

Müzik Prova Odalarında Açılı Duvarların Oda Frekans Tepkisi Üzerindeki Etkileri: İzmir Devlet Konservatuvarı ve Işıl Saygın Lisesi Örneği

The Effects of Angled Walls on Room Frequency Response in Music Rehearsal Rooms: Izmir State Conservatory and Isilay Saygin High School as a Case Study

Atakan Zerafet, *Güzel Sanatlar Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi*
Serhat Durmaz, *Müzik Bilimleri Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi*

Özet

Konservatuvarlar ve diğer müzik eğitim kurumlarındaki müzik etüt ve prova odalarının akustik bozulmalara karşı çoğunlukla korumasız şekilde tasarlandığı izlenmektedir. Bu tür odaları akustiği konusunda temel ilkelerin belirlendiği NS-8178 ve ardından ISO 23591:2021 standardı, odanın frekans tepkisindeki bozulmalarını önlemek için mimari form özelliklerinden söz eder: Yumuşak alçak frekans tepkisi veren oda oranlarının seçilmesiyle bas frekanslardaki renklendirme etkilerinin kontrolü, yan duvarlarda yapılan en az 7° açılardırma ile orta frekanslardaki flutter echo (FE) sorunlarının önlenmesi. Açılardırma aynı zamanda orta frekanslarda olduğu gibi alçak frekans ses seviyeleri üzerinde de kısmen etkilidir. Literatürde genel görüş, açılardırmanın renklendirme etkilerini azaltmadığı ancak oda içerisindeki basınç dağılımı üzerinde etkili olduğu yönündedir.

Bu çalışmada, hangisinin müzik çalışma odalarının akustiği için daha uygun olduğunu belirlemek adına, aynı oranlara sahip dikdörtgen ve dik yamuk oda modellerindeki frekans tepkileri üzerinde standart sapma değerleri izlenmiştir. Geliştirilen teknikte parametreler, İzmir Devlet Konservatuvarı (İzDK) ve Işıl Saygın Güzel Sanatlar Lisesi (ISGSL) örnek odalarından elde edilen veriler kullanılarak belirlenmiştir. Hacim ve açılardırma ilişkisinin izlenbilmesi amacıyla üç farklı hacim grubu seçilip modellenmiş, Odeon 13'te oda dürtü tepkileri (RIR) üretilmiştir. Aynı oranlara sahip odalardaki açılardırmanın, Schroeder frekansı altındaki değerlerde, aynı modal, temel frekans oluşumları sağladığı izlenmiştir. Schroeder frekansı üzerinde standart sapma değerlerinin hesapları, doğrusal ortalamalı Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT) ile MATLAB 2021a yazılım ortamında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilerden belirli limitler arasındaki sapmalar hesaplanmış, açılardırmadan kaynaklanan frekanslarda yumuşatma etkileri incelenmiştir. Kullanılan istatistiksel yöntem, 500 Hz'e kadar olan bölgede %25 yumuşatma etkisinin mümkün olabileceğini göstermiştir.

Anahtar sözcükler: Oda tepkisi, oda oranları, frekans analizi, açılardırma, prova odaları.

Akademik disiplin(ler)/alan(lar): Oda akustiği, müzik teknolojisi, mimarlık, elektrik ve elektronik mühendisliği.

Abstract

It is observed that the music rehearsal rooms in conservatories and other music education institutions are designed without protection against acoustic distortions. The NS-8178 and later ISO 23591:2021 standard, in which the basic principles of rehearsal room acoustics are set, refer to a number of architectural form features to prevent distortions in the frequency response of the room: Controlling of coloration in low frequencies by choosing room proportions that give a soft low frequency response, and preventing flutter echo (FE) problems at mid frequencies with angulation at least 7° on the lateral walls. Angling also has an effect on low frequency sound levels as it does on mid frequencies. The general view in the literature is that angulation does not reduce the coloration effects, but has an effect on the pressure distribution in the room

In this study, standard deviation values were followed on frequency responses in rectangular and trapezoidal room models with the same proportions, in order to determine which one is more suitable for the acoustics of rehearsal rooms. The parameters were determined using samples taken from the measurements of Izmir State Conservatory (IzDK) and Isilay Saygin Fine Arts High School (ISGSL). In order to research the relationship between volume and angulation, three different volume groups were selected and modeled, and room impulse responses (RIR) were generated in Odeon 13. The data showed that angulations in rooms with the same ratios yield the same modal, fundamental frequency occurrences at values below the Schroeder frequency. Standard deviation calculations on the Schroeder frequency were performed using linear averaging Discrete Fourier Transform (DFT) in MATLAB 2021a environment. Deviations between certain limits were calculated from the obtained data, and the smoothing effects caused by angulation were examined. The statistical method used showed that a 25% smoothing effect could be possible in the region up to 500 Hz.

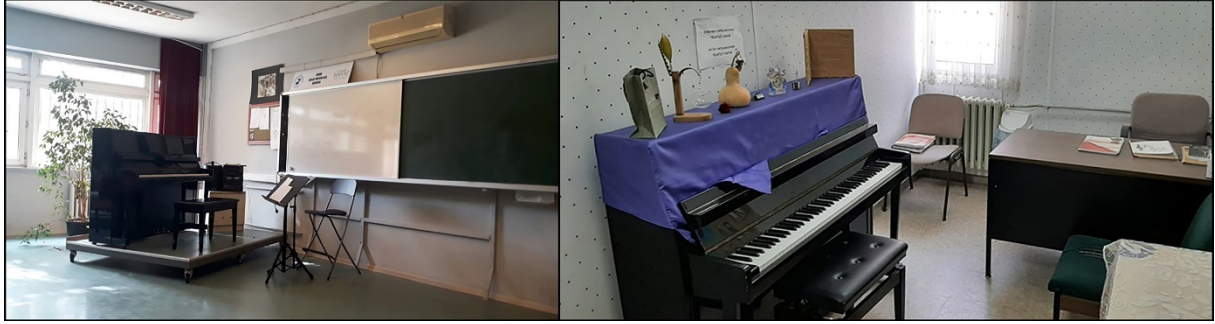
Keywords: RIR, room ratios, frequency analysis, angled wall, rehearsal rooms.

Academical disciplines/fields: Room acoustics, music technology, architecture, electrical and electronics engineering.

- **Sorumlu Yazar:** Serhat Durmaz, Müzik Bilimleri Bölümü, Güzel Sanatlar Fakültesi, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- **Adres:** Dokuz Eylül Üniversitesi, Tınaztepe Yerleşkesi, Adatepe Mah. Doğu Cad. No:209, 35390 Buca, İzmir.
- **e-posta:** serhat.durmaz@deu.edu.tr
- **ORCID:** 0000-0002-9512-6807
- **Çevrimiçi yayın tarihi:** 19.09.2022
- **doi:** 10.17484/yedi.1058256

1. Giriş

Müzik eğitimi veren kurumlarda çalgı veya ses eğitimi alan öğrencilerin kullandığı iki derslik tipi bulunur: Bireysel ya da eğitmen denetimindeki çalgı dersleri ve etüt çalışmaları için kullandıkları etüt odaları, öğrendiklerini arkadaşlarıyla prova yaparak geliştirdikleri, birlikte müzik yaptıkları prova odaları (bkz. Şekil 1). Öğrenciler bu odalarda çalgılarını veya kendi seslerini en doğal hali ile duymalı, müziği hissetmeli, onunla bütünleşmeli, etütlerde yorum ve tını farklılıklarını kavrayıp seslendirmelerinde ustalaşmalı, profesyonel sahne performanslarına bu tür ortamlarda hazırlanmalıdır. Bir müzik etüt veya prova odası (kısaca MEP), müzisyenin yaptığı müziğe istenmeyen/kontrol dışı akustik katkılarda bulunmamalı, seslendirmenin tınısını mekânın akustik davranışına göre farklı şekillere dönüştürmemeli, müziği en doğal şekilde yansıtmalıdır.



Şekil 1. İzmir ISGSL orta hacim ve küçük hacimli şan/piyano prova odaları örneği (A. Zerafet kişisel arşivi, 2022).

Konservatuvarlar ve diğer müzik eğitim kurumlarının proje koşulları gereği EP odaları orantısız, küçük hacimli ve dikdörtgen prizma formunda olabilmektedir. İşitme konforu açısından mekânlara bağlı akustik sorunların pek azı proje aşamasında çözümlenir, pek çok mekân da mevcut sorunlarına rağmen yıllarca hizmet vermeyi sürdürür. Bu tür durumlar müziğin icrasını olumsuz yönde etkilemektedir. Küçük odalarda modlara bağlı enerjilerin etkileriyle alçak frekans bölgesinin ses seviyelerinde belirgin artışlar meydana gelebilir. Paralel duvarlı formlar, çınlamanın olduğu frekans bölgesinde ardı ardına gelen ses tekrarlarına (FE) sebep olabilir. Bütün bunlar istenmeyen akustik etkilerdir ve seslendirici (kaynak) ile eğitmen (alıcı) konumları arasında gidip gelen seslerin renginde, frekanslarında istenmeyen akustik bozulmalara yol açabilir, oda boyutlarına özgü frekanslarda müzikle ilgisi olmayan kısmi enerji artışları oluşabilir, düzensiz ve yumuşak olmayan frekans tepkileri ortaya çıkabilir. Bu noktada, evrensel standartlarla desteklenen ve bu çalışmanın da konusunu oluşturan üç temel akustik değişken dikkati çeker: Oda boyutları, modal frekanslar, frekans tepkisinin yumuşaklığı.

Odeon'un kurucusu J. Holger Rindel, çok sayıda MEP odalarında yapılan akustik tasarım çalışmalarının sonuçlarına dayandırdığı bir dizi detayı NS-8178 (Norwegian Standard, 2014) kapsamında küresel tartışmaya sunmuş, önerileriyle ISO 23591:2021 standardının oluşmasında önemli katkılar sağlamıştı (Rindel, 2015). Rindel'e göre MEP odalarının boyutları ses gücü ve kalitesi adına dikkat gerektiren ilk temel unsurdur. Standartlar, üç farklı müzik prova odası (düşük ses seviyeli, yüksek ses seviyeli, elektronik olarak güçlendirilmiş müzik) işlevlerine yönelik ses gücü (G) ve oda hacmine (V) ilişkin bazı sınırlamalar içermektedir. Küçük hacimli odalar genellikle düşük ses seviyeli bireysel ve/veya oda müziği provaları için kullanıldığından bu hacimlerdeki etkinliklerde yumuşak geçişli, alçak frekanslarda icra edilen müziğin yapısına uygun oda oranlarından birisinin seçilmesi yerinde olacaktır. Alçak frekanslı yanıtların yumuşatılmış davranış modeli, modal enerji artışlarındaki standart sapma değerleriyle tahmin edilebilir. Farklı oda oranlarına ait frekans tepkilerinin standart sapmaları karşılaştırıldığında, küçük değerlere sahip olanların daha tutarlı ve akustik açıdan uygun alternatifler olduğu izlenmektedir. Optimum oda oranları konusunda ise pek çok akademik çalışma mevcuttur.

Richard H. Bolt (1946), ideal modal aralık özelliği gösteren oda oranlarını oda yüksekliğinin 1 birim kabul edildiği koordinat haritasında *Bolt Alanı* ismiyle sunmuş, özellikle 2:3:5 ve 1:1.26:1.59 oranlarını en ideal oda oranları olarak önermiştir. Louden (1971), standart sapma analizleri sonucunda en yumuşak frekans tepkisinin 1:1.4:1.9 oda oranında üretilebileceğini öne sürmüştür. Cox vd. (2004), yaptıkları bir dizi istatistiksel çalışma sonucunda, üç hacim grubu (50, 100 ve 200 m³) için farklı yükseklik değerlerine karşılık gelen en uygun oda oranlarının listesini yayınlamışlardır. Meissner (2018), aynı hacim için çeşitli oda oranlarındaki standart sapma değerlerini karşılaştırmış, en tutarlı oda oranlarını renklendirme

yöntemiyle geliştirdiği bir harita ile görüntülemiştir. Burada her bir oda oranı, aynı hacimde farklı yükseklik değerlerine denk gelmektedir. Bu haritaya uygun seçilebilecek bir odada, oranlara bağlı akustik sorunların oluşmasının kolayca kontrol altına alınması beklenir.

Akustik ölçütleri belirleyen ve standartlar kapsamında öne çıkan bir başka yapısal özellik, paralel duvarlardan kaçınmak, ilişkili FE sorununu en aza indirmekle ilgilidir. Bu noktada, paralel duvarlarda en az 7 derecelik bir açılardırma önerilmektedir (Norwegian Standart, 2014, s. 11). MEP odaları için modal analiz yöntemini sunduğu bir başka çalışmada Rindel (2015), açılardırma derecesinde artış yapıldığında, bas ve tiz frekanslarda sönümlenme sürelerinin eşitlendiği sonucuna ulaşmış, eksenel modlardaki enerjinin bir bölümünün teğetsel (*tangential*) ve eğik (*oblique*) modlara aktarıldığını göstermiştir. Başka bir deyişle, duvarlardaki açılardırma ile eksenel modlardaki enerjinin bir kısmı kendi rotasında geri dönmekte, kalan enerji eğim açısına bağlı olarak aynasal yansımayla saçılmakta, eksenel modlardaki sönümlenme süreleri azalmaktadır. Güçlü oda modları uzunluk (L) ekseninde gözlemlendiği için, öncelikle uzun duvarlardaki paralelliğin kırılması tercih edilmelidir. Açılardırma sonucu oluşacak hacim değişiklikleri mekânın akustik davranışları açısından önemli olabilir.

Dikdörtgen hacimlerde, açılardırma sonrası ortaya çıkan oransal değişimler bu çalışmanın sürecinde de dikkatleri çekmiş, açı değişimleri sonucu odanın modal karakteristiğinin bir başka ideal orana denk düşebileceği gibi daha kötü bir oda oranına da benzeyebileceği açıkça izlenmiştir. Bu noktada Winer'ın açıklamaları yol gösterici olabilir. Winer'a göre (2012) dikdörtgen olmayan formlarda modal analiz karşılıklı kenarların ortalaması alınarak gerçekleştirilebilir. Bu söylemden yola çıkılarak bu çalışmada, kenar ortalamaları ideal oda oranına eşit olabilecek bir açılardırma yöntemi geliştirilmiş ve tartışılmıştır. Böylece standartta önerilen hacim ve oda oranı tercihlerinin, tüm eğim derecelerinde sabit kalması amaçlanmıştır. Konu ile ilgili hesaplama önerileri eşitlik serisi 2.2 ile aşağıda sunulmaktadır.

Literatürde strüktüre açı vermenin alçak frekans bölgesi renklendirmelerine etkileri hakkında görüşler bildirilmektedir. Açı, oda içerisindeki modal dağılımları etkilemekle birlikte alçak frekans tepkilerinde büyük değişimler neden olmamaktadır. Öte yandan, dikdörtgen odalarda eksenel mod oluşumları gözlenmekte, düzensiz geometri bir odada ise modlar üç boyutlu eğik formlara dönüşebilmektedir. Açılardırma işlemi sadece odadaki sabit modal dağılımları etkiler (Ballou, 2008, s. 134). Gilford'un da ifade ettiği gibi "açılardırma sadece renklendirme algısını zorlaştırır ancak ortadan kaldırmaz" (Gilford'dan aktaran Everest, 2001, s. 281). Louden, aynı hacimdeki dikdörtgen olan ve olmayan odalarda benzer modal problemlerin mevcut olduğunu belirtmektedir. Gunawan & Aditanoyo (2018), üç farklı oda oranında gerçekleştirdikleri sonlu eleman analizleri ile (*finite element analysis*), duvarlara verilen açıların frekans tepkileri üzerindeki etkisini ve modal dağılım şekillerini grafikler ile incelemişler, açılardırmanın frekans tepkisindeki standart sapma değerini artırdığı sonucuna ulaşmışlardır.

Bir MEP odasının yumuşak frekans tepkisi verebilecek yönde tasarlanması önemlidir. Bunun için kullanılan bazı yöntemler mevcuttur. Örneğin, emici paneller kullanmak. Paneller odaya özgü eksenel (*axial*) modlarda emilim sağlayacak şekilde tasarlanabilir, duvarlara asılabilir. Helmholtz rezonatörleri tasarlanıp modal enerjilerin yoğunlukta olduğu oda köşelerine konumlandırılabilir. Alçak frekanslardaki aşırı yansıma etkilerini ve orta frekanslardaki FE sorununu kontrol amacıyla silindirik formdaki emiciler tavana yakın konumlara, duvarlara yerleştirilebilir (Long, 2006, s. 764). Bu tür uygulamalar ile bir EP odasında oluşan istenmeyen akustik renklendirmeler kısmen kontrol altına alınabilir. Çeşitli geometrik form önerileri de, görelî yumuşak bir frekans tepkisi elde edebilmek için akustik uzmanları tarafından sıklıkla dile getirilir.

2. Mekân, Yöntem ve Modelleme

Bu çalışma, İzmir'de iki önemli müzik eğitim kurumundaki MEP odalarının oran, FE ve frekans yumuşaklığı bakımından yerinde yapılan ses ölçümleriyle birlikte incelendiği, akustik ve müzik için uygun olup olmadığının araştırıldığı, Dokuz Eylül Üniversitesi tarafından sübvansede edilen bir bilimsel araştırma projesinin akustik verilerine dayandırılmaktadır. Çalışmada İzmir'in orta öğretim ve üniversite düzeyinde müzik eğitimi veren köklü geçmişe sahip iki eğitim kurumundan seçilen örnek odalar kullanılmıştır: Işılay Saygın Güzel Sanatlar Lisesi (ISGSL), Dokuz Eylül Üniversitesi Devlet Konservatuarı (İzDK).

ISGSL 1990 yılında Milli Eğitim Bakanlığı'nın onayı ve dönemin İzmir Milletvekili Mimar Işılay Saygın'ın çabalarıyla Buca Lisesi bahçesindeki tarihi bir yapıda *İzmir Anadolu Güzel Sanatlar Lisesi* adıyla eğitim-öğretime başlamış, adı sonradan *Işılay Saygın Güzel Sanatlar Lisesi* olarak değiştirilmiş eğitim kurumudur. Adatepe Mahallesi'nde (GPS: 38.382414, 27.185507) yaklaşık yirmi iki bin metrekarelik bir alanda yer alan bugünkü modern binasına 1998 yılında taşınmıştır. Müzik eğitiminde kullandıkları çok sayıda

bireysel etüt sınıfları, prova odaları, toplu performans mekânları bulunmaktadır. Bireysel sınıflar ortalama 30 m³ hacme sahip küçük tip odalardır. Koro ve çalgı grupları ile toplu müzik çalışmaları için orta boy müzik odası ve sahne yoğun olarak kullanılmaktadır. Müzik kariyerine profesyonel anlamda devam atmak isteyen mezunları eğitim fakülteleri, güzel sanatlar fakülteleri, konservatuarlar, müzik teknolojisi ve müzik sahne sanatları fakültelerinde mesleki eğitimlerini sürdürebilmektedir.

İzDK profesyonel bir müzik eğitim kurumudur. 1954 yılında *İzmir Müzik Okulu* adıyla kurulmuş, 1958 yılında Orhan Barlas yönetiminde *İzmir Devlet Konservatuarı* adıyla resmen açılmıştır. Okul altmış yılı aşkın geçmişinde çok kez taşınmış, farklı mekânlarda profesyonel sanatçılar yetiştirmeye devam etmiştir. Bugün Dokuz Eylül Üniversitesi'ne bağlı olarak Buca Tınaztepe yerleşkesindeki yeni binasında (GPS: 38.367417, 27.204667) eğitim ve öğretim faaliyetlerini sürdürmektedir. Mezunları mesleki kariyerlerine senfoni orkestraları, klasik müzik toplulukları, performans sanatçılığı gibi alanlarda devam edebilmektedir.

Bu iki eğitim kurumunda onlarca MEP odası bulunmaktadır. Dokuz Eylül Üniversitesi tarafından desteklenen bir bilimsel araştırma projesi (BAP) kapsamında bu kurumlardan seçilen tek kişilik (< 50 m³), küçük grup faaliyetlerine uygun (50<100 m³) veya daha büyük (>100 m³) hacimlerdeki on dört farklı mekân üzerinde çalışılmıştır. BAP kapsamında bina gürültü geçişleri incelenmiş, hacim akustiği açısından oda oranlarının uygunlukları, FE davranışları, frekans tepkileri araştırılmış ve akustik tedavi gereksinimleri saptanmıştır (Durmaz vd., 2021).

Bu çalışmada bilimsel araştırma projesinden alınan ses kayıtları, duvarlarda açılındırma yapılması durumunda olası frekans değişiklikleri, benzetim yolu ile elde edilen dikdörtgen ve dik yamuk 3D oda modellerinin RIR sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir. Üç boyutlu modeller ilgili standart kapsamında, düşük ses seviyeli müzik sınıfları için sunulan tasarım önerilerine göre modellenmiş, akustik benzetimleri ODEON 13 programında gerçekleştirilmiştir. Alıcı noktalarındaki frekans tepkileri, MATLAB R2021a platformunda, bu çalışmanın yazarları tarafından geliştirilen bir algoritma kullanılarak analiz edilmiş, bulgular lineer ortalamalı frekans analizleri için çeşitli pencereleme türleri arasında karşılaştırmalar yapılmak, en uygun standart sapma sonuçlarını sunan pencereleme türlerini belirlemek suretiyle teknik açıdan detaylandırılmıştır. Frekansların çınlama bölgesindeki standart sapma değerleri hesaplanmış verilen açının frekans tepkisindeki yumuşatma özelliği incelenmiş, uygun açı değerinin belirlenmesinde yardımcı olabilecek istatistiksel analize bağlı yöntem ve sonuçları sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, MEP oda projelerinin tasarımında uzmanlarca dikkate alınması gereken özel hususları vurgulamaktadır.

2.1. Oda Boyutları

Oda örnekleri, NS-8178 standardına uygun olarak, Trimble SketchUp Pro ile modellenmiştir. Açılındırmanın hacimle ilişkisinin değerlendirilmesi amacıyla üç farklı oda hacmi öngörülmüştür: 50, 100, 150 m³. Söz konusu ilk standart düşük ses seviyeli prova mekânlarında bireysel çalışma odaları için en az 30 m³ hacim 2.7 m yükseklik, küçük çalışma grupları için 45-200 m³ arasında hacim ve 3.5-4 m arasında yükseklik değerlerini önermektedir (Norwegian Standart, 2014, s. 11). Oda oranları; Cox vd. (2004) tarafından 50 ve 100 m³ hacimler için önerilen uygun değerli oranlar listesinden seçilmiş olup standarttaki yükseklik önerilerine karşılık gelen oranlar, eşitlik 2.1 (Meissner, 2018, s. 221) aracılığıyla belirlenmiş, 150 m³ için bu hacim grubundaki en ideal 1:1.4:1.89 oranı (Rindel, 2021, s. 3) kullanılmıştır.

$$H = \left(\frac{V}{S_w \times S_l} \right)^{1/3} \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1'de, H oda yüksekliğini (m), V oda hacmini (m³), S_w genişliğin (W) yüksekliğe (H) oranını, S_l uzunluğun (L) yüksekliğe oranını tanımlar. Oda modellemeleri, 50 m³ hacimde bireysel çalışmalara 100 - 150 m³ hacim gruplarında küçük müzik gruplarına yönelik bir tasarımla gerçekleştirilmiştir. Oda müziği veya eşlik amaçlı küçük grup odalarındaki yükseklik değerlerinde, hacimle ilişkili olarak farklı yükseklik tercihleri uygun görülmüştür (Tablo 1).

Tablo 1. Örnek modeller ve özellikleri: 150 m³ için Louden'da 1:1.40:1.90

Oda Hacmi (m ³)	Sınıf İşlevi	İdeal Oda Oranı	Kenar Boyutları (m) (W : L : H)	Eksenel Frekans (Hz) (L)
50	Bireysel prova odası	1 : 1.50 : 1.80	4.05 : 4.86 : 2.73	35 Hz ve armonikleri
100	Küçük grup odası	1 : 1.26 : 1.48	4.75 : 5.58 : 3.77	30 Hz ve armonikleri
150		1 : 1.40 : 1.89	5.36 : 7.24 : 3.87	23 Hz ve armonikleri

Yedi derece açıldırılmış dik yamukta karşılıklı kenar ortalamaları, aynı hacimdeki dikdörtgen formun oda boyutlarıyla eşleştirilmiştir. Böylece standarttaki yüzey alanı, hacim ve yükseklik önerilerine iki geometrik formda da aynı değerler ile uyum sağlamak mümkün olmuştur. Açıldırmanın $\theta < 15^\circ$ olduğu koşullarda kenar uzunlukları, 2.2a, 2.2b, 2.2c ve 2.2d eşitlikleri yardımı ile tahmin edilebilir:

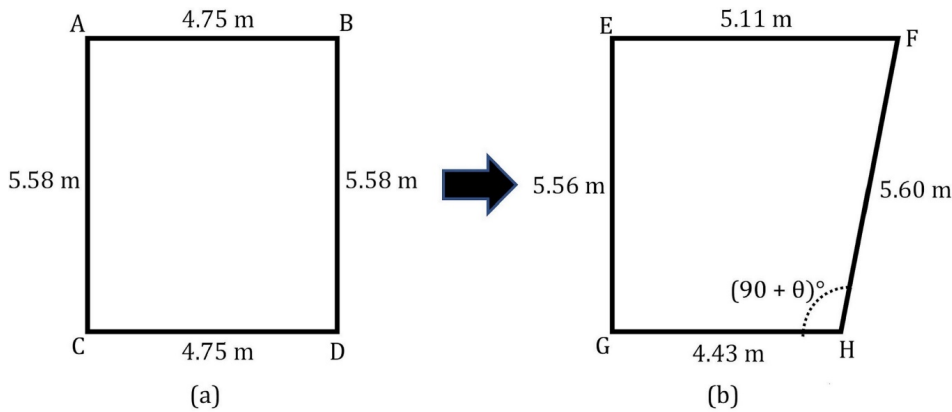
$$|GH| \approx \frac{2 \times |AB|^2}{2 \times |AB| + |AC| \times \tan(\theta)} \quad (2.2a)$$

$$|EG| \approx \frac{2 \times |AC|}{1 + \sqrt{1 + \tan^2(\theta)}} \quad (2.2b)$$

$$|EF| \approx |GH| + |EG| \times \tan(\theta) \quad (2.2c)$$

$$|FH| \approx |EG| \times \sqrt{1 + \tan^2(\theta)} \quad (2.2d)$$

Örneğin, 4.75 m ve 5.58 m boyutlarındaki dikdörtgen formun 7° açıldırılmasıyla elde edilen bir dik yamukta kenar uzunlukları 4.43 m, 5.56 m, 5.11 m ve 5.60 m'dir (bkz. Şekil 2).



Şekil 2. Aynı oda oranlı dikdörtgen ve dik yamuk dönüşümü: **a)** Dikdörtgen model, $L0^\circ$; **b)** Dik yamuk model, $L7^\circ$

2.2. Modal Frekanslar

Oranları aynı olan dönüşümde, her iki modelin modal frekansları ANSYS SpaceClaim ve modal akustik modülünden yararlanılarak listelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Hava malzeme yoğunluğunun $1,2 \text{ kg/m}^3$, sesin havadaki hızının 344 m/s ve eleman büyüklüğünün 200 mm olduğu örnek durum için frekans analizindeki minimum ve maksimum değerler $0,01\text{-}250 \text{ Hz}$ olarak seçilmiş, sonlu elemanlar analizi (Howard & Cazzolato, 2015, s. 399) gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, her iki geometrik formda üretilen modal frekansların temel (f_0) ve ilk harmoniklerinin (f_1) birbirine yakın olduğunu göstermektedir. Eksenel frekans değerleri şöyledir (Tablo 2).

Tablo 2. 100 m^3 hacim örneği için aynı oda oranlarında f_0 ve f_1 frekans değişimleri

Eksen	Frekanslar (Hz)	Dikdörtgen Model ($L0^\circ$)	Dik Yamuk Model ($L7^\circ$)	Fark
L	f_0	30.74	30.69	0.05
	f_1	61.47	61.68	-0.21
W	f_0	36.11	36.08	0.03
	f_1	72.21	71.72	0.49
H	f_0	45.49	45.25	0.24
	f_1	90.98	91.87	-0.89

Aynı oda oranlı dönüşüm sonrası tüm hacim gruplarında yüzey alanı değerleri birbirine yakındır. Bu açıdan gerçek hacim değerlerinin de yakın olması için yüksekliklerde küçük farklılıklar tercih edilmiştir.

Değişimler oda oranlarına da yansıtılmıştır. Bu veriler doğrultusunda tüm modellerdeki gerçek hacim, kenar ortalamaları, oda oranları ve Bolt alanı uyumlulukları şu şekilde özetlenebilir (Tablo 3).

Tablo 3. Hacim gruplarındaki dikdörtgen ve dik yamuk yüzeyli modellerin özellikleri

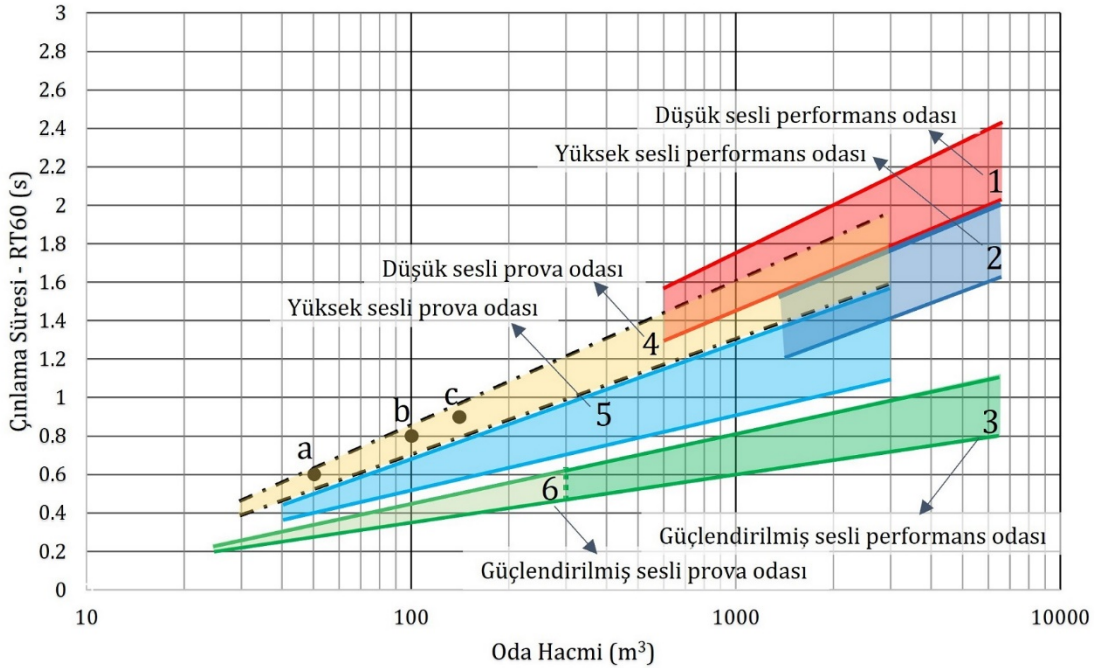
Hacim Grubu (m ³)	Açılandırma	Taban Alanı (m ²)	Yükseklik (m)	Hacim (m ³)	Eksen Ortalamaları	Oda Oranı	Bolt Alanı
50	L0°	19.68	2.73	53.73	4.05:4.86	1:1.48:1.78	✓
	L7°	19.70	2.73	53.78	4.07:4.86	1:1.49:1.78	✓
100	L0°	26.50	3.77	99.92	4.75:5.58	1:1.26:1.48	✓
	L7°	26.39	3.79	100.02	4.76:5.58	1:1.27:1.47	✓
150	L0°	38.81	3.87	150.18	5.36:7.24	1:1.39:1.87	✓
	L7°	38.66	3.88	150.00	5.37:7.24	1:1.38:1.87	✓

2.3. Ses Basınç Düzeyleri

Standartlarla uyumlu akustik tasarımlarda farklı işlevlerdeki müzik odaları ve çalgı grupları için ihtiyaç duyulan ideal G (dB_{SPL}) seviyelerine ulaşılması hedeflenmektedir (Norwegian Standart, 2014). Örneğin, 50 m³ hacimli bir piyano prova odası için kabul gören RT değeri, 0.5 s. ve 0.65 s. arasında olmalıdır ve bu aralığa ulaşıldığında bireysel etüt odaları için önerilen G limitlerini (*forte* çalışta 23–28 dB) karşılayan bir akustik tasarımı da gerçekleştirmek mümkün olabilir. Her hacim değeri için alt ve üst limitleri karşılayan emicilik katsayıları (α), V oda hacmi (m³), S (m²) yüzey alanı, RT çınlama süresinin bir fonksiyonudur ve Sabine denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\alpha = \frac{0.161 \times V}{S \times RT} \quad (2.3)$$

Frekansa bağlı olmakla birlikte, tüm hacim grupları için önerilen ortalama çınlama aralığına girebilmek için ağırlıklı emicilik değeri $\alpha=0.15$ olarak hesaplanmıştır. Düşük ses seviyeli müzik prova odalarında en uygun RT - V ilişkisi ve modellerin uygunluk konumları şöyle gösterilebilir (bkz. Şekil 3).



Şekil 3. Modellerin RT - V ilişkisi; **a)** 50 m³, **b)** 100 m³, **c)** 150 m³ (Norwegian Standart, 2014)

Odeon benzetimlerinde kaynak noktaları odanın köşelerine, alıcı noktaları odanın merkezine yakın konumda seçilmiştir. Alıcı noktaları aynı koordinatta olacak şekilde RIR çıktıları alınmıştır. Simülasyon

sonuçlarında RT değerleri Sabine denkleminin sonuçlarına göre yaklaşık 1 sn azalmıştır ancak yine de alt ve üst çınlama limitleri arasındadır. Her iki modelde yüzey alanı, hacim, oda oranı ve emicilik katsayısı gibi özellikler sabit tutulmuş, bununla sadece açıldırılmadan kaynaklanan farklılıkların karşılaştırılması amaçlanmıştır.

3. Frekans Tepkisi ve Yumuşaklık

3.1. Çözünürlük ve Pencereleme Türleri

Odeon programı ile üretilen RIR, *transient* sinyal grubundadır. DFT bu tür sinyal grubunda zaman ekseninden frekans eksenine geçiş için uygun bir analiz yöntemidir (Cerna & Harvey, 2000, s. 1). Sinyaldeki tüm örnekler üzerinde dönüşüm yapılabileceği gibi, geniş frekans aralıklarındaki görsel analizler için daha düşük frekans çözünürlüklü, zamana bağlı, ortalamalı analizlere ihtiyaç bulunmaktadır. Ortalamalı frekans analizi, sinyali eşit uzunluktaki segmentlere ayırdığından, tek DFT analizinin sunduğu grafiği daha yumuşak ve analiz edilebilir bir şekilde sunabilir. Ortalamalı frekans analizinin bir başka avantajı, frekans değerlerindeki genlik doğruluğunu etkilemeden arka plan gürültüsündeki salınım etkilerini azaltmasıdır. Arka plan gürültüsündeki varyans değeri, n segment sayılı ortalamalı analizde, tek DFT analizine göre $1/n$ katsayısı kadar azalma gösterecektir (Lyons, 2004, s. 424). Böylece, elverişsiz ölçüm ortamlarından elde edilen RIR verilerinin analizinde arka plan gürültü etkileri de azaltılmış olur.

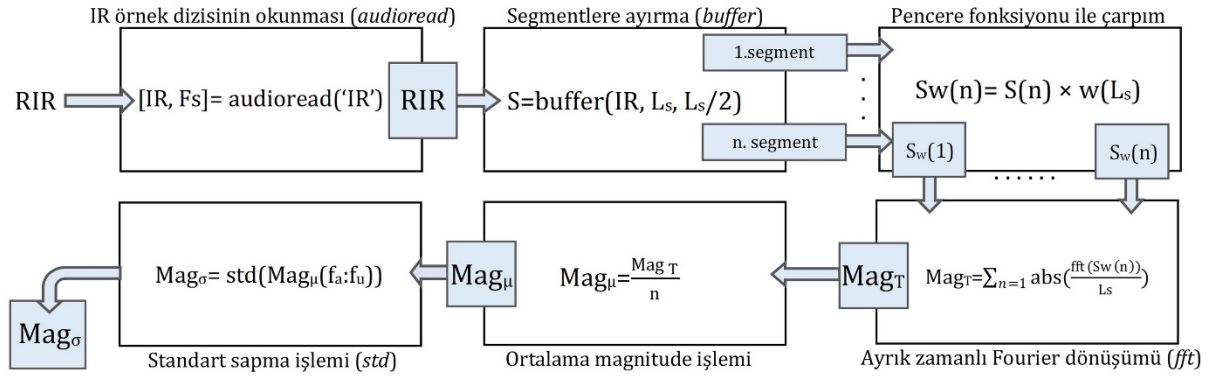
RIR, lineer ortalamalı DFT analizi için eşit uzunlukta ve birbiriyle yarı yarıya kesişen segmentlere ayrılmıştır. Frekans eksenindeki standart sapma analizi için sağlanması gereken en önemli özellikler yüksek frekans çözünürlüğü ve genlik doğruluğudur. Pencereleme, yüksek frekans çözünürlüğü elde etmek amacıyla 2^{14} uzunluklu olacak şekilde, DFT ise 44100 Hz (F_s) ile örneklenmiş 16384 örnek uzunluklu segmentler üzerinden gerçekleştirilmiş her frekans değerinin ortalama magnitude değeri hesaplanmıştır. Büyüklük vektöründe değerler, 2.69 Hz (Δf) aralıklarla üretilmiştir. İlk frekans 0 Hz (DC bileşen), son frekans ise (Nyquist teoremine bağlı olarak) 22.05 kHz ($F_s/2$) değeridir. Frekans çözünürlüğü (Δf); örnekleme frekansı (F_s) ve segment uzunluğunun (L_s) bir fonksiyonudur (Cerna & Harvey, 2000, s. 4).

$$\Delta f = \frac{F_s}{L_s} \quad (3.1)$$

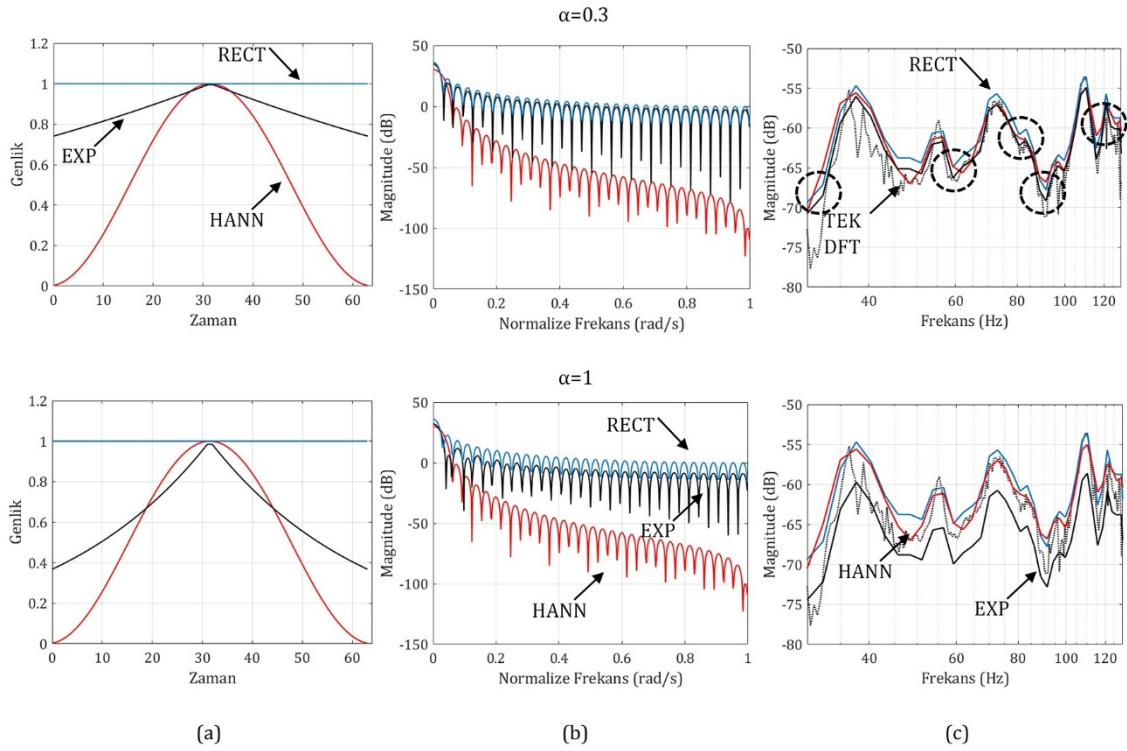
Dürtü tepkisi, 2^{14} örnek uzunluğundaki segmentlerde periyodik özellik göstermediği için iki ardışık segment arası geçiş bölgelerinde ani değişimler gözlenebilir. Bu değişimler, frekans bileşenlerinin komşu frekans bölgelerinde geniş yayılım göstermesi anlamına gelen spektral sızıntı etkilerine yol açmaktadır (Raichel, 2006, s. 196). Böylesi etkilerin elimine edilmesi, aralarındaki süreksizlik etkilerinin azaltılması için her segmentin farklı pencereleme türlerinden biriyle çarpılması gerekmektedir. Bu yöntemde her bir segment için ayrı ayrı uygulanan DFT analizi sonucu elde edilen 2.69 Hz frekans çözünürlüklü magnitude değerleri toplanarak Mag_T vektörü oluşturulmuş, segment sayısına bölünmüş, her bir frekansın tüm sinyaldeki zaman ortalamalı değerleri (Mag_u) hesaplanmıştır. Elde edilen tek vektörde, alt (f_a) ve üst (f_u) limitler arasındaki yumuşaklık analizi için *std* fonksiyonu kullanılmış; her oda modeli için çınlama frekans bölgesindeki standart sapma değeri (Mag_σ) hesaplanmıştır. MATLAB algoritmasındaki aşamalar ve kullanılan fonksiyonlar bir blok diyagram ile ifade edilebilir (bkz. Şekil 4).

En çok tercih edilen türlerinden olan hanning (HANN) pencereleme, sinüs dalgaları ve rastgele sinyal türleri için uygundur (Cerna & Harvey 2000, s. 15). HANN, sabit pencereleme türlerinden biridir. Pencerenin başı ve sonu sıfır ile çarpılarak iki ardışık segment arasındaki süreklilik en yüksek düzeyde sağlanmış olur. HANN pencereleme, frekans çözünürlüğü ve spektral sızıntı önleme açısından iyi bir performans gösterir ancak yüksek genlik doğruluğu sağlayamaz. RIR verilerinin DFT analizinde modal frekans bölgesindeki spektral sızıntıları önleyen pencereleme türü eksponansiyel (EXP) pencerelemedir (Rossing, 2007, s. 1131). İlk ve son değer sıfır değildir. Penceredeki α parametresine bağlı olarak düşüş eğimi de değişmektedir.

Bu projede dikdörtgen (RECT), HANN ve EXP tekniklerin sunduğu sonuçlar, frekans çözünürlüğü ve spektral sızıntı önleme açısından karşılaştırılmıştır. Bu aşamada yapılan etütler, halen devam etmekte olan bir bilimsel araştırma projesi kapsamında (Durmaz vd., 2021), İzmir Buca Işılay Saygın Güzel Sanatlar Lisesi'nin 5.3 m:2 m:3 m boyutlarındaki MEP odasında, ölçüm yoluyla elde edilen RIR verileri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Pencereleme türleri ve frekans tepkisindeki etkileri gösteren grafiklerdeki sızıntılar ilgi çekicidir (bkz. Şekil 5).



Şekil 4. Standart sapma hesabı için blok diyagram

Şekil 5. HANN, EXP; $\alpha=0.3$ ve 1 ve RECT pencereleme, a) 26 uzunluklu b) 26 uzunluklu frekans eksenleri, c) dürtü tepkisi: $L_s=214$ iken, tek DFT /kesikli, HANN /kırmızı, RECT /mavi, EXP pencere /siyah, spektral sızıntı / kesikli daire

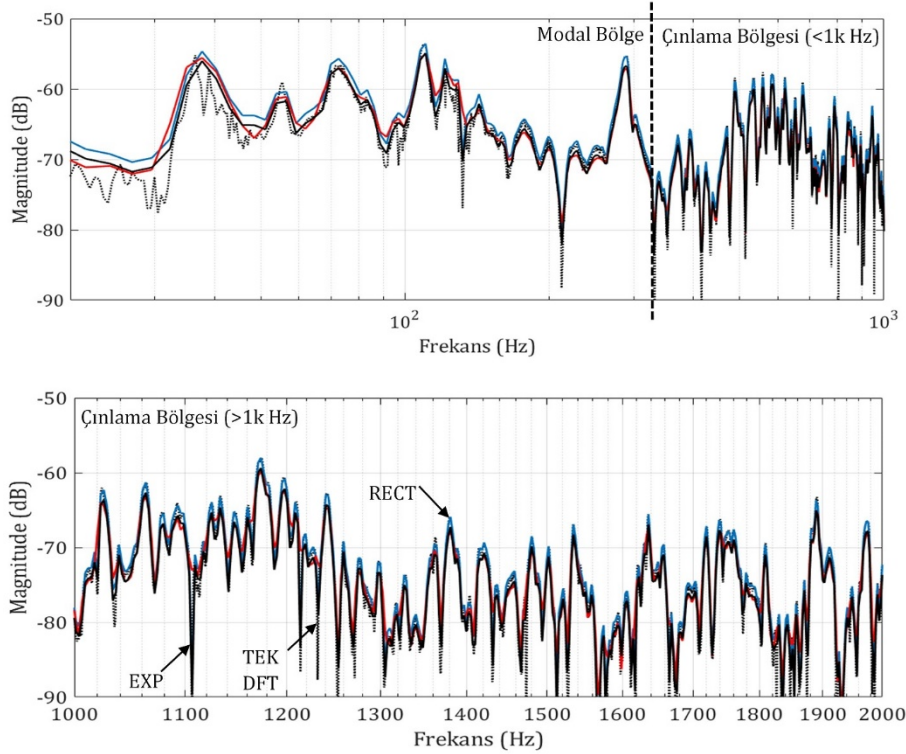
EXP pencere tasarımlarında α parametresindeki artıştan dolayı düşüş eğimi artar, ilk ve son değerler sıfır değerine yaklaşır. Bu durum segmentler arasındaki süreksizlik etkilerini azaltır (Harris, 1978, s. 68), magnitude değerleri tek DFT sonuçlarından uzaklaşır (Şekil 5c). Bu nedenle α parametresini sıfıra yakın tercih etmek daha optimum sonuçlar sunacaktır. EXP frekans tepkisindeki ana lob genişliği, HANN tekniğine göre daha dardır; bu nedenle Cerna & Harvey'in çalışmasından yola çıkarak (2000, s. 13), birbirine yakın frekansları yansıtma performansının daha üstün olacağı öngörülmektedir.

RECT ve HANN tekniklerinde geniş frekans bölgesindeki yayılımlara neden olan spektral sızıntı etkileri, EXP türünde azalma gösterir. Örneğin (1.0.0)-36 Hz, (0.0.1)-55 Hz ve (0.0.2)-110 Hz değerlerindeki modal enerjiler, EXP sonuçlarda ardışık frekans değerlere yayılım göstermeden uygun şekilde yansıtılmıştır. Farklı pencereleme türlerinde modal enerjilerin yoğunlukta olduğu 20~320 Hz ve FE etkilerinin görüldüğü ~320-2k Hz aralıklarındaki 2.69 Hz frekans çözünürlüklü standart sapma değerleri hesaplanmış, frekans grafikleri incelenerek en uygun pencere türü belirlenmiştir (bkz. Şekil 6).

Optimum pencere türünün belirlenebilmesi için, en yüksek frekans çözünürlüğü sunan tek DFT ile daha düşük Δf değerli (2.76 Hz) pencere türlerinden elde edilen standart sapma değerleri arasında karşılaştırmalar yapılmıştır (Tablo 4).

Tablo 4. Farklı pencere türlerinin standart sapma değerlerine olan etkisi

Pencereleme Türü	Standart Sapma (dB)	
	20 - 320 Hz	320 - 2 kHz
Tek DFT	5.14	7.40
Ortalama DFT, HANN	5.05	6.04
Ortalama DFT, EXP	4.93	6.68
Ortalama DFT, RECT	4.93	6.68

**Şekil 6.** Farklı pencere türlerinin etkileri, tek DFT /kesikli, EXP $\alpha=0.3$ /siyah, HANN /kırmızı, RECT /mavi

320 Hz-2 kHz arasındaki EXP ve RECT tekniklerinde standart sapma değerleri birbirine eşittir ve yüksek frekans çözünürlüklü DFT analiz sonucuna daha yakındır. EXP, özellikle modal enerji bölgesinde, birbirinden uzak olan güçlü tepe noktalarında spektral sızıntıları önlediği için akustik dürtü tepkilerine daha uygun bir pencereleme türüdür. HANN daha yumuşak bir frekans tepkisi üretir. Bu durum standart sapma hesabında daha düşük frekans çözünürlüklerinde yanıltıcı sonuçlara sebep olabilir. Oda içerisindeki tüm modlar, tek DFT analizinde işlenmektedir ancak düşük frekans çözünürlüklü analizlerde sadece güçlü ekstenel modlar (36-55-72-110 Hz) belirgindir. Bu nedenle, daha düşük enerjili teğetsel ve eğik modların görünürlüğü için tek DFT daha uygun görülmektedir.

Yapılan çalışmalar HANN pencerelemenin daha düşük standart sapma değerleri ürettiğini; EXP pencerelemenin sifıra yakın α değerli tasarımlarla modal enerji bölgesindeki spektral sızıntıları önlediğini ve genel frekans tepkisindeki tek DFT standart sapma değerlerine yakın sonuçlar sunduğunu göstermektedir. Buradan optimum pencere türünün EXP pencereleme olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

3.2. Schroeder Frekansı ve Yumuşatma Etkileri

Yumuşaklık analizlerinde alt ve üst frekans limitleri belirlenirken Alman fizikçi Manfred R. Schroeder tarafından literatüre kazandırılan *Schroeder Frekansı*'ndan yararlanılmıştır (Schroeder, 1954). Odalarda, modal enerjilerin yoğunlukta olduğu ve dalga akustiği teorisi ile açıklanan frekans bölgesiyle, çınlama teorisinin etkilerinin görüldüğü, oda geometrisinin önem kazandığı ve istatistik akustiği ile ifade edilebilen frekans bölgesi arasında bir geçiş değeri bulunur. Bu değer Schroeder frekansıdır (f_s). Schroeder frekansı altında kalan bölgede modal frekanslar birbirinden daha uzaktır, frekanslar üzerinde kontrol edilmesi daha zor bir renklendirme etkisi yaratıp içinde yapılan müziğin doğal frekans bileşenlerini de farklılaştırabilir. Diğer taraftan f_s üzerindeki oda modları birbirine çok yakın olduğu için

genellikle bağımsız tepe noktaları halinde ses artışlarına, görelî yükselmelere sebep olmazlar (Winer, 2012).

Akustik modellemelerde Odeon, bir odanın davranışını analiz ederken ışın izleme gibi bazı istatistiksel yöntemler de kullanır. Schroeder frekansının üstündeki değerler ışın izleme yaklaşımı ile analiz edilebilir ancak f_s altındaki sonuçlar için sonlu elemanlar yöntemi ile yürütülen modal enerji analizlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, ışın izleme yöntemiyle üretilen RIR verilerinin standart sapma hesabında alt limit frekans değeri, ilgili modele özgü f_s olarak belirlenmiştir. Her modeldeki Schroeder frekansı f_s (Hz), çnlama süresi (T/s) ve oda hacminin (V/m^3) bir fonksiyonu olarak;

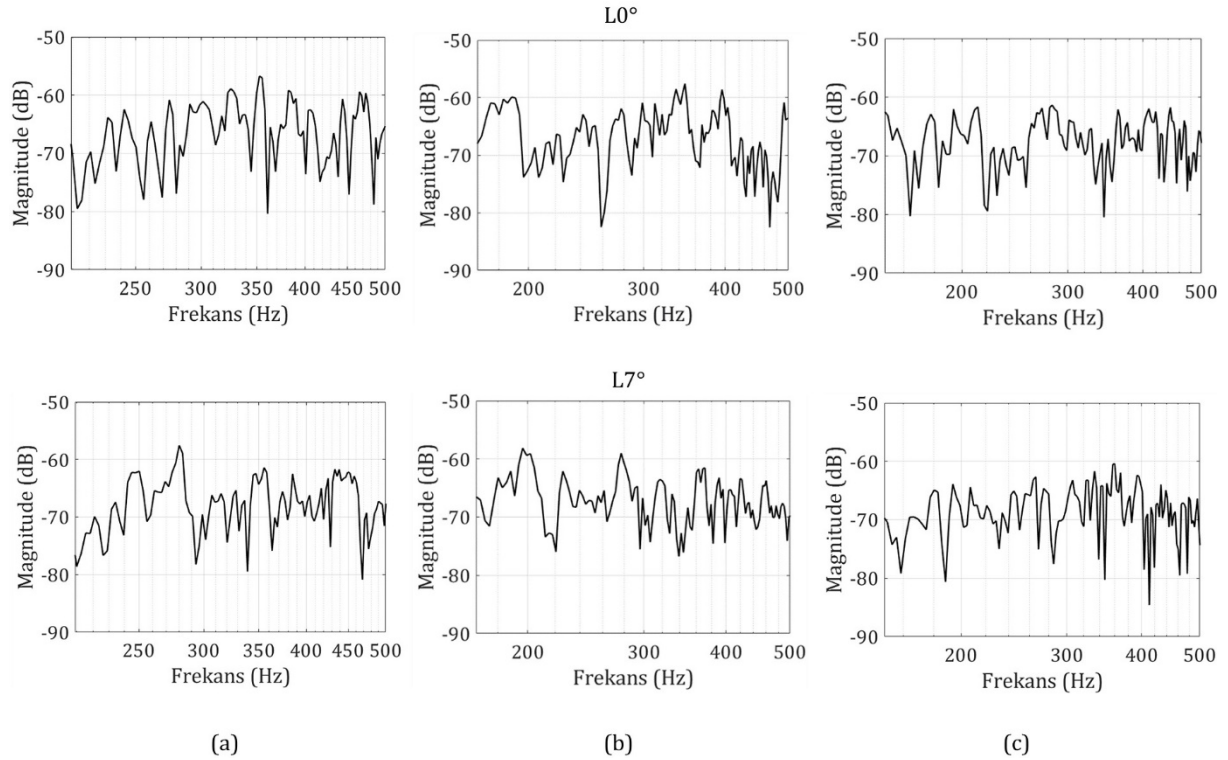
$$f_s = 2000 \times \sqrt{T/V} \quad (3.2)$$

eşitliği ile tahmin edilebilir (Schroeder, 1954). Hacim gruplarındaki f_s Odeon verileri 1 kHz değerindeki RT60 değerlerine göre hesaplanmış ve sonuçları şöyle gösterilmiştir (Tablo 5).

Tablo 5. Hacim gruplarındaki Schroeder frekans (f_s) değerleri

Hacim Grupları (m^3)	RT60 (s.) @ 1 kHz	f_s (Hz)
50 m^3	0.6	219.10 Hz
100 m^3	0.7	167.33 Hz
150 m^3	0.8	146.10 Hz

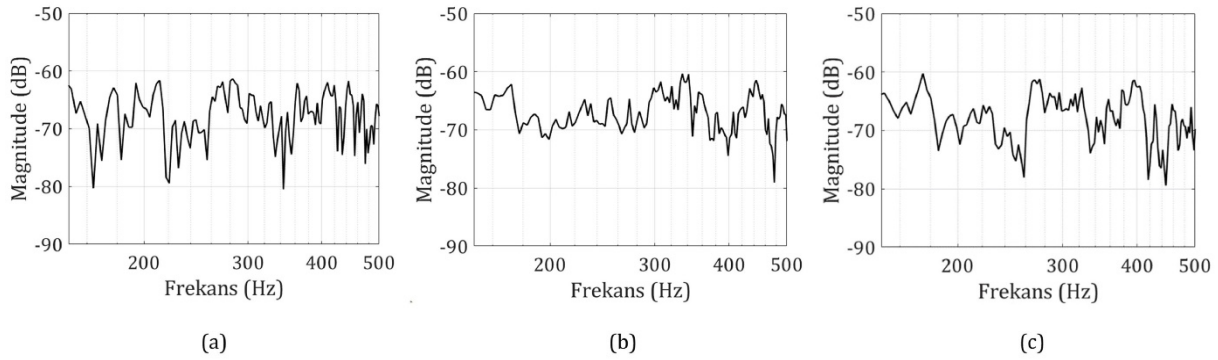
Hacim gruplarında f_s -500 Hz arası frekans tepki grafikleri oluşturulmuş; yumuşaklık özelliği bölgesel değişimlerle incelenerek görsel analizi gerçekleştirilmiştir (bkz. Şekil 7).



Şekil 7. Açılıştırmanın f_s -500 Hz arasındaki etkileri, **a)**50 m^3 , **b)**100 m^3 , **c)**150 m^3

Açılıştırma sonucunda, 50 ve 100 m^3 dikdörtgen modellerdeki salınımlarda dinamik alan azalmıştır. 100 m^3 hacim grubunda dikdörtgen modellerde 200-250 Hz ve 400-500 Hz arasında bölgesel olarak ses seviyelerinde düşüş gözlenmiş; ancak açılıştırılmış modelde bu düşüşler genel frekans tepkisi seviyesine taşınmıştır (bkz. Şekil 7). 150 m^3 hacim grubundaki 7 derecelik açılıştırma, daha yumuşak bir frekans tepkisi elde edilmesi için yeterli değildir. Bu durum, daha büyük hacimlerde çnlama etkilerinin artmasıyla

açıklanabilir. Bu nedenle, 9° ve 11° açıldırılmış modellerdeki frekans tepki grafikleri oluşturulmuş; standart sapma değerleri ayrıca hesaplanmıştır (bkz. Şekil 8).



Şekil 8. 150 m³ hacimde daha büyük açıldırma etkilerinin sonuçları, **a)** 150-L0°, **b)** 150-L9°, **c)** 150-L11°.

Görsellerdeki değerlendirmelerin sayısal ifadesi için f_s -500 Hz arasındaki standart sapmalar şu şekilde hesaplanmıştır (Tablo 6).

Tablo 6. Frekans tepki grafiklerinde standart sapmalar

Model Bilgileri		Standart Sapma (dB) f_s -500 Hz
Hacim (m ³)	Açıldırma	
50	L0°	5.35
	L7°	4.68 ✓
100	L0°	5.31
	L7°	3.94 ✓
150	L0°	4.25
	L7°	4.46
	L9°	3.29 ✓
	L11°	4.05

Açıldırmanın, frekans tepkilerindeki yumuşatma etkileri, eşitlik 3.3 yardımıyla bulunabilir:

$$YE\% = 100 \times \left(1 - \frac{D_{L7^\circ}}{D_{L0^\circ}}\right) \quad (3.3)$$

Burada, YE % açıldırmanın yumuşatma etkisini, D_{L0° ve D_{L7° parametreleri ise sırasıyla dikdörtgen ve dik yamuk modellerdeki standart sapma değerlerini (dB) tanımlamaktadır. Açıldırılmış modeller, f_s -500 Hz arasındaki bölgede en fazla %25 oranında daha düzenli bir frekans tepkisine sahiptir (Tablo 7).

Tablo 7. Açıldırmanın frekans tepkileri üzerindeki yumuşatma etkileri

Model Bilgileri		Yumuşatma Etkisi f_s -500 Hz
Hacim(m ³)	Açıldırma	
50	L7°/L0°	% 12.52
100	L7°/L0°	% 25.80
150	L7°/L0°	% -4.94
	L9°/L0°	% 24.71
	L11°/L0°	% 4.71

150 m³ hacim grubu sonuçlarına göre, açıldırma derecesindeki artış ve frekans tepkilerindeki yumuşaklık ilişkili değildir. Bunun bir nedeni aynı oda oranlı her açıldırma derecesinde dört kenar uzunluklarının tümünde yaşanan değişiklikler olmalıdır.

Hacim ve oda oranının birebir sabit kaldığı açıldırma, tüm yüzeye aynı emici katsayı atanarak gerçekleştirilen akustik tasarımlarda, optimum açıldırma derecesinin belirlenebilmesi için tercihen en

az 7° ve üst değerlerinde standart sapma değerleri hesaplanması, geometrik formun yumuşaklık özelliğine olan etkisi analiz edilerek ideal açı değerinin belirlenmesi önerilir.

4. Sonuç

Bu projede, aynı oda oranına sahip dikdörtgen ve açıldırılmış MEP odalarından elde edilen frekans tepkilerindeki yumuşaklık özellikleri ile bunlara en uygun düşen seçenekler incelenmiştir. RIR için ortalamalı ayırık zamanlı frekans dönüşümünde tercih edilmesi gereken pencereleme türleri, İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi'nce desteklenen ve halen devam etmekte olan bir *Bilimsel Araştırma Projesi* kapsamında İZDK ve ISGSL eğitim kurumları MEP odalarında ölçümlenmiş dürtü tepkileri incelenerek belirlenmiştir. Frekans tepkisi grafiği ve yumuşaklık özelliğini yansıtan sayısal değerler, MEP odalarında akustik tasarımın gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bas frekans bölgesindeki belirgin artışların yanı sıra 210 Hz'deki derin çukur ve 290 Hz'deki yüksek tepe noktası, müziğin bu odalar içerisinde çok sert bir filtreleme etkisiyle algılanacağına, çalgının sesinde de beklenmeyen etkilerin oluşabileceğine işaret etmektedir.

Odeon simülasyonu ile üretilen RIR verilerine göre, açıldırma ile birlikte genel frekans tepkisindeki salınımlarda dinamik alan azalmıştır. 7° açıldırma, 50 m³ ve 100 m³ hacim gruplarında daha yumuşak bir frekans tepkisi elde etmek için yeterlidir ancak çınlama etkilerinin daha fazla olduğu 150 m³ hacim grubunda daha büyük açıldırma derecelerine ihtiyaç duyulmuştur.

Model üzerinde 9° açıldırmanın, 100 m³ hacim grubundaki 7° açıldırma ya yakın bir değerde yumuşatma etkisi (~%25) yarattığı izlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları 50 ve 100 m³ hacim gruplarında 7°, 150 m³ hacim grubunda ise 9° açıldırma derecesinin en uygun olduğu noktasında birleşmiştir.

Her iki geometrik forma ait modal frekans oluşumları, ideal oda oranları korunduğu için birebir aynıdır. Bu durum, mimari tasarım aşamasında tercih edilebilecek açıldırma yönteminin bir sonucudur. Şekil 2-b'de sunulan ölçülere göre, kenarları 5.10 ve 5.56 m olan dikdörtgen bir oda, uzunluk ekseninde yatay olarak 7° açıldırılabilir. Böylece, ~1:1.26:1.48 oda oranındaki modal frekans özellikleri, FE sorununun önlendiği açıldırılmış bir modelden elde edilebilir. Aynı oda oranlı açıldırma yönteminin bir başka avantajının, ilgili standarttaki alt limit hacim değerlerine yakın modellerdeki hacim ve yüzey alanı ilişkilerinin tüm açıldırma derecelerinde de sabit ve optimum bölgede kaldığı gösterilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışmada, Dokuz Eylül Üniversitesi tarafından sübvansede edilen *MEB Eğitim kurumlarındaki müzik etüt sınıflarında akustik konfor ve gürültü kirliliğinin araştırılması* başlıklı Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında incelenen gerçek mekânlar, gerçekleştirilen akustik ölçüm verileri kullanılmıştır.

Kaynakça

- Ballou, G. (2008). *Handbook for sound engineers*. Taylor & Francis.
- Bolt, R. H. (1946). Note on normal frequency statistics for rectangular rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 18(1), 130-133.
- Cerna, M. & Harvey, A. F. (2000). *The fundamentals of FFT-based signal analysis and measurement*. Application Note 041, National Instruments.
- Cox, T. J., D'Antonio, P. & Avis, M. R. (2004). Room sizing and optimization at low frequencies. *Journal of the Audio Engineering Society*, 52(6), 640-651.
- Durmaz, S., Işıkhhan C. ve Karaman, Ö. Y. (2021). MEB Eğitim kurumlarındaki müzik etüt sınıflarında akustik konfor ve gürültü kirliliğinin araştırılması. *Dokuz Eylül Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi*. 2020-KB-FEN-025
- Everest, F. A. (2001). *Master handbook of acoustics*. McGraw-Hill Education.
- Gunawan, H. & Aditanoyo, T. (2018). Study of the effect of splaying wall to modify acoustic modes distribution in small room. *Journal of Physics: Conference Series*, 1075 (1), p. 012049.
- Harris, F. J. (1978). On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, 66(1), 51-83.

- Howard, C. & Cazzolato, B. (2015). *Acoustic analyses using Matlab and Ansys*. CRC press.
- Long, M. (2006). *Architectural acoustics*. Elsevier.
- Louden, M. M. (1971). Dimension-ratios of rectangular rooms with good distribution of eigentones. *Acta Acustica united with Acustica*, 24(2), 101-104.
- Lyons, R. G. (2004). *Understanding digital signal processing*, 3/E. Pearson Education India.
- Meissner, M. (2018). A novel method for determining optimum dimension ratios for small rectangular rooms. *Archives of Acoustics*, 43.
- Norwegian Standart. (2014), *Acoustic criteria for rooms and spaces for music rehearsal and performance*. NS-8178 , Oslo.
- Raichel, D. R. (2006). *The science and applications of acoustics*. Springer Science & Business Media.
- Rindel, J. H. (2015). Modal energy analysis of nearly rectangular rooms at low frequencies. *Acta Acustica united with Acustica*, 101(6), 1211-1221.
- Rindel, J. H. (2021). Searching the musical rehearsal room. *Baltic Nordic Acoustic Meeting*, 3, 1-12
- Rossing, T. D. (Ed.). (2007). *Springer handbook of acoustics (Vol. 1)*. Springer.
- Schroeder, M. (1954). Die statistischen Parameter der Frequenzkurven von großen Räumen. *Acta Acustica united with Acustica*, 4(5), 594-600.
- Winer, E. (2012). *The audio expert: everything you need to know about audio*. Routledge.