn)” ve “%50 alçıpan %75 açık (2.38 sn)” senaryoları takip etmiştir. Bu frekansta özellikle beton yüzeyli senaryoların baskın olduğu, alçıpan ve ahşap malzeme kullanılan senaryoların ise genel olarak daha alt sıralarda yer aldığı tespit edilmiştir. 8000 Hz'de ise T30 değerleri diğer frekanslara kıyasla belirgin biçimde düşmüştür. Tüm senaryolar arasında büyük farklar oluşmadığı, reverberasyon sürelerinin bu frekansta ciddi oranda azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yüzey malzemesi ve açıklık düzenlemelerinin yüksek frekansta reverberasyon süresi üzerinde daha az etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

ISO 3382-1:2009 standardına göre, T30 parametresi için fark edilebilir değişim sınırı 5% (JND) olarak tanımlanmaktadır. Mevcut senaryoya ait T30 değerleri; 2000 Hz için 2.14 sn., 4000 Hz için 1.78 sn. ve 8000 Hz için 1.01 sn. olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin 5% üzerinde ya da altında kalan senaryolarda elde edilen reverberasyon sürelerinin, insan kulağı tarafından algılanabilecek düzeyde farklılık gösterdiği kabul edilmektedir. 2000 Hz'de, Tablo 36'da belirtilen “%50 ahşap-%25 açık” senaryosu ve bu değer üzerinde olan senaryolar, yankılanmanın dinleyici tarafından fark edilebilecek düzeyde arttığını göstermektedir. Benzer şekilde, 4000 Hz'de “%35 alçıpan-%50 açık” senaryosu ve

üzerindeki değerlerde de aynı durum gözlemlenmektedir. Bu sonuçlar, özellikle beton malzeme kullanılan ve açıklık oranı düşük olan senaryolarda daha belirgin hale gelmektedir. Diğer taraftan, 8000 Hz’de elde edilen T30 değerleri incelendiğinde, mevcut senaryo ile diğer senaryolar arasında dinleyici tarafından fark edilebilecek düzeyde belirgin bir değişim tespit edilmemiştir.

Birleştirilmiş hacim senaryolarının simülasyonlarından elde edilen yüksek frekans bölgesindeki (2000-8000 Hz) T30 değerleri, her oktav bant frekans için en yüksekten en düşüğe doğru sıralanmış ve bu sıralamalar Tablo 36'da sunulmuştur.



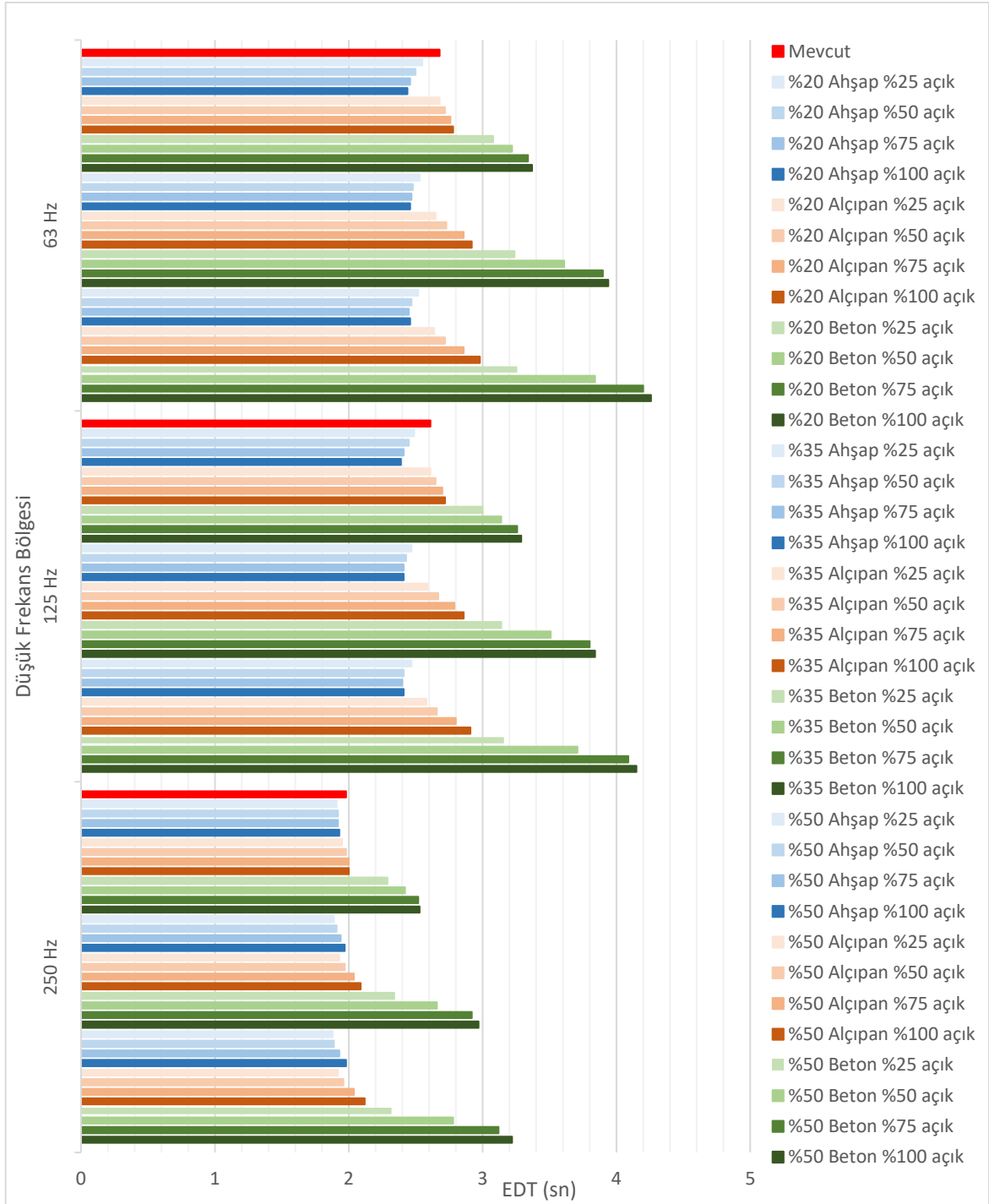
Tablo 36. Yüksek frekans bölgesindeki T30 değerlerinin büyükten küçüğe sıralanması

	2000 Hz		4000 Hz		8000 Hz	
1.	%50 Alçıpan %25 açık	4.58	%50 Beton %50 açık	2.51	%50 Beton %100 açık	1.1
2.	%50 Beton %25 açık	4.58	%50 Beton %75 açık	2.51	%35 Beton %100 açık	1.09
3.	%50 Alçıpan %50 açık	4.3	%50 Beton %100 açık	2.48	%35 Alçıpan %100 açık	1.08
4.	%50 Beton %50 açık	4.22	%50 Alçıpan %75 açık	2.38	%35 Beton %75 açık	1.08
5.	%35 Alçıpan %25 açık	4.07	%35 Beton %50 açık	2.37	%50 Alçıpan %100 açık	1.08
6.	%35 Beton %25 açık	4.03	%35 Beton %75 açık	2.37	%50 Beton %75 açık	1.08
7.	%50 Alçıpan %75 açık	3.92	%50 Beton %25 açık	2.36	%35 Alçıpan %75 açık	1.07
8.	%50 Beton %75 açık	3.9	%50 Alçıpan %50 açık	2.35	%20 Beton %75 açık	1.06
9.	%35 Alçıpan %50 açık	3.72	%50 Alçıpan %100 açık	2.35	%20 Beton %100 açık	1.06
10.	%50 Alçıpan %100 açık	3.71	%35 Beton %100 açık	2.33	%50 Ahşap %100 açık	1.06
11.	%35 Beton %50 açık	3.7	%35 Beton %25 açık	2.3	%50 Alçıpan %75 açık	1.06
12.	%50 Beton %100 açık	3.7	%35 Alçıpan %75 açık	2.26	%20 Alçıpan %75 açık	1.05
13.	%35 Alçıpan %75 açık	3.44	%35 Alçıpan %100 açık	2.25	%20 Alçıpan %100 açık	1.05
14.	%35 Beton %75 açık	3.44	%35 Alçıpan %50 açık	2.24	%20 Beton %50 açık	1.05
15.	%35 Alçıpan %100 açık	3.34	%50 Alçıpan %25 açık	2.19	%35 Ahşap %100 açık	1.05
16.	%35 Beton %100 açık	3.31	%50 Ahşap %100 açık	2.18	%35 Beton %50 açık	1.05
17.	%20 Alçıpan %25 açık	2.96	%50 Ahşap %75 açık	2.17	%20 Ahşap %100 açık	1.04
18.	%20 Beton %25 açık	2.93	%35 Alçıpan %25 açık	2.15	%20 Alçıpan %50 açık	1.04
19.	%50 Ahşap %75 açık	2.85	%50 Ahşap %50 açık	2.11	%35 Ahşap %75 açık	1.04
20.	%50 Ahşap %50 açık	2.84	%35 Ahşap %100 açık	2.1	%35 Alçıpan %50 açık	1.04
21.	%50 Ahşap %100 açık	2.84	%35 Ahşap %75 açık	2.08	%50 Ahşap %75 açık	1.04
22.	%20 Alçıpan %50 açık	2.76	%20 Beton %25 açık	2.07	%50 Beton %50 açık	1.04
23.	%20 Beton %50 açık	2.74	%20 Beton %75 açık	2.07	%20 Ahşap %75 açık	1.03
24.	%20 Alçıpan %75 açık	2.68	%20 Beton %50 açık	2.06	%20 Alçıpan %25 açık	1.03
25.	%20 Beton %75 açık	2.68	%20 Beton %100 açık	2.06	%20 Beton %25 açık	1.03
26.	%50 Ahşap %25 açık	2.68	%35 Ahşap %50 açık	2.04	%50 Alçıpan %50 açık	1.03
27.	%20 Alçıpan %100 açık	2.66	%20 Alçıpan %100 açık	2.01	%20 Ahşap %50 açık	1.02
28.	%20 Beton %100 açık	2.66	%20 Alçıpan %50 açık	2	%35 Ahşap %50 açık	1.02
29.	%35 Ahşap %75 açık	2.66	%20 Alçıpan %75 açık	2	%35 Alçıpan %25 açık	1.02
30.	%35 Ahşap %100 açık	2.66	%50 Ahşap %25 açık	1.98	%35 Beton %25 açık	1.02
31.	%35 Ahşap %50 açık	2.63	%20 Alçıpan %25 açık	1.97	%50 Ahşap %50 açık	1.02
32.	%35 Ahşap %25 açık	2.54	%20 Ahşap %100 açık	1.96	Mevcut	1.01
33.	%20 Ahşap %100 açık	2.4	%35 Ahşap %25 açık	1.96	%20 Ahşap %25 açık	1.01
34.	%20 Ahşap %50 açık	2.32	%20 Ahşap %75 açık	1.91	%35 Ahşap %25 açık	1.01
35.	%20 Ahşap %75 açık	2.32	%20 Ahşap %50 açık	1.89	%50 Alçıpan %25 açık	1.01
36.	%20 Ahşap %25 açık	2.28	%20 Ahşap %25 açık	1.87	%50 Beton %25 açık	1.01
37.	Mevcut	2.14	Mevcut	1.78	%50 Ahşap %25 açık	1

EDT Değerlerinin Analizi: Erken yansımalar, konser salonlarındaki hem müzikal performans hem de konuşma anlaşılabilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Direkt sesle bütünleşen erken yansıyan sesler, algılanan sesin güçlenmesini ve mekan içerisindeki ses kalitesinin artmasını sağlamaktadır (Everest & Pohlmann, 2022) (Kuttruff, 2017).

Isarphilharmonie Konser Salonu'na ait tüm birleştirilmiş hacim senaryolarında; üç farklı malzeme türü (ahşap, alçıpan, beton) ve bu hacimlerin birleşimini sağlayan dört farklı açıklık oranı (%25, %50, %75, %100) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda düşük frekans bölgesinde elde edilen EDT değerleri Şekil 104'te sunulmuştur.

ISO 3382-1:2009 standardına göre, EDT parametresi için fark edilebilir değişim sınırı 5% (JND) olarak tanımlanmaktadır. Mevcut senaryoya ait EDT değerleri; 2000 Hz için 2.14 sn, 4000 Hz için 1.78 sn. ve 8000 Hz için 1.01 sn. olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin 5% üzerinde ya da altında kalan senaryolarda elde edilen reverberasyon sürelerinin, insan kulağı tarafından algılanabilecek düzeyde farklılık gösterdiği kabul edilmektedir.



Şekil 104. Birleştirilmiş hacimli senaryoların tamamı için düşük frekans bölgesinde (63-250 Hz) elde edilen EDT değerleri

Şekil 104'te sunulan grafik incelendiğinde, düşük frekans aralığında (63-250 Hz) elde edilen EDT değerlerinin, hem kullanılan malzeme türüne hem de hacimsel düzenlemelere bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Bu frekans aralığında, her bir oktav bant frekans için elde edilen değerler ayrı ayrı dikkate alındığında, EDT

parametresinin en yüksek olduğu durumun %50 beton ve %100 açıklık oranına sahip senaryoda, 4.26 sn. ile gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Malzeme türü açısından yapılan değerlendirmede, T30 değerlerinde olduğu gibi düşük frekanslarda da en yüksek EDT değerleri beton malzeme kullanılan senaryolarda elde edilmiştir. Bunu sırasıyla alçıpan ve ahşap malzeme kullanılan senaryolar takip etmiştir.

63 Hz’de en yüksek EDT değeri “%50 beton-%100 açık” senaryosunda 4.26 sn. olarak elde edilmiştir. Bunu “%50 beton-%75 açık” senaryosunda elde edilen 4.20 sn.’lik EDT değeri takip etmiştir. 125 Hz’de ise yine en yüksek EDT değeri “%50 beton-%100 açık” senaryosunda 4.15 sn. olarak elde edilmiştir. İkinci sırada “%35 beton-%25 açık” senaryosunda elde edilen 4.09 sn.’lik değer yer almıştır. Her iki frekansta da tüm senaryolar kıyaslandığında, 63 Hz’de elde edilen EDT değerlerinin genellikle daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak en uzun süreden en kısa süreye doğru yapılan sıralamada, her iki frekansta da aynı senaryo sıralamasının oluştuğu dikkat çekmektedir (Tablo 37).

250 Hz’de de benzer bir eğilim gözlenmiş, en yüksek EDT değeri yine “%50 beton-%100 açık” senaryosunda 3.22 sn. olarak elde edilmiştir. İkinci sırada ise “%50 beton-%75 açık” senaryosunda elde edilen 2.97 sn.’lik değer yer almıştır.

Düşük frekans bölgesine ait tüm senaryolar genelinde, beton malzeme kullanılan durumlarda elde edilen EDT değerlerinin diğer malzeme türlerine kıyasla belirgin şekilde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Özellikle, T30 değerlerinden farklı olarak, açıklık oranı arttıkça EDT değerlerinde de artış meydana geldiği dikkat çekmektedir.

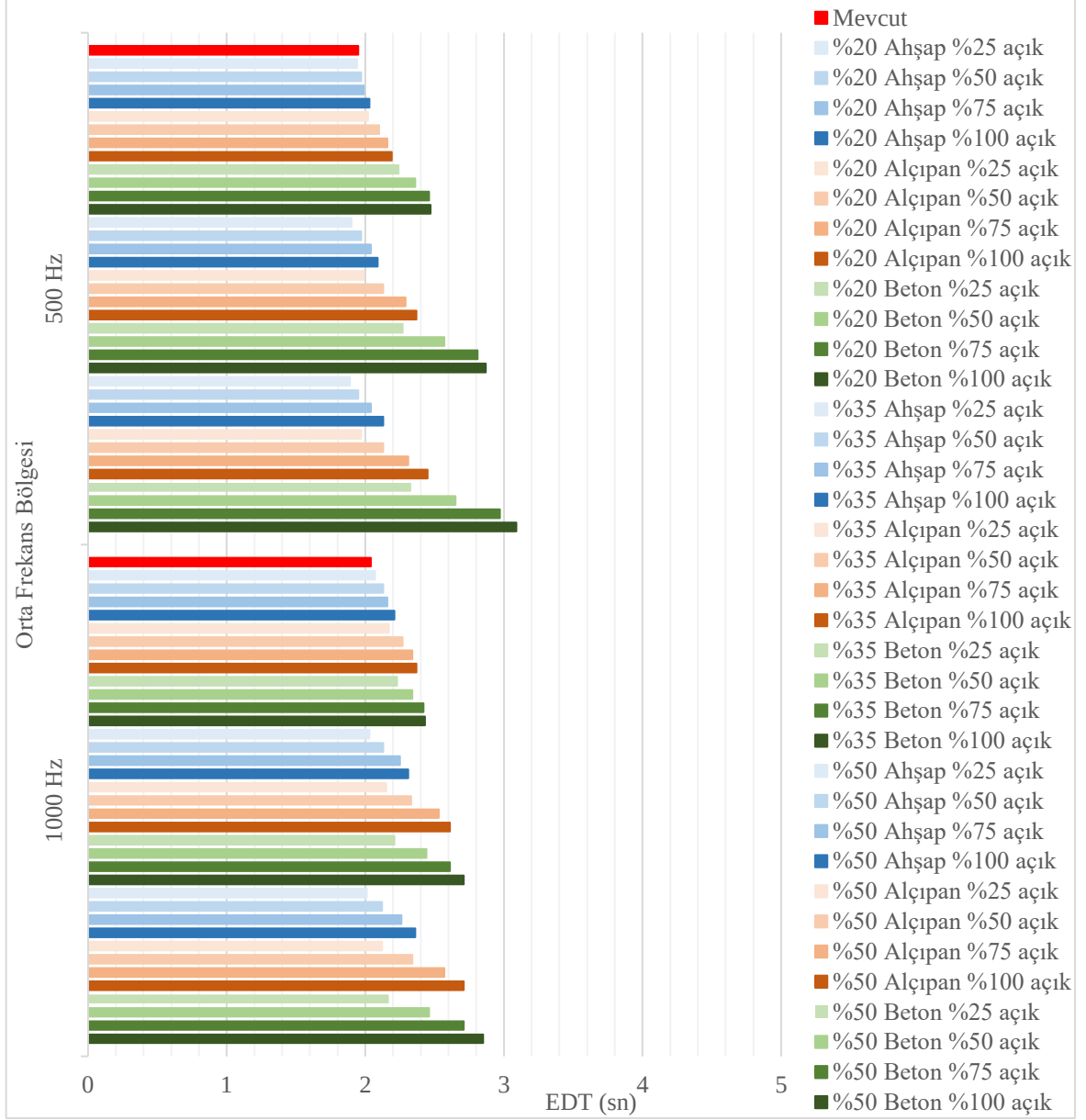
ISO 3382-1:2009 standardına göre EDT parametresi için fark edilebilir değişim sınırı 5% (JND) olarak tanımlanmıştır. Mevcut senaryonun 63 Hz için 2.68 sn. 125 Hz için 2.61 sn. ve 250 Hz için 1.98 sn. olan EDT değerleri dikkate alındığında, bu değerlerin 5% üzerinde ya da altında kalan senaryolarda elde edilen yankı sürelerinin insan kulağı tarafından fark edilebilir olduğu anlaşılmaktadır. Tablo 37’de yer alan; 63 Hz için “%20 beton-%100 açık”, 125 Hz için “%20 beton-%100 açık” ve 250 Hz için “%20 beton-%75 açık” senaryolarından elde edilen değerlerin üzerindeki senaryolarda, yankılanma dinleyici tarafından fark edilebilir düzeyde artmaktadır. Bu durum özellikle beton malzeme kullanılan ve yüksek açıklığa sahip senaryolarda belirginleşmektedir.

Birleştirilmiş hacim senaryolarının simülasyonları sonucunda elde edilen düşük frekans bölgesine (63-250 Hz) ait EDT değerleri, her oktav bant frekans için en yüksekten en düşüğe doğru sıralanmış ve bu sıralamalar Tablo 37’de sunulmuştur.

Tablo 37. Düşük frekans bölgesindeki EDT değerlerinin büyükten küçüğe sıralanması

	63 Hz		125 Hz		250 Hz	
1.	%50 Beton %100 açık	4.26	%50 Beton %100 açık	4.15	%50 Beton %100 açık	3.22
2.	%50 Beton %75 açık	4.2	%50 Beton %75 açık	4.09	%50 Beton %75 açık	3.12
3.	%35 Beton %100 açık	3.94	%35 Beton %100 açık	3.84	%35 Beton %100 açık	2.97
4.	%35 Beton %75 açık	3.9	%35 Beton %75 açık	3.8	%35 Beton %75 açık	2.92
5.	%50 Beton %50 açık	3.84	%50 Beton %50 açık	3.71	%50 Beton %50 açık	2.78
6.	%35 Beton %50 açık	3.61	%35 Beton %50 açık	3.51	%35 Beton %50 açık	2.66
7.	%20 Beton %100 açık	3.37	%20 Beton %100 açık	3.29	%20 Beton %100 açık	2.53
8.	%20 Beton %75 açık	3.34	%20 Beton %75 açık	3.26	%20 Beton %75 açık	2.52
9.	%50 Beton %25 açık	3.26	%50 Beton %25 açık	3.16	%20 Beton %50 açık	2.42
10.	%35 Beton %25 açık	3.24	%20 Beton %50 açık	3.14	%35 Beton %25 açık	2.34
11.	%20 Beton %50 açık	3.22	%35 Beton %25 açık	3.14	%50 Beton %25 açık	2.32
12.	%20 Beton %25 açık	3.08	%20 Beton %25 açık	3	%20 Beton %25 açık	2.29
13.	%50 Alçıpan %100 açık	2.98	%50 Alçıpan %100 açık	2.91	%50 Alçıpan %100 açık	2.12
14.	%35 Alçıpan %100 açık	2.92	%35 Alçıpan %100 açık	2.86	%35 Alçıpan %100 açık	2.09
15.	%35 Alçıpan %75 açık	2.86	%50 Alçıpan %75 açık	2.8	%35 Alçıpan %75 açık	2.04
16.	%50 Alçıpan %75 açık	2.86	%35 Alçıpan %75 açık	2.79	%50 Alçıpan %75 açık	2.04
17.	%20 Alçıpan %100 açık	2.78	%20 Alçıpan %100 açık	2.72	%20 Alçıpan %75 açık	2
18.	%20 Alçıpan %75 açık	2.76	%20 Alçıpan %75 açık	2.7	%20 Alçıpan %100 açık	2
19.	%35 Alçıpan %50 açık	2.73	%35 Alçıpan %50 açık	2.67	Mevcut	1.98
20.	%20 Alçıpan %50 açık	2.72	%50 Alçıpan %50 açık	2.66	%20 Alçıpan %50 açık	1.98
21.	%50 Alçıpan %50 açık	2.72	%20 Alçıpan %50 açık	2.65	%50 Ahşap %100 açık	1.98
22.	Mevcut	2.68	Mevcut	2.61	%35 Ahşap %100 açık	1.97
23.	%20 Alçıpan %25 açık	2.68	%20 Alçıpan %25 açık	2.61	%35 Alçıpan %50 açık	1.97
24.	%35 Alçıpan %25 açık	2.65	%35 Alçıpan %25 açık	2.59	%50 Alçıpan %50 açık	1.96
25.	%50 Alçıpan %25 açık	2.64	%50 Alçıpan %25 açık	2.58	%20 Alçıpan %25 açık	1.95
26.	%20 Ahşap %25 açık	2.55	%20 Ahşap %25 açık	2.49	%35 Ahşap %75 açık	1.94
27.	%35 Ahşap %25 açık	2.53	%35 Ahşap %25 açık	2.47	%20 Ahşap %100 açık	1.93
28.	%50 Ahşap %25 açık	2.52	%50 Ahşap %25 açık	2.47	%35 Alçıpan %25 açık	1.93
29.	%20 Ahşap %50 açık	2.5	%20 Ahşap %50 açık	2.45	%50 Ahşap %75 açık	1.93
30.	%35 Ahşap %50 açık	2.48	%35 Ahşap %50 açık	2.43	%20 Ahşap %50 açık	1.92
31.	%35 Ahşap %75 açık	2.47	%20 Ahşap %75 açık	2.41	%20 Ahşap %75 açık	1.92
32.	%50 Ahşap %50 açık	2.47	%35 Ahşap %75 açık	2.41	%50 Alçıpan %25 açık	1.92
33.	%20 Ahşap %75 açık	2.46	%35 Ahşap %100 açık	2.41	%20 Ahşap %25 açık	1.91
34.	%35 Ahşap %100 açık	2.46	%50 Ahşap %50 açık	2.41	%35 Ahşap %50 açık	1.91
35.	%50 Ahşap %100 açık	2.46	%50 Ahşap %100 açık	2.41	%35 Ahşap %25 açık	1.89
36.	%50 Ahşap %75 açık	2.45	%50 Ahşap %75 açık	2.4	%50 Ahşap %50 açık	1.89
37.	%20 Ahşap %100 açık	2.44	%20 Ahşap %100 açık	2.39	%50 Ahşap %25 açık	1.88

Birleştirilmiş hacimli tüm senaryolara ait simülasyonlar sonucunda orta frekans aralığında (500-1000 Hz) elde edilen EDT değerleri Şekil 105'te sunulmuştur.



Şekil 105. Birleştirilmiş hacimli senaryoların tamamı için orta frekans bölgesinde (500-1000 Hz) elde edilen EDT değerleri

Şekil 105 incelendiğinde, orta frekans aralığında (500-1000 Hz) elde edilen EDT değerlerinin, hem kullanılan malzeme türüne hem de hacimsel düzenlemelere bağlı olarak anlamlı farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. Bu frekans aralığında her oktav bant frekans için elde edilen değerler ayrı ayrı dikkate alındığında, EDT parametresinin en yüksek olduğu durum %50 beton ve %100 açıklık oranına sahip senaryoda 3.09 sn. ile gerçekleşmiştir.

500 Hz’de en yüksek EDT değeri “%50 beton-%100 açık” senaryosunda 3.09 sn. olarak elde edilmiştir. Bunu “%50 beton-%75 açık” senaryosunda elde edilen 2.97 sn.’lik değer takip etmiştir. Tablo 38’de frekansa bağlı yapılan sıralama incelendiğinde, 500 Hz’de elde edilen ilk on EDT değerinin neredeyse tamamında malzeme türünün beton olduğu, açıklık oranlarının ise genellikle %100, %75 veya %50 düzeyinde olduğu görülmektedir.

1000 Hz’de de en yüksek EDT değeri yine “%50 beton-%100 açık” senaryosunda 2.85 sn. olarak elde edilmiş, bunu “%35 beton-%100 açık” senaryosunda elde edilen 2.71 sn.’lik değer takip etmiştir. Aynı tabloda 1000 Hz için yapılan sıralama incelendiğinde, ilk on sırada yer alan senaryoların büyük çoğunluğunun beton malzeme kullanılan ve yüksek açıklığa sahip senaryolar olduğu dikkat çekmektedir.

Her iki frekansta elde edilen EDT değerleri karşılaştırıldığında, 500 Hz’teki değerlerin genel olarak daha yüksek olduğu görülmektedir (Tablo 38).

Ayrıca, 1000 Hz’de bazı senaryoların aynı EDT değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Örneğin, “%35 beton-%100 açık”, “%50 alçıpan-%100 açık” ve “%50 beton-%75 açık” senaryolarında EDT değeri 2.71 sn. olarak elde edilmiştir. Bu durum, tüm frekanslarda beton malzemeye kıyasla daha yüksek ses yutma katsayısına sahip olan alçıpan malzemenin, sabit hacimde daha yüksek açıklık oranı ile sabit açıklıkta ise daha büyük hacimle beton malzemeyle benzer EDT değerleri sağladığını göstermektedir. Benzer şekilde, “%35 alçıpan-%100 açık” ve “%35 beton-%75 açık” senaryolarında elde edilen 2.61 sn.’lik EDT değerleri, alçıpan malzemenin sabit hacim koşullarında daha yüksek açıklıkla beton malzeme kullanılan senaryodaki değeri karşılayabildiğini ortaya koymaktadır.

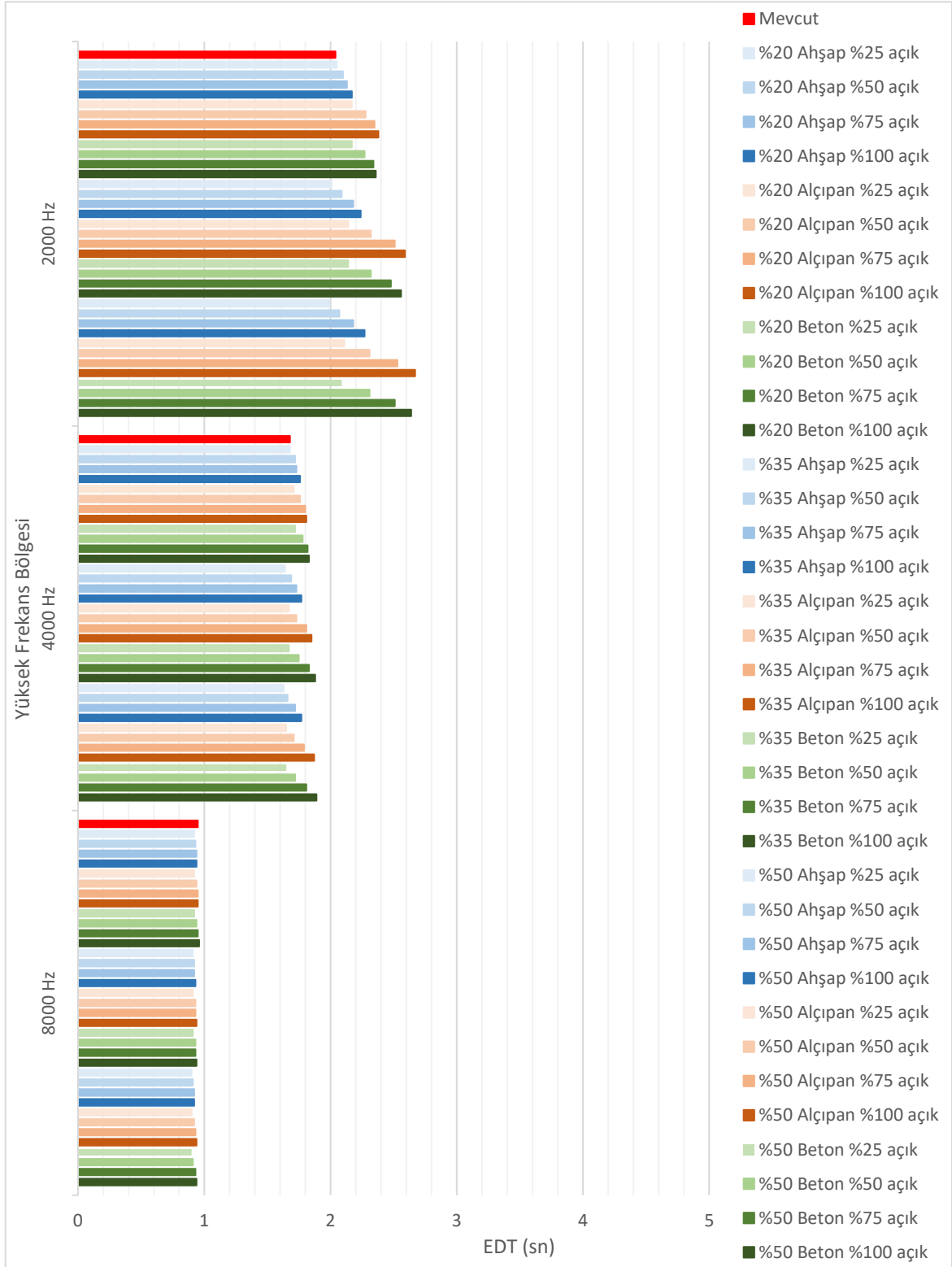
ISO 3382-1:2009 standardına göre EDT parametresi için fark edilebilir değişim sınırı 5% (JND) olarak tanımlanmıştır. Mevcut senaryonun 500 Hz için 1.95 sn. ve 1000 Hz için 2.04 sn. olan EDT değerleri dikkate alındığında, bu değerlerin 5% üzerinde ya da altında kalan senaryolarda elde edilen reverberasyon sürelerinin, insan kulağı tarafından algılanabilecek düzeyde farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır. 500 Hz’de Tablo 38’de belirtilen “%50 alçıpan-%100 açık” ve 1000 Hz için “%50 alçıpan-%75 açık” senaryolarından elde edilen değerlerin üzerindeki senaryolarda, yankılanma dinleyici tarafından fark edilebilir düzeyde artmaktadır. Bu durum özellikle beton malzeme kullanılan ve fazla açıklığa sahip senaryolarda belirginleşmektedir.

Birleştirilmiş hacim senaryolarının simülasyonları sonucunda elde edilen orta frekans bölgesine (500-1000 Hz) ait EDT değerleri, her oktav bant frekans için en yüksekten en düşüğe doğru sıralanmış ve bu sıralamalar Tablo 38’de sunulmuştur.

Tablo 38. Orta frekans bölgesindeki EDT değerlerinin büyükten küçüğe sıralanması

	500 Hz		1000 Hz	
1.	%50 Beton %100 açık	3.09	%50 Beton %100 açık	2.85
2.	%50 Beton %75 açık	2.97	%35 Beton %100 açık	2.71
3.	%35 Beton %100 açık	2.87	%50 Alçıpan %100 açık	2.71
4.	%35 Beton %75 açık	2.81	%50 Beton %75 açık	2.71
5.	%50 Beton %50 açık	2.65	%35 Alçıpan %100 açık	2.61
6.	%35 Beton %50 açık	2.57	%35 Beton %75 açık	2.61
7.	%20 Beton %100 açık	2.47	%50 Alçıpan %75 açık	2.57
8.	%20 Beton %75 açık	2.46	%35 Alçıpan %75 açık	2.53
9.	%50 Alçıpan %100 açık	2.45	%50 Beton %50 açık	2.46
10.	%35 Alçıpan %100 açık	2.37	%35 Beton %50 açık	2.44
11.	%20 Beton %50 açık	2.36	%20 Beton %100 açık	2.43
12.	%50 Beton %25 açık	2.33	%20 Beton %75 açık	2.42
13.	%50 Alçıpan %75 açık	2.31	%20 Alçıpan %100 açık	2.37
14.	%35 Alçıpan %75 açık	2.29	%50 Ahşap %100 açık	2.36
15.	%35 Beton %25 açık	2.27	%20 Alçıpan %75 açık	2.34
16.	%20 Beton %25 açık	2.24	%20 Beton %50 açık	2.34
17.	%20 Alçıpan %100 açık	2.19	%50 Alçıpan %50 açık	2.34
18.	%20 Alçıpan %75 açık	2.16	%35 Alçıpan %50 açık	2.33
19.	%35 Alçıpan %50 açık	2.13	%35 Ahşap %100 açık	2.31
20.	%50 Ahşap %100 açık	2.13	%20 Alçıpan %50 açık	2.27
21.	%50 Alçıpan %50 açık	2.13	%50 Ahşap %75 açık	2.26
22.	%20 Alçıpan %50 açık	2.1	%35 Ahşap %75 açık	2.25
23.	%35 Ahşap %100 açık	2.09	%20 Beton %25 açık	2.23
24.	%35 Ahşap %75 açık	2.04	%20 Ahşap %100 açık	2.21
25.	%50 Ahşap %75 açık	2.04	%35 Beton %25 açık	2.21
26.	%20 Ahşap %100 açık	2.03	%20 Alçıpan %25 açık	2.17
27.	%20 Alçıpan %25 açık	2.02	%50 Beton %25 açık	2.17
28.	%20 Ahşap %75 açık	1.99	%20 Ahşap %75 açık	2.16
29.	%35 Alçıpan %25 açık	1.99	%35 Alçıpan %25 açık	2.15
30.	%20 Ahşap %50 açık	1.97	%20 Ahşap %50 açık	2.13
31.	%35 Ahşap %50 açık	1.97	%35 Ahşap %50 açık	2.13
32.	%50 Alçıpan %25 açık	1.97	%50 Ahşap %50 açık	2.12
33.	Mevcut	1.95	%50 Alçıpan %25 açık	2.12
34.	%50 Ahşap %50 açık	1.95	%20 Ahşap %25 açık	2.07
35.	%20 Ahşap %25 açık	1.94	Mevcut	2.04
36.	%35 Ahşap %25 açık	1.9	%35 Ahşap %25 açık	2.03
37.	%50 Ahşap %25 açık	1.89	%50 Ahşap %25 açık	2.01

Birleştirilmiş hacimli tüm senaryolara ait simülasyonlar sonucunda yüksek frekans aralığında (2000-8000 Hz) elde edilen EDT değerleri Şekil 106’da sunulmuştur.



Şekil 106. Birleştirilmiş hacimli senaryoların tamamı için yüksek frekans bölgesinde (2000-8000 Hz) elde edilen EDT değerleri

Şekil 106 incelendiğinde, yüksek frekans aralığında (2000-8000 Hz) elde edilen EDT değerlerinin, hem kullanılan malzeme türüne hem de hacimsel düzenlemelere bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Bu frekans aralığında, her oktav bant frekans için elde edilen değerler ayrı ayrı dikkate alındığında, EDT parametresinin en yüksek değerinin %50 alçıpan ve %100 açıklık oranına sahip senaryoda, 2.67 sn. ile gerçekleştiği tespit edilmiştir. Malzeme türü açısından yapılan değerlendirmede, diğer frekanslarda elde edilen EDT değerlerinin aksine düşük frekanslarda en yüksek EDT değerleri alçıpan ve beton malzeme kullanılan senaryolarda elde edilmiştir.

2000 Hz’de, en yüksek EDT değeri “%50 alçıpan-%100 açık” senaryosunda 2.67 sn. olarak elde edilmiştir. Bunu “%50 beton-%100 açık” senaryosunda elde edilen 2.64 sn.’lik EDT değeri takip etmiştir. 4000 Hz’de ise en yüksek EDT değeri “%50 beton-%100 açık” senaryosunda 1.89 sn. olarak elde edilmiş, ikinci sırada “%35 beton-%100 açık” senaryosunda elde edilen 1.88 sn.’lik değer yer almıştır. 8000 Hz’de elde edilen değerlerde belirgin bir fark ortaya çıkmamıştır.

Düşük frekans bölgesine ait tüm senaryolar genelinde, beton malzeme kullanılan durumlarda elde edilen EDT değerlerinin diğer malzeme türlerine kıyasla daha yüksek sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Özellikle, T30 değerlerinden farklı olarak açıklık oranı arttıkça EDT değerlerinde de artış meydana geldiği dikkat çekmektedir.

ISO 3382-1:2009 standardına göre EDT parametresi için fark edilebilir değişim sınırı 5% (JND) olarak tanımlanmıştır. Mevcut senaryonun 2000 Hz için 2.04 sn, 4000 Hz için 1.68 sn ve 8000 Hz için 0.95 sn olan EDT değerleri dikkate alındığında, bu değerlerin 5% üzerinde ya da altında kalan senaryolarda elde edilen yankı süreleri, insan kulağı tarafından algılanabilecek düzeyde farklılık göstermektedir. 2000 Hz’de Tablo 39’da belirtilen “%35 beton-%100 açık” senaryosundan elde edilen değer üzerindeki senaryolarda, yankılanma dinleyici tarafından fark edilebilir düzeyde artmaktadır. 4000 Hz ve 8000 Hz frekanslarında elde edilen EDT değerlerinde, mevcut senaryo ve diğer senaryolar arasında dinleyici tarafından fark edilebilecek düzeyde belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir.

Birleştirilmiş hacim senaryolarının simülasyonları sonucunda elde edilen yüksek frekans bölgesine (2000-8000 Hz) ait EDT değerleri, her oktav bant frekans için en yüksekten en düşüğe doğru sıralanmış ve bu sıralamalar Tablo 39’da sunulmuştur.

Tablo 39. Yüksek frekans bölgesindeki EDT değerlerinin büyükten küçüğe sıralanması

	2000 Hz		4000 Hz		8000 Hz	
1.	%50 Alçıpan %100 açık	2.67	%50 Beton %100 açık	1.89	%20 Beton %100 açık	0.96
2.	%50 Beton %100 açık	2.64	%35 Beton %100 açık	1.88	Mevcut	0.95
3.	%35 Alçıpan %100 açık	2.59	%50 Alçıpan %100 açık	1.87	%20 Alçıpan %75 açık	0.95
4.	%35 Beton %100 açık	2.56	%35 Alçıpan %100 açık	1.85	%20 Alçıpan %100 açık	0.95
5.	%50 Alçıpan %75 açık	2.53	%20 Beton %100 açık	1.83	%20 Beton %75 açık	0.95
6.	%35 Alçıpan %75 açık	2.51	%35 Beton %75 açık	1.83	%20 Ahşap %75 açık	0.94
7.	%50 Beton %75 açık	2.51	%20 Beton %75 açık	1.82	%20 Ahşap %100 açık	0.94
8.	%35 Beton %75 açık	2.48	%20 Alçıpan %100 açık	1.81	%20 Alçıpan %50 açık	0.94
9.	%20 Alçıpan %100 açık	2.38	%35 Alçıpan %75 açık	1.81	%20 Beton %50 açık	0.94
10.	%20 Beton %100 açık	2.36	%50 Beton %75 açık	1.81	%35 Alçıpan %100 açık	0.94
11.	%20 Alçıpan %75 açık	2.35	%20 Alçıpan %75 açık	1.8	%35 Beton %100 açık	0.94
12.	%20 Beton %75 açık	2.34	%50 Alçıpan %75 açık	1.79	%50 Alçıpan %100 açık	0.94
13.	%35 Alçıpan %50 açık	2.32	%20 Beton %50 açık	1.78	%50 Beton %100 açık	0.94
14.	%35 Beton %50 açık	2.32	%35 Ahşap %100 açık	1.77	%20 Ahşap %50 açık	0.93
15.	%50 Alçıpan %50 açık	2.31	%50 Ahşap %100 açık	1.77	%35 Ahşap %100 açık	0.93
16.	%50 Beton %50 açık	2.31	%20 Ahşap %100 açık	1.76	%35 Alçıpan %50 açık	0.93
17.	%20 Alçıpan %50 açık	2.28	%20 Alçıpan %50 açık	1.76	%35 Alçıpan %75 açık	0.93
18.	%20 Beton %50 açık	2.27	%35 Beton %50 açık	1.75	%35 Beton %50 açık	0.93
19.	%50 Ahşap %100 açık	2.27	%20 Ahşap %75 açık	1.73	%35 Beton %75 açık	0.93
20.	%35 Ahşap %100 açık	2.24	%35 Ahşap %75 açık	1.73	%50 Alçıpan %75 açık	0.93
21.	%35 Ahşap %75 açık	2.18	%35 Alçıpan %50 açık	1.73	%50 Beton %75 açık	0.93
22.	%50 Ahşap %75 açık	2.18	%20 Ahşap %50 açık	1.72	%20 Ahşap %25 açık	0.92
23.	%20 Ahşap %100 açık	2.17	%20 Beton %25 açık	1.72	%20 Alçıpan %25 açık	0.92
24.	%20 Alçıpan %25 açık	2.17	%50 Ahşap %75 açık	1.72	%20 Beton %25 açık	0.92
25.	%20 Beton %25 açık	2.17	%50 Beton %50 açık	1.72	%35 Ahşap %50 açık	0.92
26.	%35 Alçıpan %25 açık	2.14	%20 Alçıpan %25 açık	1.71	%35 Ahşap %75 açık	0.92
27.	%35 Beton %25 açık	2.14	%50 Alçıpan %50 açık	1.71	%50 Ahşap %75 açık	0.92
28.	%20 Ahşap %75 açık	2.13	%35 Ahşap %50 açık	1.69	%50 Ahşap %100 açık	0.92
29.	%50 Alçıpan %25 açık	2.11	Mevcut	1.68	%50 Alçıpan %50 açık	0.92
30.	%20 Ahşap %50 açık	2.1	%20 Ahşap %25 açık	1.68	%35 Ahşap %25 açık	0.91
31.	%35 Ahşap %50 açık	2.09	%35 Alçıpan %25 açık	1.67	%35 Alçıpan %25 açık	0.91
32.	%50 Beton %25 açık	2.09	%35 Beton %25 açık	1.67	%35 Beton %25 açık	0.91
33.	%50 Ahşap %50 açık	2.07	%50 Ahşap %50 açık	1.66	%50 Ahşap %50 açık	0.91
34.	%20 Ahşap %25 açık	2.05	%50 Alçıpan %25 açık	1.65	%50 Beton %50 açık	0.91
35.	Mevcut	2.04	%50 Beton %25 açık	1.65	%50 Ahşap %25 açık	0.9
36.	%35 Ahşap %25 açık	2.01	%35 Ahşap %25 açık	1.64	%50 Alçıpan %25 açık	0.9
37.	%50 Ahşap %25 açık	1.99	%50 Ahşap %25 açık	1.63	%50 Beton %25 açık	0.9

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışması, modern konser salonlarının akustik performansının karmaşık dinamiklerini, özelde Münih'teki Isarphilharmonie Konser Salonu örneği üzerinden derinlemesine incelemiştir. Temel amaç, dinleyici doluluk oranlarının ve birleştirilmiş hacim uygulamalarının mekansal akustik kalite üzerindeki çok yönlü etkilerini belirlemektir. Çalışma kapsamında T30 (Reverberasyon Süresi), EDT (Erken Düşme Süresi), C80 (Netlik), D50 (Ayırt Edilebilirlik), LF80 (Erken Yanal Enerji Oranı), STI (Ses İletim İndeksi), BR (Bas Oranı) ve TR (Tiz Oranı) gibi objektif akustik parametreler, ODEON V.10 simülasyon programı aracılığıyla elde edilmiş ve bu veriler, uluslararası standartlar (ISO 3382-1:2009 gibi) ve akustik alanındaki otoriteler tarafından önerilen optimum değer aralıklarıyla karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde incelenen doluluk oranı senaryolarına (boş, %50, %75 ve %100 doluluk) göre, dinleyicilerin salonun en önemli ses yutucu yüzeyini oluşturması nedeniyle akustik performansı doğrudan etkilediği görülmüştür. Konser salonları için genel olarak önerilen optimum T30 değer aralıkları, mevcut durum (boş salon) ve %50 doluluk oranına sahip senaryolarda aşıldığı, ancak %75 ve %100 doluluk oranlarında önerilen aralıklarla uyum sağladığı tespit edilmiştir. EDT değerleri de T30 değerlerine benzer şekilde, doluluk oranının artmasıyla birlikte tüm frekans bantlarında azalma eğilimi göstermiştir. Organ müziği ve senfoni gibi uzun reverberasyon süresi gerektiren türlerde T30 ve EDT değerleri optimum aralıkların altında kalmıştır. Buna karşılık, klasik Türk müziği için önerilen EDT aralıklarının üzerinde değerlere ulaşılmıştır. Klasik ve modern müzik türlerinde ise doluluk oranındaki artışa rağmen EDT değerleri önerilen optimum aralıklar içinde kalmıştır. C80 ve D50 değerleri, tüm doluluk senaryolarında ve orta frekans bandında önerilen optimum aralıkları karşılamıştır. D50 değerleri, doluluk oranı arttıkça tüm frekanslarda artış göstermiştir. STI parametresi açısından elde edilen değerlerin 0.48 ile 0.54 arasında değiştiği ve bu aralığın salon genelinde konuşmanın anlaşılabilirliği bakımından "orta" düzeyde bir performansa işaret ettiği tespit edilmiştir. Doluluk oranının artması STI değerlerinde de artışa neden olmuştur. LF80 parametresi, orta frekans bandında ISO 3382-1 standardında belirtilen optimum değer aralıklarını karşılamış ve tüm senaryolarda değerler birbirine oldukça yakın bulunmuştur. Bu durum, LF80 parametresinin doluluk oranından anlamlı düzeyde etkilenmediğini göstermektedir. Farklı doluluk oranlarına göre elde edilen

BR değerleri önerilen optimum aralıkları karşılamıştır. TR değerleri ise 2000 Hz'deki verilerle hesaplanan sonuçlarda önerilen 0.9 eşik değerinin üzerinde elde edilmişken, 4000 Hz'de ise boş salon hariç diğer doluluk durumlarında bu değerin altında kalmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde analiz edilen birleştirilmiş hacim senaryolarında, ana hacme %20, %35 ve %50 oranlarında ek hacimler tanımlanarak, farklı açıklık oranları ve malzeme türlerinin etkileri incelenmiştir. Birleştirilmiş hacim eklenmesiyle T30 değerlerinde belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Özellikle beton malzeme kullanılan ve düşük açıklık oranına sahip senaryolarda en yüksek T30 değerleri elde edilmiştir. EDT değerlerinde de benzer şekilde, beton malzeme kullanılan senaryolarda, özellikle %100 açıklık oranında en yüksek EDT değerleri elde edilmiştir. C80 ve D50 değerleri üzerinde birleştirilmiş hacim uygulamalarından elde edilen değerlerin mevcut duruma göre, ISO 3382-1 standardında belirtilen 5%'lik fark edilebilirlik eşiğinin (JND) altında bir değişim yarattığı tespit edilmiştir. Bu durum, bu parametrelerde algılanabilir düzeyde bir farklılık oluşmadığını göstermektedir. Tüm birleştirilmiş hacim senaryolarında STI değerleri "orta" düzeyde kalmıştır. BR değerleri ahşap ve alçıpan kullanılan senaryolarda optimum aralıkların altında kalırken, beton kullanılan senaryolarda çoğunlukla sağlanmıştır. TR değerleri 2000 Hz'de çoğunlukla optimumun üzerinde kalırken, 4000 Hz'de özellikle beton kullanılan senaryolarda optimumun altında kalmıştır.

Çalışmanın son aşamasında, birleştirilmiş hacim senaryolarının genel değerlendirmesi T30 ve EDT parametreleri üzerinden, geniş bir frekans aralığında (63 Hz – 8000 Hz) detaylı bir analizle yapılmıştır. Her frekans için elde edilen değerlerin mevcut duruma göre ISO 3382-1:2009 standardında belirtilen 5%'lik fark edilebilir değişim (JND) kriteri doğrultusunda yorumlandığında, bazı senaryolarda insan kulağı tarafından algılanabilecek düzeyde değişiklikler olup olmadığı sorgulanmıştır. Önceki çalışmalar (Bradley ve Wang, 2006; Ermann, 2006) T30 değerleri doğrultusunda çift eğimli sönümleme ve uzun reverberasyon sürelerinin salon akustiğini zenginleştirdiğini belirtmiştir. Bu tez kapsamında elde edilen T30 ve C80 parametrelerine ait sayısal veriler ve sesin davranışına ilişkin gözlemler, literatürdeki bu çalışmalarla örtüşmektedir. Ancak, Harrison, Madaras ve Celmer (2001) ve Bradley ve Wang (2005) tarafından yapılan çalışmalarda, hacim ve açıklık artışına bağlı olarak algılanan yankılanmanın arttığı belirtilmişken, algılanan netliğin bu değişkenlere bağlı olmadığı ve anlamlı bir farklılık göstermediği sonucuna ulaşılmıştır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen frekansa bağlı analizlerde ise, değişimin yalnızca hacim ve açıklık gibi geometrik parametrelerle sınırlı olmadığı, aynı zamanda birleştirilmiş hacim

içerisinde kullanılan malzeme türünün de algısal değişim üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Özellikle düşük frekanslarda (63 Hz) beton malzeme kullanılan tüm açıklık ve hacim kombinasyonları mevcut duruma göre fark edilebilir düzeyde değişime neden olmuştur. Orta frekansların (500-1000 Hz) kullanılan hacim, açıklık oranı ve malzeme türü gibi değişkenlere, düşük frekanslara kıyasla daha duyarlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle 1000 Hz'in yapılan değişimlerden en çok etkilenen frekans olduğu sonucuna varılmıştır. Düşük ve yüksek frekanslarda ise algısal farklılıklar daha az belirgindir. Bu durum, frekansa dayalı değerlendirme yaklaşımının, algısal farklılıkları daha hassas bir şekilde ortaya koyduğunu göstermektedir.

EDT değerlerinin JND üzerinden değerlendirilmesine ilişkin elde edilen veriler, düşük frekans bölgesinde; özellikle beton malzemenin kullanıldığı, yüksek hacimli ve yüksek açıklığa sahip senaryolarda fark edilebilir düzeyde değişikliklerin meydana geldiğini belirlemiştir. Orta frekans bandında, 500 Hz özelinde yapılan değerlendirmelerde algılanabilir değişimlerin büyük oranda beton malzeme kullanılan senaryolarda yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. 1000 Hz'de ise yüksek hacim ve yüksek açıklık oranının algısal farklılıklar üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. 2000 Hz'de, algılanabilir farklar özellikle yüksek açıklık oranına sahip, %35 ve %50 oranında birleştirilmiş hacimli beton ve alçıpan kullanılan senaryolarda ortaya çıkmıştır. 4000 Hz ve 8000 Hz'de ise mevcut durumla kıyaslandığında fark edilebilir düzeyde bir değişim saptanmamıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma, konser salonlarında birleştirilmiş hacim uygulamalarının akustik performansa etkilerini frekans bazında ve algısal eşikler doğrultusunda detaylı bir şekilde ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, akustik tasarımda sadece hacim ve açıklık oranlarının değil, aynı zamanda malzeme seçiminin de kritik bir rol oynadığını ve bu parametrelerin etkileşiminin karmaşık akustik ortamları şekillendirmede belirleyici olduğunu vurgulamıştır.

5. ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, bir konser salonu modeli üzerinden farklı hacim, açıklık oranı ve malzeme kombinasyonlarının akustik parametreler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Yapılan çalışma doğrultusunda, ileride gerçekleştirilebilecek araştırmalara katkı sağlayabilecek aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

- Farklı salon tiplerinin incelenmesi: Bu çalışmada yalnızca bir konser salonu modeli temel alınmıştır. Gelecek çalışmalarda tiyatro, opera, çok amaçlı salon gibi farklı işlevlere sahip mekan tiplerinde benzer yöntemlerin uygulanması, elde edilen bulguların genellenebilirliğini artıracaktır.
- Çift eğimli sönümleme eğrilerinin kapsamlı olarak incelenmesi: Bazı senaryolarda gözlemlenen çift eğimli sönümleme eğrileri, reverberasyon süresinin doğrusal olmayan bir biçimde dağıldığını göstermektedir. Bu durumun daha detaylı analiz edilmesi, özellikle EDT ve T30 parametreleri arasındaki ilişkinin daha sağlıklı biçimde yorumlanmasına katkı sağlayacaktır.
- İşitsel algıya yönelik dinleme testlerinin gerçekleştirilmesi: Çalışmanın son bölümünde JND temelli yapılan değerlendirmede, her frekans için algılanabilir eşikler tanımlanmış ve bazı senaryolarda bu eşiklerin aşıldığı tespit edilmiştir. Yapılacak çalışmalarda, dinleyiciler tarafından farklı senaryoların ve senaryo kombinasyonlarının tercih edilme durumu, dinleme testleri ve anket uygulamaları ile desteklenerek daha bütüncül şekilde değerlendirilebilir.
- Parametreler arası ilişkilerin modellenmesi: Tek hacimli sistemler için literatürde önerilen formülizasyonların, çift hacimli sistemlerde geçerliliğini test etmek amacıyla yeniden ele alınması ve bu sistemlere özgü yeni bağıntıların geliştirilmesi, bu konuda yapılacak çalışmalara katkı sağlayacaktır.
- Müzik türlerine göre salon akustiğinde optimizasyon yaklaşımları: Bu çalışmada, literatürde farklı müzik türleri için önerilen optimum değer aralıkları ile oluşturulan senaryolar karşılaştırılmıştır. Gelecek çalışmalarda, her bir müzik türü için optimum akustik koşulları sağlayabilecek hacim yapılarına yönelik deneysel modellerin geliştirilmesi önerilmektedir. Bu sayede, müzik türüne özel gereksinimleri karşılayan, daha hedef odaklı ve işlevsel tasarım yaklaşımlarının oluşturulması mümkün olacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Abdülrahimov, R. (2005). *Salonların Akustiği Ve Tasarımı*. Trabzon.
- Adelman-Larsen, N. W. (2010). Suitable reverberation times for halls for rock and pop music. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(1), 247–255. doi: <https://doi.org/10.1121/1.3263611>
- Ahnert, D. W., & Tennhardt. (2008). G. Ballou içinde, *Handbook for Sound Engineers* (4th edition b.). Focal Press.
- Ahnert, W., & Schmidt, S. (n.d.). *EASERA Manual Appendix: Electronic and Acoustic System Evaluation and Response Analysis*.
- AIA Wisconsin. (2022, Ağustos 19). *University of Wisconsin–Madison Hamel Music Center*. Aralık 05, 2023 tarihinde Wisconsin Architect: <https://wisconsinarchitect.org/project/university-of-wisconsin-madison-hamel-music-center/> adresinden alındı
- Aksu, F. (2014, Ocak 27). *Heydar Aliyev Kültür Merkezi*. Mart 15, 2025 tarihinde Arkitera: <https://www.arkitera.com/proje/heydar-aliyev-kultur-merkezi/> adresinden alındı
- Arau, H. (1999). *ABC de la Acoustica Architectonica*. Barcelona: Ediciones CEAS.
- ArchDaily. (2013, Kasım 4). *Heydar Aliyev Center / Zaha Hadid Architects*. Mart 12, 2025 tarihinde ArchDaily: <https://www.archdaily.com/448774/heydar-aliyev-center-zaha-hadid-architects> adresinden alındı
- Aspöck, L., & Vorländer, M. (2019). Simulation of a coupled room scenario based on geometrical acoustics simulation models. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 36. doi:10.1121/2.0001041
- Atelier Crescendo. (2021, Ağustos 4). *Variable sound absorption systems*. Mart 10, 2025 tarihinde ateliercrescendo.ac: <https://ateliercrescendo.ac/variable-sound-absorption-systems/> adresinden alındı
- Aykol, E. (1986). Eğitsel iletişim ortamlarında, ses boyutu ve akustiğin işlevi. Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Barron, M. (1993). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. E & FN Spon.
- Barron, M. (2010). *Auditorium Acoustics and Architectural Design* (2. b.). Taylor & Francis.
- Barron, 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(2), 211-232. doi:10.1016/S0022-460X(81)80020-X

- Beckhoff Automation. (2011). World class concert acoustics with Beckhoff automation technology. *PC Control*(4), 20-21.
- Beranek, L. (1996). *Acoustics* .
- Beranek, L. (1996). *Concert and opera halls: How they sound*. Cambridge, MA: Acoustical Society of America. <https://archive.org/details/concertoperahall0000bera adresinden alindi>
- Beranek, L. (2004). *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture* (Second edition b.). Springer. doi:10.1007/978-0-387-21636-2
- Bilmez, D., & Arpacioğlu, Ü. (2022). Classification of architectural acoustic materials. Ü. Arpacioğlu, Ş. Ertuş Beşir, & İ. Gül içinde, *Architectural sciences and building materials* (s. 173–205). Ankara: Iksad Publications. https://www.researchgate.net/publication/386049408_Classification_of_Architectural_Acoustic_Materials adresinden alindi
- Bistafa, S. R., & Bradley, J. S. (2000). Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(2), 861-875. doi:10.1121/1.428268
- Bork, I. (2000). A Comparison of Room Simulation Software – The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation. *Acustica*, 86(6), 943–956.
- Bradley, D. T. (2006). *Analysis of Parameter Effects on Sound Energy Decay in Coupled Volume Systems*. University of Nebraska.
- Bradley, D. T., & Wang, L. M. (2005). The effects of simple coupled volume geometry on the objective and subjective results from nonexponential decay. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(3), 1480-1490. doi:<https://doi.org/10.1121/1.1984892>
- Bradley, D. T., & Wang, L. M. (2006). Room acoustics in coupled volume spaces. *AEI 2006: Building Integration Solutions – Proceedings of the 2006 Architectural Engineering National Conference* (s. 24). American Society of Civil Engineers (ASCE). doi:[https://doi.org/10.1061/40798\(190\)24](https://doi.org/10.1061/40798(190)24)
- Bradley, D. T., & Wang, L. M. (2007). Comparison of measured and computer-modeled objective parameters for an existing coupled volume concert hall. *Acta Acustica united with Acustica*, 93(2), 292-300.
- Bradley, D. T., & Wang, L. M. (2010). Optimum absorption and aperture parameters for realistic coupled volume spaces determined from computational analysis and subjective testing results. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(1), 223-232. doi:10.1121/1.3268604
- Brown, P. (2008). Fundamental of audio and acoustics. G. Ballou içinde, *Handbook for sound engineers* (4. baskı b., s. 21-39). Focal Press.

- CE's Mimarlık. (n.d.). *Akustik nedir?* Şubat 15, 2025 tarihinde CE's Mimarlık: <https://cesmimarlik.com/akustik-nedir/> adresinden alındı
- Christensen, C. L., & Koutsouris, G. (2013). ODEON12 user manual: Basics, industrial, auditorium and combined editions. Odeon A/S. <https://odeon.dk/download/Version18/OdeonManual.pdf> adresinden alındı
- Commission, I. E. (2011). *IEC 60268-16: Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*.
- Commission, I. E. (2011). *Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*. IEC 60268-16:2011, International Electrotechnical Commission.
- Cowan, J. (2000). *Architectural acoustics design guide*. McGraw-Hill.
- Dallas Symphony. (n.d.). *Concert Hall Rentals*. Aralık 11, 2023 tarihinde Dallas Symphony: <https://www.dallasymphony.org/concert-hall-rentals/> adresinden alındı
- Dükkan Hifi. (n.d.). *Artnovion Skyros ayarlanabilir sönümleyici/emici*. Mayıs 22, 2025 tarihinde Dükkan Hifi: <https://dukkanhifi.com/artnovion-skyros-ayarlanabilir-sonumleyici-emici> adresinden alındı
- Egan, M. D. (2007). *Architectural Acoustics*.
- Ermann, M. (2005). Coupled Volumes: Secondary Room Reverberance and the Double-Sloped Decay of Concert Halls. *Journal of Building Acoustics*, 12.
- Ermann, M. (2006). *Coupled volume research compendium: Five sensitivities of a coupled volume concert hall*. Technical report, Virginia Tech School of Architecture + Design. <https://static1.squarespace.com/static/5784f6e4cd0f68f8a73e3608/t/578538cce58c62124553d3d5/1468418815526/Coupled+volume+research+compendium.pdf> adresinden alındı
- Ermann, M. (2007). Double sloped decay: Subjective listening test to determine perceptibility and preference. *Building Acoustics*, 14(2), 79-94. doi:10.1260/135101007781448055
- Ermann, M., & Johnson, M. (2005). Exposure and materiality of the secondary room and its impact on the impulse response of coupled-volume concert halls. *Journal of Sound and Vibration*, 284(3-5), 915-931. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.07.030>
- Esch, H. G. (2021). *Gasteig HP8 – Isarphilharmonie*. 11 01, 2024 tarihinde gmp Architekten von Gerkan, Marg und Partner: <https://www.gmp.de/en/projects/3237/gasteig-hp8-isarphilharmonie> adresinden alındı
- Esch, H. G. (n.d.). *Die Halle E im Gasteig HP8*. Gasteig München GmbH: <https://www.gasteig.de/pressefotos/die-halle-e-im-gasteig-hp8/> adresinden alındı
- Everest, A., & Pohlmann, K. (2022). *Master handbook of acoustics* (7th b.). McGraw-Hill.

- Figueiredo, F. L., & Iazzetta, F. (2005). Comparative study of measured acoustic parameters in concert halls in the city of Sao Paulo. *Inter-Noise 2005: International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*. Rio de Janeiro.
- Fizik Dersi. (n.d.). *Dalgalar: Dalga hareketi çeşitleri*. Şubat 21, 2025 tarihinde Fizik Dersi: <https://fizikdersi.gen.tr/dalgalar-dalga-hareketi-cesitleri/> adresinden alındı
- Furuto, A. (2011, Ağustos 25). *Busan Metropolitan Opera House Competition Proposal / INDEX Architecture*. Mart 11, 2025 tarihinde ArchDaily: https://www.archdaily.com/163161/busan-metropolitan-opera-house-competition-proposal-index-architecture/bu_se_2 adresinden alındı
- Gade, A. C. (2014). Acoustics in halls for speech and music. T. D. Rossing içinde, *Springer handbook of acoustics* (s. 317-366). New York, United States: Springer. doi:10.1007/978-1-4939-0755-7
- Gade, A. C. (tarih yok). Investigations of Musicians' Room-Acoustic Conditions in Concert Halls. 1989 içinde, *Acustica* (Cilt 69(5), s. 193–203). Stuttgart: S. Hirzel Verlag.
- Gasteig. (n.d.). *Your event in the Isarphilharmonie – Technical details and plans*. Mart 17, 2025 tarihinde Gasteig: <https://www.gasteig.de/en/your-event-in-the-isarphilharmonie/#technical-details-and-plans> adresinden alındı
- Gewerbemuseum, T. (2012). *Expert opinion regarding the sound absorption properties of “Cross Laminated Timber – Elements”*. Staatliche Versuchsanstalt für Akustik und Bauphysik.
- GMP Architekten. (2021). *Gasteig HP8 – Isarphilharmonie*. 11 01, 2024 tarihinde gmp Architekten von Gerkan, Marg und Partner: <https://www.gmp.de/en/projects/3237/gasteig-hp8-isarphilharmonie> adresinden alındı
- Gooood. (n.d.). *Harpa concert and conference centre*. Aralık 11, 2023 tarihinde Gooood: <https://www.gooood.cn/harpa-concert-conference.htm> adresinden alındı
- Harrison, B. W., Madaras, G., & Celmer, R. D. (2001). Computer modeling and prediction in the design of coupled volumes for a 1000-seat concert hall at Goshen College, Indiana. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109(5_Supplement). doi:<https://doi.org/10.1121/1.4744419>
- Hidaka, T., & Nishihara, N. (2022). Favorable reverberation time in concert halls revisited for piano and violin solos. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 151(3). doi:10.1121/10.0009931
- Holden, M. (2016). *Acoustics of multi-use performing arts centers* (1st edition b.). CRC Press.
- Houtgast, T., Steeneken, H. J., & Plomp, R. (1980). Predicting speech intelligibility in rooms from the modulation transfer function. I. General room acoustics. *Acta Acustica*, 46, 60–72.

- Höhne, R. &. (1995). Zur Wahrnehmbarkeit von Deutlichkeits- und Durchsichtigkeitsunterschieden in Zuhörersälen. *Acta Acustica united with Acustica*, 81(4), 309–319.
- Hyon, J., & Jeong, D. (2021). Variable acoustics in performance venues – A review. *Journal of the Acoustical Society of Korea*, 40(6), 626-648. doi:10.7776/ASK.2021.40.6.626
- IEC-60268-16-2011. (2004). *Ergonomics—Assessment of speech communication*. International Organization for Standardization.
- İlban, B. (2022). *Doğu Karadeniz bölgesindeki dikdörtgen planlı camilerin tasarımında akustik performansın belirlenmesi üzerine yeni bir yaklaşım*. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık ABD, Trabzon.
- Inacio, O. (2022, Nisan 2). *Fundamentals of Room Acoustic*. Arau Acustica: https://www.arauacustica.com/files/publicaciones_relacionados/pdf_esp_175.pdf adresinden alındı
- ISO 3382-1. (2009). *ISO 3382-1:2009. Acoustics – Measurement of Room Acoustic Parameters – Part 1: Performance Spaces*. International Organization for Standardization, Geneva.
- Johnson, R., & Kahle, E. (1999). The new Konzertsaal of the KKL Center, Lucerne, Switzerland. I. Acoustics design. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105(2), 928-928.
- Johnson, R., & Kahle, E. (1999). The new Konzertsaal of the KKL Center, Lucerne, Switzerland. I. Acoustics design. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105(2), 928. doi:10.1121/1.426303
- Jurkiewicz, Y., Kahle, E., & Katz, B. F. (2015). Stavanger Concert Hall, acoustic design and measurement results. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 37, s. 300-3007. <https://hal.science/hal-01789764> adresinden alındı
- Kahle Acoustics. (2006). *Section on Concert Hall Only: Acoustic Brief*. Kahle Acoustics.
- Kahle Acoustics. (n.d.). *KKL Luzern*. Aralık 11, 2023 tarihinde Kahle Acoustics: <https://kahle.be/en/ref/kklLuzern--.html#d> adresinden alındı
- KKL Luzern Business. (n.d.). *Architecture & Acoustics*. KKL Luzern Business: <https://business.kkl-luzern.ch/en/about-us/architecture-acoustics> adresinden alındı
- Kucharek, J.-C. (2022, Haziran 20). *Flanagan Lawrence and Idibri on making University of St Andrews' hall of 'tuneable' acoustics*. Aralık 20, 2023 tarihinde RIBA Journal: <https://www.ribaj.com/intelligence/flanagan-lawrence-laidlaw-music-centre-st-andrews-university-scotland-idibri> adresinden alındı
- Kurtulan, F. (2009). *M.S.G.S.Ü. Sedat Hakkı Eldem Oditoryumunun hacim akustiği açısından incelenmesi ve değerlendirilmesi*. Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Kuttruff, H. (2001). *Room Acoustics* (4. baskı b.). Spon Press.
- Kuttruff, H. (2017). *Room Acoustics* (6 b.). Boca Raton: CRC Press.
doi:10.1201/9781315372150
- Larsen, H. (n.d.). *Harpa Concert Hall and Conference Center*. Aralık 11, 2023 tarihinde Henning Larsen: <https://henninglarsen.com/en/projects/featured/0676-harpa-concert-hall-and-conference-center> adresinden alındı
- Lindsay, R. B. (1968). Acoustics and its teaching. *Physics Education*, 3(2), 62-66.
- Live Sound. (n.d.). *Akustyka budowlana: Sale świata – Sibelius Hall*. Aralık 12, 2023 tarihinde Live Sound: <https://livesound.pl/tutoriale/5316-akustyka-budowlana-sale-swiate-sibelius-hall/5316/9197> adresinden alındı
- Long, M. (2006). *Architectural Acoustics*. Elsevier Academic Press.
- Luizard, P., Katz, B. F., & Guastavino, C. (2015). Perceived suitability of reverberation in large coupled volume concert halls. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, 25(3), 258-269. doi:10.1037/pmu0000109
- Maekawa, Z., Rindel, J. H., & Lord, P. (2011). *Environmental and Architectural Acoustics* (2. b.). Spon Press.
- Magazine, A. (2013, Mart 20). *KKL Luzern Concert Hall*. Kasım 28, 2023 tarihinde Architect Magazine: <https://www.architectmagazine.com/project-gallery/kkl-luzern-concert-hall#:~:text=The%20Concert%20Hall%20itself%20has,3%20of%20the%20hall's%20volume!> adresinden alındı
- Maiorino, A., & Bertoli, R. (2016). Double slope decay rooms: The influence of coupling aperture location on reverberation according to seat location. *Proceedings of the International Symposium on Musical and Room Acoustics (ISMRA)*. Buenos Aires, Argentina.
- Mead Witter School of Music. (n.d.). *Facilities*. Aralık 05, 2023 tarihinde Mead Witter School of Music: <https://music.wisc.edu/facilities/> adresinden alındı
- Mehta, M., Johnson, J., & Rocafort, J. (1999). *Architectural Acoustics*.
- Nagata Acoustics. (2021). *Isarphilharmonie at Gasteig HP8: Acoustical design and performance data*. Gasteig München GmbH.
- Notation, A. (2022). *Acoustical analysis of coupled spaces based on spatial parameters*. Rensselaer Polytechnic Institute.
<https://search.proquest.com/openview/6f75b83c0c3cdb5677bf6cb4591c2d61>
adresinden alındı
- Özçevik, A. (2015). Room Acoustics Evaluation of the Rooms Used for Turkish Melodic Music. *MEGARON / Yıldız Technical University, Faculty of Architecture E-Journal*, 10(3), 397–408. doi:doi.org/10.5505/megaron.2015.02986

- Öziş, F., & Vergili, S. (2010). Dinleyici-orkestra-müzişyen perspektifinde konser salonlarının akustik tasarım parametreleri. *Sanat Dergisi*, 35-41.
- Patel, R. (2019). *Architectural acoustics: A guide to integrated thinking*.
- Roloff, S. (2021, Ocak 28). Need for a Modern Facility. *STRUCTURE Magazine*, 28(1), s. 18-20.
- Sabine, W. C. (1964). *Collected papers on acoustics*. Dover Publications.
- Sala São Paulo. (n.d.). *Sala São Paulo – Acústica*. Mart 11, 2025 tarihinde Sala São Paulo: <https://salasaopaulo.com.br/salasp/en/sobre/sala-sao-paulo-acustica> adresinden alındı
- Schoof, J. (2021, Ekim 8). *Too good to throw away: Isarphilharmonie in Munich by Gmp Architekten*. Mart 17, 2025 tarihinde Detail Magazine: https://www.detail.de/de_en/too-good-to-throw-away-isarphilharmonie-in-munich-by-gmp-architekten adresinden alındı
- Sibelius Hall. (n.d.). *Sibelius Hall*. Mart 12, 2025 tarihinde Sibelius Hall: <https://www.sibeliustalo.fi/sibelius-hall/?lang=en> adresinden alındı
- Siebein, W. G., & Gold, M. A. (1997). Designing the Concert Hall of the 21st Century: Historic Precedent and Virtual Reality. *Architecture: Material and Imagined*, 52–61.
- Square Yards. (n.d.). *Harpa Concert Hall: A beacon of architecture and art*. Aralık 11, 2023 tarihinde Square Yards: <https://www.squareyards.com/blog/harpa-concert-hall> adresinden alındı
- Steeneken, H. J., & Houtgast, T. (2014). *Basics of the STI measuring method*. TNO Human Factors.
- Storch, C., & Tocci, C. (2004). Acoustics considerations in the construction of Sibelius Hall. *8th World Conference on Timber Engineering*, (s. 19–26).
- Studio, S. (n.d.). *The sound environment*. (S. F. University, Prodükör) Nisan 19, 2025 tarihinde <https://www.sfu.ca/sonic-studio-webdav/cmns/Handbook%20Tutorial/Sound-Environment.html> adresinden alındı
- Sü Gül, Z. (2019). *Bağlaşık ses alanlarında çoklu sönümleme eğrileri analiz yöntemleri*. Diyarbakır, Turkey: Proceedings of the 13th National Acoustics Congress (TAKDER).
- Sü, Z. (2006). *Systematic investigations on energy decays in acoustically coupled spaces using the scale-model technique [Master's thesis, Rensselaer Polytechnic Institute]*. Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY. <https://www.researchgate.net/publication/336116214> adresinden alındı
- Sü-Gül, Z., & Çalışkan, M. (2010). Acoustical Considerations in the Design of Heydar Aliyev Center Auditorium. *International Symposium on Room Acoustics (ISRA*

- 2010). Melbourne, Australia. <https://www.researchgate.net/publication/268326537> adresinden alındı
- Systems, Waagner-Biro Stage. (n.d.). *Harpa*. Aralık 11, 2023 tarihinde Waagner-Biro Stage Systems: <https://www.waagner-biro-stage.com/en/portfolio/harpa-en/> adresinden alındı
- Tijmsma, T. W. (2016). *Low frequency room acoustics in coupled volume rooms*. Eindhoven University of Technology, Eindhoven. <https://pure.tue.nl/ws/files/46934711/845778-1.pdf> adresinden alındı
- Toronto, C., & Kahle, E. (2013). Room acoustical quality of concert halls: Perceptual factors and acoustic criteria – Return from experience. *ISRA 2013 – International Symposium on Room Acoustics*.
- Torun, T. (2019). *An Approach on Determining Optimum Acoustic Conditions for Turkish Classical Music*. Yüksek lisans tezi, Middle East Technical University, Ankara.
- Visit Birmingham. (n.d.). *Symphony Hall*. Mart 12, 2025 tarihinde Visit Birmingham: <https://visitbirmingham.com/listing/symphony-hall/141580101/> adresinden alındı
- Welch, A. (2022, Nisan 9). *Laidlaw Music Centre, University of St Andrews*. Aralık 20, 2023 tarihinde e-architect: <https://www.e-architect.com/scotland/laidlaw-music-centre-university-of-st-andrews> adresinden alındı
- Wikimedia Commons. (2016, Ağustos 28). *Sala São Paulo 20 [Photograph]*. Mart 10, 2025 tarihinde Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sala_S%C3%A3o_Paulo_20.jpg adresinden alındı
- Wikipedia. (2024, Mayıs 28). *Acoustics*. Şubat 21, 2025 tarihinde Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustics> adresinden alındı
- Xiang, N., & Summers, J. E. (2007). *Acoustics in coupled rooms: Modelling and data analysis*. Springer.
- Xiang, N., Escolano, J., Navarro, J. M., & Jing, Y. (2013). Investigation on the effect of aperture sizes and receiver positions in coupled rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(6), 3975-3985. doi:10.1121/1.4802740
- Xiang, N., Goggans, P., Jasa, T., & Robinson, P. (2011). Bayesian characterization of multiple-slope sound energy decays in coupled-volume systems. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(2), 741-752. doi:10.1121/1.3531806
- Yılmaz Demirkale, S. (2007). *Çevre ve Yapı Akustiği*.

ÖZGEÇMİŞ

İlköğrenimini Gökçealan Hasan-Fatma Önal İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2014 yılında Aydın Adnan Menderes Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2015-2016 öğretim yılında Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık bölümünde lisans eğitimine başladı. 2019 yılında bu bölümden mezun oldu. 2021 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı.

